

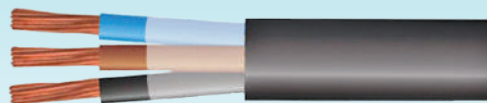
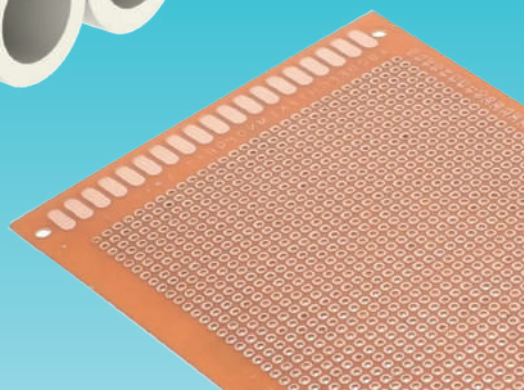
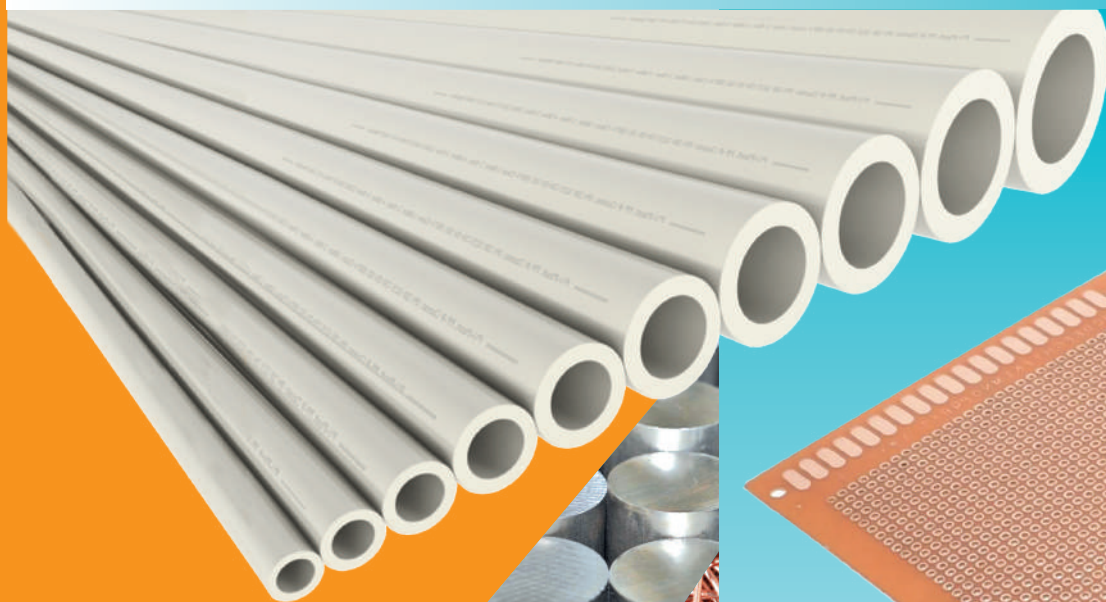
О. В. Паржницький,
С. В. Аушева, Г. Ю. Шулепіна

ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО



О. В. Паржницький
С. В. Аушева
Г. Ю. Шулепіна

ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО



О. В. Паржницький,
С. В. Аушева,
Г. Ю. Шулєпіна

ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Навчальний посібник для здобувачів професійної
(професійно-технічної) освіти

Схвалено для використання в освітньому процесі

Київ
«ГРАМОТА»
2023

*Схвалено для використання в освітньому процесі
[рішення експертної комісії з професій машинобудування, метало-
обробки, електротехнічного виробництва від 25 січня 2022 року
(протокол № 3) та рішення експертної комісії з проведення
антидискримінаційної експертизи від 15 липня 2022 року (протокол № 6)],
№ 5.0003–2022 у Каталозі надання грифів навчальній літературі
та навчальним програмам*

Цей навчальний посібник надруковано за фінансової підтримки Європейського Союзу та його держав-членів Німеччини, Фінляндії, Польщі та Естонії у межах програми «EU4Skills: кращі навички для сучасної України». EU4Skills виконується Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH та Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Зміст цієї публікації є виключною відповідальністю її авторів та не може жодним чином сприйматися як такий, що відображає погляди Європейського Союзу, його держав-членів та Програми.

Рецензенти:

С. М. Петерик — заступник директора науково-методичного центру професійно-технічної освіти в Запорізькій області, методист вищої категорії;

Л. Є. Землякова — спеціаліст вищої категорії, старший викладач ДНЗ «Запорізьке машинобудівне вище професійне училище»;

Н. Г. Попова — спеціаліст вищої категорії, старший викладач ДНЗ «Запорізьке машинобудівне вище професійне училище».

Паржницький О. В.

П18 Електроматеріалознавство : навч. посібн. для здобувач. проф. (проф.-тех.) освіти / О. В. Паржницький, С. В. Аушева, Г. Ю. Шулепіна. — Київ : Грамота, 2023. — 224 с. : іл.

ISBN 978-966-349-924-6

У навчальному посібнику розглянуто класифікацію електротехнічних матеріалів, їхні властивості та процеси виробництва. Видання призначене для закладів профосвіти (професійних коледжів) і навчальних центрів на підприємствах, які здійснюють навчання з професій «Електромонтер із ремонту та обслуговування ЕУ», «Монтажник РЕА», «Електромеханік із ремонту та випробувань ЕУ». Відповідає СП(ТП)О 7241.С.33.14-2018 із професії «Електромонтер із ремонту й обслуговування електроустаткування» 2–6 розрядів та СП (ПТ)О 7242.С.26.00-2020 із професії «Монтажник радіоелектронної апаратури» 2–6 розрядів, відповідно до наказів МОН України.

удк 621.3:320.22](075.3)

ПЕРЕДМОВА

Електроматеріалознавство — один з основних навчальних предметів для багатьох спеціальностей електро- та радіотехнічного профілю, який забезпечує необхідну підготовку для вивчення і засвоєння інших спеціальних дисциплін. У навчальному посібнику подано класифікацію електротехнічних матеріалів, їхні властивості та деякі технологічні процеси виробництва. Основну увагу приділено фізичним явищам, що відбуваються в матеріалах під впливом електромагнітних полів.

Електротехнічні матеріали відіграють важливу роль у конструкціях найрізноманітніших електротехнічних пристроїв та апаратів. Від властивостей і правильного вибору матеріалів залежить ефективність роботи електрообладнання. Знання електрофізичних, фізико-технічних і механічних властивостей матеріалів, які застосовують, є обов'язковим під час проектування і розроблення нових радіотехнічних пристроїв та електрообладнання з поліпшеними характеристиками.

Забезпечення високої надійності роботи електрообладнання ґрунтується насамперед на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах під час їхньої експлуатації, на знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів, вимогах чинних ДСТУ, нормативних і технічних умовах їхнього використання. Це є запорукою надійної роботи електричних мереж і комплексів електроустаткування.

На першому місці у вітчизняній електро- й радіотехніці стоїть питання про вдосконалення якості матеріалів, їхній правильний вибір, коли їх використовують як провідники, діелектрики, напівпровідники або магнітні матеріали. Тому для розуміння властивостей матеріалів, а також інших особливостей потрібно досліджувати їхню структуру й будову. Поєднання основних вимог із реальними можливостями виробництва забезпечить якість матеріалів, їхню технологічність і високі параметри.

Матеріали відіграють велику роль у технічному прогресі. Електротехнічне матеріалознавство постійно розвивається. Нині розробляють модифікації матеріалів із найкращими характеристиками, створюють нові матеріали з унікальними властивостями, що дає позитивні результати. А тому потрібно знати основні напрями розвитку електротехнічного матеріалознавства та його потенційні можливості, що з'являються завдяки використанню сучасних матеріалів.

Автори

Розділ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ

Усе, що нас оточує, називають *матерією*. Матерія існує у двох видах — поле й речовина.

Унаслідок *гравітаційного поля* (поле тяжіння) всі тіла притягуються до Землі. *Електричне поле* спричиняє появу електричного струму. Під дією *магнітного поля* певні предмети притягуються до магніту.

Світло й радіохвилі також є польовими видами матерії.

Речовина — це матерія, з якої складаються всі тіла. Кожна окрема речовина має певний склад і властивості, якими вона відрізняється від інших. *Простою* називають речовину, молекули якої утворені атомами одного елемента: золото (Au), хлор (Cl_2) тощо. *Складною* називають речовину, молекули якої утворені атомами різних елементів: вода (H_2O), нітратна кислота (HNO_3) тощо. Назви простої і складної речовин пишуть із малої літери.

Деякі хімічні елементи можуть сполучатися між собою, утворюючи різні прості речовини. Є таке поняття *алотропія* — властивість хімічних елементів утворювати кілька простих речовин, які відрізняються кількістю атомів у молекулі. Утворені прості речовини називають *алотропами*. Наприклад: сполуки елемента кисню (O) — кисень (O_2) та озон (O_3). Елемент карбон (C) у природі також трапляється в алотропних формах: графіт, алмаз та ін. Алотропи відрізняються між собою будовою молекули, а отже, і властивостями.

Усі речовини складаються з атомів. *Атом* — це позитивно заряджене ядро (із протонів і нейтронів), навколо якого обертаються негативно заряджені електрони. Для наочності (*рис. 1.1*) відстань від ядра до електронів показана дещо більшою, ніж діаметр самого ядра. Насправді відстань від ядра до електронів набагато більша за розміри електронів і також перевищує розмір самого ядра в сотні тисяч разів. На планетарній (застарілій) моделі будови атома електрони обертаються навколо ядра по певних стаціонарних орбітах (*рис. 1.1, а*). Сучасна модель атома — це ядро, навколо якого кожний електрон начебто «розмазаний» по орбіталах — частинах простору, що оточують ядро (*рис. 1.1, б*).



Рис. 1.1. Будова атома: а) планетарна (застаріла) модель; б) сучасна модель

1.1. Основні типи хімічного зв'язку

Електрони можуть залишати атом, і тоді він стає *йоном*. Якщо атом *утратив* один або кілька електронів — він стає *позитивним йоном*. Якщо атом *приєднав* один або кілька електронів — він стає *негативним йоном*. Атоми можуть об'єднуватись у мільйони різновидів молекул.

Молекула — це найменша частинка речовини, яка є носієм основних її властивостей. Усі частинки хаотично й безперервно рухаються. Такий рух називають *тепловим*. Доказом безперервного хаотичного теплового руху є *дифузія* — процес взаємного проникнення молекул (атомів, йонів) однієї речовини в проміжки між молекулами (атомами, йонами) іншої речовини, унаслідок чого відбувається самовільне перемішування речовин.

1.1. Основні типи хімічного зв'язку

Сукупність сил, що діють між атомами, називають *хімічним зв'язком*. Унаслідок дії цих сил і утворюються молекули. Коли йдеться про хімічний зв'язок, то використовують термін «валентність» — ступінь здатності елемента до утворення хімічного зв'язку за рахунок так званих валентних електронів, які знаходяться на максимальній відстані від ядра й можуть вступати у взаємодію із сусідніми атомами. У різних речовин атоми містять різну кількість валентних електронів.

Якщо атом легко віддає валентні електрони — він має *металічні властивості*. Елементи, атоми яких приєднують електрони від інших атомів, мають *неметалічні властивості*. Тобто елементи належать до металів і неметалів, а їхні сполуки мають різні типи хімічного зв'язку.

Ковалентний зв'язок характеризується утворенням стійких електронних пар з електронів, які раніше належали до окремих атомів, що входять до складу молекули. Рухаючись, електрони найчастіше розташовуються між ядрами, де створюється «надлишок» негативного заряду, який сприяє зближенню атомів. Тому речовини, утворені молекулами з ковалентним зв'язком, надзвичайно тверді. Вони тугоплавкі й хімічно інертні, що пояснюється міцністю ковалентного зв'язку та його спрямованістю.

Якщо двоатомна молекула складається з атомів одного елемента (H_2 , N_2 , Cl_2), то електронна пара однаковою мірою належить до обох атомів. У такому разі молекулу та наявний у ній ковалентний зв'язок називають *неполярними (нейтральними)*. У неполярних молекулах центри позитивних і негативних зарядів збігаються.

Якщо ж двоатомна молекула складається з атомів різних елементів, то електронна пара може бути зміщена до одного з атомів. У таких випадках ковалентний зв'язок називають *полярним (дипольним)*. Центри позитивних і негативних зарядів у молекулах із полярним зв'язком не збігаються.

Донорно-акцепторний зв'язок є різновидом ковалентного зв'язку. Він виникає між атомами елементів, один з яких здатний віддати елек-

трони (*донор*), а інший — прийняти ці електрони (*акцептор*). Прикладом таких з'єднань можуть слугувати сполуки, утворені елементами III і V груп Періодичної системи елементів, наприклад галій арсенід (GaAs).

Йонний зв'язок зумовлений силами електростатичного тяжіння між позитивними та негативними йонами. Йонні сполуки утворюють елементи, що дуже відрізняються за властивостями, як-от: типові метали й типові неметали. До речовин з йонним зв'язком належать більшість солей і деякі оксиди металів: Cu_2O , ZnO , CdO , Fe_2O_3 , NiO тощо. Йонний зв'язок найхарактерніший для неорганічних діелектриків. Молекули речовин з йонним зв'язком полярні. Йонний зв'язок менш міцний, ніж ковалентний, тому йонні сполуки за механічною міцністю і хімічною стійкістю поступаються речовинам, утвореним за допомогою ковалентного зв'язку.

Металічний зв'язок — особливий тип зв'язку, властивий лише металам. У всіх вузлах кристалічної ґратки розташовані позитивні йони металу. Між ними хаотично, подібно до молекул газу, рухаються валентні електрони, що відщепилися від атомів при утворенні йонів. Ці електрони відіграють роль «смоли», що утримує разом позитивні йони; інакше б ґратка розпалася під дією сил відштовхування між йонами. Водночас і електрони утримуються йонами в межах кристалічної ґратки й не можуть її покинути.

Металічний зв'язок зумовлений колективізацією валентних електронів, що належать не двом, а практично всім атомам у кристалі. Атоми металів здатні віддавати зовнішні електрони, перетворюючись на позитивні йони, або знову їх приєднувати, перетворюючись на нейтральні атоми. Отже, метал можна розглядати як систему, побудовану з позитивних йонів, які перебувають у середовищі вільних колективізованих електронів. Тобто металічний зв'язок визначається водночас наявністю ковалентного зв'язку між нейтральними молекулами й електростатичним тяжінням між йонами та вільними електронами, що в підсумку забезпечує монолітність і міцність металів. Завдяки наявності вільних електронів метали мають високу електро- і теплопровідність, а відсутність спрямованості металічного зв'язку пояснює високу пластичність металів.

Молекулярний зв'язок спостерігають у деяких речовинах між молекулами з ковалентним характером усередині молекулярної взаємодії (між зарядами з протилежними знаками). Таке електростатичне тяжіння називають *силами Ван-дер-Ваальса*. Молекулярне тяжіння в такому разі можливе при погодженому русі валентних електронів у сусідніх молекулах. Тоді сили тяжіння валентних електронів з ядром сусідньої молекули стають сильнішими за сили взаємного відштовхування електронних оболонок цих молекул. Речовини з молекулярним характером зв'язку мають низькі температури плавлення (наприклад, температура плавлення парафіну $+51\text{ }^\circ\text{C}$). Це свідчить про те, що зв'язки Ван-дер-Ваальса є дуже слабкими.

Зазначені види хімічного зв'язку можна спостерігати не тільки в різних тілах, а й у різних зонах одного тіла. Можливе, наприклад, утворення ланцюжків або шарів атомів, пов'язаних ковалентними зв'язками, і з'єднання ланцюжків або шарів молекулярними зв'язками, причому міцність тих та інших зв'язків може бути дуже різною. Тому деякі тверді тіла легко діляться на волокна, пластинки тощо.

1.2. Різні агрегатні стани речовини

Залежно від умов навколишнього середовища (температура, тиск тощо) одна й та сама речовина може перебувати в різних станах: у твердому, рідкому або газоподібному. Ці стани речовини називають *агрегатними*. Наочний приклад — лід, вода та водяна пара.

Найсильніше взаємодія частинок речовини проявляється у *твердому стані*. Відстань між молекулами приблизно дорівнює їхнім власним розмірам. Це спричиняє досить сильну взаємодію, що практично позбавляє частинки можливості рухатися; вони коливаються поблизу певного положення рівноваги, зберігають форму й об'єм.

Частинки речовини в *рідинах* взаємодіють менш активно, ніж у твердих тілах, і тому можуть стрибками змінювати своє місце розташування: рідини не зберігають свою форму — вони текучі.

У *газоподібному стані* частинки речовини не пов'язані або дуже слабо пов'язані силами взаємодії і рухаються вільно в усіх напрямках незалежно одна від одної. Гази не мають власної форми, заповнюють увесь наданий їм об'єм і легко стискаються.

Існує ще один агрегатний стан речовини — *плазма*. Це частково або повністю йонізований газ, у якому щільність позитивних і негативних зарядів практично однакова. При досить сильному нагріванні (десять тисяч градусів) будь-яка речовина випаровується, перетворюючись на газ. Якщо збільшувати температуру, різко посилиться процес термічної йонізації, тобто молекули газу почнуть розпадатися на атоми, які потім перетворюються в йони — плазмовий агрегатний стан. Прикладом плазми є вогонь.

Рідкий кристал — це специфічний агрегатний стан речовини, у якому вона проявляє одночасно властивості кристала й рідини. Деякі органічні речовини, що мають складні молекули, можуть перебувати в такому агрегатному стані. Наявність у рідких кристалах дальнього порядку в орієнтації молекул викликає анізотропію електричних і магнітних властивостей, притаманну твердим кристалам. Однак, на відміну від твердих тіл, сили молекулярної взаємодії тут значно слабші. Рідкі кристали дуже чутливі до змін зовнішніх умов. Енергія деформації рідких кристалів мала, тому їхню молекулярну структуру легко змінити під дією електричного та магнітного поля невеликої потужності. Для зміни структури рідких кристалів достатньо також незначних температурних коливань або механічного впливу (тиску).

Особливо широко застосовують рідкі кристали для виготовлення дисплеїв цифрової індикації, плоских екранів моніторів, телевізорів, мобільних телефонів, для перетворення інфрачервоного (ІЧ) випромінювання на видиме, в ультразвуковій медичній діагностиці та рідкокристалічних медичних термометрах.

У твердих речовинах атоми та молекули можуть бути розташовані в геометрично правильному порядку або в хаотичному безладі. Відповідно речовини, що мають геометрично впорядковане розташування атомів або молекул, називають *кристалічними*, а речовини з хаотичним розташуванням атомів або молекул на близькій відстані — *аморфними*.

До кристалічних належать усі метали й сплави металів, до аморфних — скло, смоли, пластмаси, каучук, гуми, віск тощо. Кристалічні речовини мають характерні властивості, зумовлені внутрішньою будовою кристалів, що відрізняються впорядкованістю і значною відстанню між частинками. На зламі кристали мають плоскі грані й ступінчасту поверхню.

У межах усього тіла дальній порядок розміщення атомів зберігається тільки в *монокристалах*. У природі монокристали трапляються рідко, частіше йдеться про *полікристали*, що складаються з великої кількості маленьких кристалічних зернин (кристалітів), зрощених між собою та невпорядковано розташованих. Монокристали *анізотропні*, тобто мають неоднакові фізичні властивості речовини в різних напрямках (крім теплоємності й щільності). Полікристали, на відміну від монокристалів, *ізотропні*: властивості тіла (у цілому) не залежать від обраного напрямку. Необхідно зауважити, що реальні кристалічні речовини дуже часто містять постійні домішки, вкраплення й недосконалість, які спотворюють кристалічні ґратки, тому абсолютної однорідності в реальних кристалах часто не буває.

Якщо нагрівати кристалічне тіло, то його температура буде підвищуватися до певної межі; при подальшому нагріванні речовина почне плавитися, а її температура на якийсь час залишиться постійною — усе тепло піде на руйнування кристалічних ґраток. Температуру, за якої виникає фазовий процес перетворення твердої речовини на рідку, називають *температурою плавлення* $t_{\text{пл}}$ (рис. 1.2, а). *Кристалізацією* називають зворотний процес — перехід кристалічних речовин із рідкого стану у твердий. Температуру, за якої виникає фазовий процес перетворення рідкої речовини на кристалічну, називають *температурою кристалізації* $t_{\text{кр}}$.

Для опису структури кристалічних речовин користуються поняттям *просторові кристалічні ґратки*. Залежно від частинок, що утворюють тверде тіло, розрізняють ковалентні, йонні, металічні й молекулярні просторові кристалічні ґратки.

У вузлах *ковалентних ґраток* перебувають нейтральні атоми, сполучені один з одним ковалентним зв'язком. У вузлах *йонних ґраток* розташо-

1.3. Обґрунтування вибору електротехнічних матеріалів

вуються по чергово позитивні й негативні йони, сполучені йонним зв'язком. Багато йонних кристалів належать до класу діелектриків. У вузлах *металічних ґраток* розміщені позитивні йони, у проміжках між якими перебувають вільні електрони. Металічні ґратки утворюються за допомогою металічного зв'язку. Прикладами таких кристалів є метали та їхні сплави. У вузлах *молекулярних ґраток* знаходяться молекули. Такі ґратки утворюються за рахунок ковалентного та йонного зв'язків.

Аморфні речовини мають лише ближній порядок, стан аморфних речовин вважають нестійким. Речовини з аморфною будовою мають однакові властивості в різних напрямках молекулярних зв'язків, тобто вони ізотропні. При підвищенні температури такі тіла отримують «плинність» — властивість деформуватися під дією теплових впливів (рис. 1.2, б).

Під час нагрівання аморфні тіла, на відміну від кристалічних, не плавляться, а поступово розм'якшуються. Аморфні речовини не мають фіксованої температури плавлення. Завдяки цьому можна надати потрібної форми, наприклад, розжареному склу.

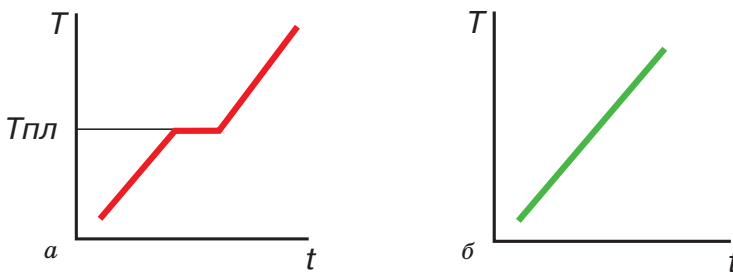


Рис. 1.2. Криві нагрівання: а) кристалічних тіл (крива нагрівання має ламаний характер — горизонтальна ділянка відповідає температурі плавлення); б) аморфних тіл

У багатьох випадках ті самі речовини можуть бути й кристалічними, й аморфними. Так, наприклад, з кристалічного цукру можна отримати цукровий розплав (аморфний стан). Якщо цукровому розплаву дати повільно застигнути, він знову набуде твердого кристалічного стану. Перехід речовини з одного агрегатного стану в інший широко використовують на практиці. У металургії, наприклад, плавлять метали, щоб отримати з них сплави: чавун, сталь тощо. Пар, отриманий із води під час її нагрівання, використовують на електростанціях у парових турбінах.

1.3. Обґрунтування вибору електротехнічних матеріалів

Матеріали, які використовують в електроніці та радіотехніці, поділяють на електротехнічні та конструкційні.

Електротехнічні матеріали мають певні властивості щодо електромагнітного поля. Їх використовують у техніці з урахуванням цих

Розділ 1. Загальні відомості про будову речовини

властивостей, тому що всі електротехнічні матеріали піддаються впливу як окремо електричного або магнітного поля, так і їхній сукупності. За основними властивостями електротехнічні матеріали розподіляють на чотири класи: *провідники, діелектрики, напівпровідники та магнітні*.

Конструкційні матеріали застосовують для виготовлення несучих та опорних конструкцій, а також допоміжних деталей і елементів електро- і радіоприладів, що працюють в умовах впливу механічних навантажень у процесі експлуатації. Як конструкційний матеріал має виконувати свої робочі функції і протистояти дії механічних факторів та умовам навколишнього середовища.

До основних властивостей електротехнічних матеріалів належать електричні, магнітні, оптичні, теплові, фізико-хімічні й механічні. Усі вони залежать як від внутрішніх, так і від зовнішніх факторів. *Внутрішні фактори* — склад і структура певного матеріалу, а *зовнішні фактори* — умови його експлуатації (температура, тиск, вологість, наявність електричного або магнітного поля тощо).

Властивості матеріалу також позначаються на точності виготовлення деталі, яка, у свою чергу, стане складовою цілого пристрою. За своїми технологічними характеристиками матеріал визначає способи оброблення деталі: різання, штампування, лиття, пресування. Правильний вибір матеріалу впливає на габарити й масу окремої деталі та виробу в цілому.

Щоб правильно вибрати матеріал, потрібно проаналізувати такі чинники, як функціональне призначення деталі, умови експлуатації, величина й періодичність навантаження на деталь тощо.

Якщо матеріал частково не відповідає тим чи тим вимогам, а замінити його немає змоги, то існує кілька способів управління властивостями матеріалів, наприклад зміна складу матеріалу шляхом додавання домішок, присадок, зміна структури (за допомогою термооброблення, опромінення тощо).

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Яку речовину називають *простою*, а яку — *складною*?
2. Що таке *йон*? Якими бувають йони за знаком заряду?
3. Які властивості характерні для ковалентного зв'язку?
4. Які властивості характерні для металічного зв'язку?
5. У яких агрегатних станах можуть знаходитися речовини?
6. Які фактори потрібно проаналізувати, щоб правильно вибрати необхідний електротехнічний або конструкційний матеріал?
7. *Виконайте тестове завдання.* Властивість хімічних елементів утворювати кілька простих речовин, які відрізняються кількістю атомів у молекулі, називають

А анізотропією

В алотропією

Б дифузією

Г змішваністю

2.1. Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали — це матеріали, які здатні добре проводити електричний струм і мають підвищену електропровідність ($\gamma > 10^5$ См/м).

За агрегатним станом провідникові матеріали класифікують на:

тверді: метали, сплави металів, електровугільні та вугільно-графітні вироби, металокерамічні вироби;

рідкі: електроліти (розчини кислот, солей та лугів у воді), розплави солей та лугів, розплавлені метали;

газоподібні: йонізовані пари металів та йонізовані гази (плазма).

За значенням питомого електричного опору металеві провідникові матеріали поділяють на дві групи:

матеріали високої провідності, у яких питомий опір: $\rho < 0,05 \times 10^{-6}$ Ом·м (срібло, золото, мідь, алюміній, їхні сплави тощо);

матеріали високого опору, у яких питомий опір: $\rho > 0,3 \times 10^{-6}$ Ом·м (вольфрам, молібден, манганін, константан, ніхром, фехраль тощо).

Окремою групою визначають **надпровідники** та **кріопровідники**.

Матеріали високої провідності використовують для виготовлення струмопровідних жил проводів і кабелів, обмоток трансформаторів, електричних машин та апаратів, шин розподільчих пристроїв, контактів, плавких вставок запобіжників тощо.

Матеріали з високим електричним опором застосовують для виготовлення елементів нагрівачів, дротяних резисторів і реостатів, точних вимірювальних приладів, термопар.

Надпровідники — це провідникові матеріали, які мають властивість переходити в надпровідниковий стан ($\rho \rightarrow 0$) при охолодженні до дуже низької (критичної) температури. За вказаних умов до надпровідників належать іридій ($-272,86$ °C), алюміній ($-271,8$ °C), олово ($-269,3$ °C), ртуть ($-268,8$ °C), свинець ($-265,8$ °C) та ін.

Одне з головних застосувань надпровідників пов'язане з отриманням дуже сильних магнітних полів напруженістю понад 10^7 А/м. Широко розробляють електричні машини з надпровідними обмотками збудження. Застосування надпровідників дає змогу вилучити з машин магнітопроводи з електротехнічної сталі, завдяки чому при збереженні потужності в 5–7 разів зменшуються маса та габаритні розміри машини. Є економічно обґрунтованим створення надпровідних трансформаторів, розрахованих на високий рівень потужності (десятки і сотні мегават).

За досить низьких температур (-173 °C і нижче) деякі матеріали можуть досягати дуже низького значення питомого опору, який у сотні

Розділ 2. Провідникові матеріали

та навіть тисячі разів менший, ніж за звичайних умов. Ідеться про *кріопровідники*. До них належать берилій, алюміній, мідь, срібло, золото та ін. Кріопровідники використовують для виготовлення струмопровідних жил проводів і кабелів, які працюють за температур від -173 до -252 °С.

Провідникові матеріали класифікують також за механізмом електропровідності: провідники першого та другого роду.

У металах механізм електропровідності обумовлений напрямленим рухом електронів під дією прикладеного електричного поля, тому їх прийнято називати провідниками з електронною (металевою) провідністю — *провідниками першого роду*.

Провідники другого роду — це розчини кислот, лугів і солей із йонною будовою молекул. Під час проходження струму через них електричні заряди переносяться разом із частинками молекул (йонами), при цьому змінюється їхній склад і на електродах виділяються продукти гідролізу.

Металургія — наука про промислові способи вилучення металів із природної сировини. Сучасна металургія отримує понад 75 металів і сплавів на їхній основі. Розрізняють чорну та кольорову металургію.

Чорна металургія — виробництво заліза, а також мангану та хрому, тобто металів, які використовують як домішки до заліза, а *кольорова* — виробництво всіх інших металів та їхніх сплавів (рис. 2.1).

Кольором називають здатність металів відображати світлове випромінювання з певною довжиною хвилі. Наприклад, мідь має рожево-червоний колір, алюміній — сріблясто-білий.

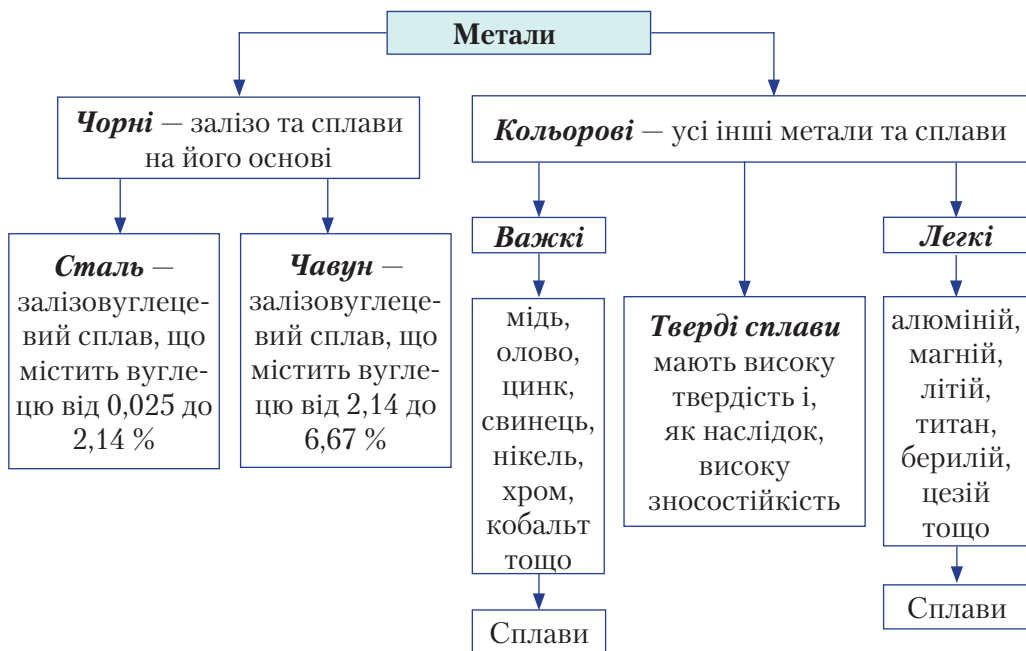


Рис. 2.1. Метали в чорній та кольоровій металургії

2.2. Властивості провідникових матеріалів

2.2.1. Фізико-хімічні властивості

Як провідникові тверді матеріали використовують метали, сплави металів і неметалеві матеріали (вугілля, графіт тощо).

Розглянемо *фізичні властивості металів*, подібність яких пояснюється особливістю будови їхніх кристалічних ґраток і металічним зв'язком. Для металів характерні три типи кристалічних ґраток: кубічна об'ємноцентрована, кубічна гранецентрована й гексагональна (рис. 2.2). Електрони, які заповнюють міжатомний простір у ґратках, відбивають світлові промені. Це викликає непрозорість і блиск металів, але лише в компактному стані. У дрібнодисперсному стані більшість із металів чорного кольору, не мають блиску. Алюміній і магній зберігають металевий блиск навіть у порошкоподібному стані.

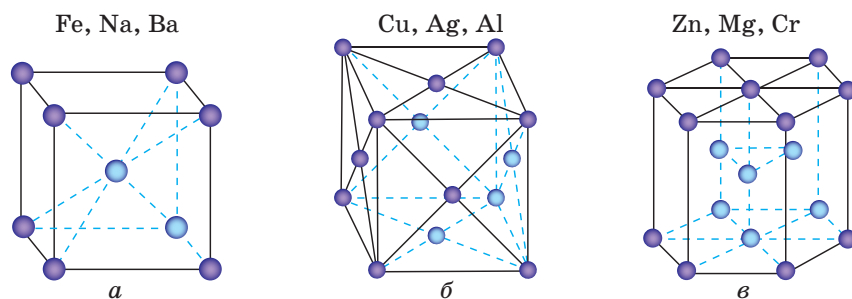


Рис. 2.2. Основні типи кристалічних ґраток металів: а) кубічна об'ємноцентрована; б) кубічна гранецентрована; в) гексагональна

Електрофізичні властивості металів виражені в їхній електропровідності. Вважають, що всі метали мають високу електропровідність, тобто добре проводять струм. Але це не так, до того ж усе залежить від температури, за якої вимірюють струм. Уявіть кристалічну ґратку металу, у якій струм передається за допомогою руху електронів. Електрони рухаються від одного вузла ґратки до іншого. Один електрон «виштовхує» з вузла ґратки інший електрон, який продовжує рухатися до іншого вузла ґратки. Тобто електропровідність залежить від того, як легко електрони можуть переміщатися між вузлами ґратки, а отже, електропровідність металу залежить від кристалічної будови ґратки та щільності розташування в ній частинок.

Частинки у вузлах ґратки зазнають коливань, і що більші ці коливання, то вища температура металу. Такі коливання значно перешкоджають переміщенню електронів у кристалічній ґратці. Отже, що нижча температура металу, то вища його здатність проводити струм.

З підвищенням температури електропровідність металів зменшується, а опір — збільшується.

Електропровідність — здатність металу проводити електричний струм. Найбільшу провідність мають метали, валентна зона яких запов-

нена не повністю, а саме з одним електроном на зовнішній орбіті. Для них потрібне мінімальне порушення (зовнішнє електричне поле), щоб відбулося переміщення електронів на більш високі підрівні, тобто виник електричний струм. Найвищу електропровідність мають такі метали, як срібло, мідь, золото, алюміній. І саме з нею пов'язане використання цих металів в електротехніці.

Електропровідністю також називають *питому електропровідність* γ — кількісну міру цієї здатності. Одиниця питомої електропровідності в Міжнародній системі одиниць (SI) — Сименс на метр (См/м).

Питомий електричний опір ρ — фізична величина, яка кількісно характеризує здатність атомів речовини створювати протидію проходженню електричного струму. Питомий опір використовують для характеристики провідників в умовах, коли виконується закон Ома. Одиниця питомого опору в системі SI — Ом на метр (Ом · м). Питомий електричний опір — величина, обернена до питомої електропровідності:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}.$$

Електричний опір R провідника визначають співвідношенням:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

де l — довжина провідника, м;

S — площа поперечного перерізу провідника, м²;

ρ — питомий опір певного матеріалу провідника, Ом · м.

Як ви вже знаєте, питомий опір металів залежить від температури. Ця залежність визначається *температурним коефіцієнтом питомого електричного опору* TK_{ρ} (1/°C). Та сама зміна температури викликає в різних металів різну зміну опору. Для складання таблиць питомого опору металів використовують $t_0 = +20$ °C.

Якщо потрібно розрахувати опір провідника за інших температур (від 0 до +200 °C), то необхідно враховувати температурний коефіцієнт питомого електричного опору TK_{ρ} :

$$TK_{\rho} = (1/\rho) \cdot (\Delta\rho/\Delta t),$$

де $\Delta\rho$ — приріст опору провідника, який відповідає приросту температури Δt , тобто коефіцієнт показує, на скільки зміниться кожний Ом електричного опору при зміні температури провідника на 1 °C.

Розрахувати опір провідника при збільшенні температури t_0 від +20 °C до конкретної температури t_1 в діапазоні до +200 °C можна за формулою:

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + TK_{\rho} \cdot (t_1 - t_0)],$$

де R_1 — опір провідника за зміненої температури t_1 , Ом;

R_0 — опір провідника за початкової температури t_0 , Ом;

TK_{ρ} — температурний коефіцієнт питомого опору металу, 1/°C.

Розглянемо інші фізико-хімічні властивості металів.

2.2. Властивості провідникових матеріалів

Щільність — кількість речовини в одиниці об'єму. За густиною всі метали поділяють на легкі та важкі. До *легких* належать метали, щільність яких менша від 6 г/см^3 : *лужні* — літій, натрій, калій, рубідій, цезій, *лужноземельні* — кальцій, стронцій, барій, а також магній, берилій, скандій, титан, алюміній, ітрій. Найлегшим металом є літій, щільність якого: $0,53 \text{ г/см}^3$, а найважчим — осмій, щільність якого: $22,7 \text{ г/см}^3$.

Плавлення — здатність металу переходити з кристалічного (твердо-го) стану в рідкий з поглинанням теплоти. За температурою плавлення розрізняють метали: *тугоплавкі* — вольфрам ($+3422^\circ\text{C}$), тантал ($+2950^\circ\text{C}$), титан ($+1725^\circ\text{C}$) та ін.; *легкоплавкі* — олово ($+232^\circ\text{C}$), свинець ($+327^\circ\text{C}$) та ін. (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Фізичні властивості деяких металів

Назва металу	Хімічний символ	Питомий електричний опір ρ , мкОм · м	Температурний коефіцієнт питомого опору $TK_p \times 10^{-3}, \text{K}^{-1}$	Температура плавлення $t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Температурний коефіцієнт лінійного розширення $TK_\alpha \times 10^6, \text{K}^{-1}$
Срібло	Ag	0,015	4,1	961	18,6
Мідь	Cu	0,017	4,3	1083	16,6
Золото	Au	0,023	3,9	1063	14,0
Алюміній	Al	0,026	4,1	660	21,0
Натрій	Na	0,042	5,5	98	72,0
Молібден	Mo	0,050	4,3	2623	5,3
Вольфрам	W	0,055	5,0	3422	4,4
Цинк	Zn	0,059	4,1	419	30,0
Кобальт	Co	0,064	6,0	1500	13,5
Калій	K	0,065	5,8	63	83,3
Нікель	Ni	0,068	6,7	1453	13,2
Кадмій	Cd	0,074	4,2	321	29,0
Літій	Li	0,086	4,5	180	56,0
Залізо	Fe	0,097	6,2	1540	10,7
Платина	Pt	0,098	3,9	1770	9,5
Олово	Sn	0,113	4,5	232	23,0
Хром	Cr	0,130	2,4	1900	6,2
Галій	Ga	0,136	3,9	30	18,1
Ніобій	Nb	0,150	3,9	2477	7,2
Свинець	Pb	0,190	4,2	327	28,3
Титан	Ti	0,470	5,5	1670	8,1
Барій	Ba	0,500	3,6	710	19,0
Ртуть	Hg	0,958	0,9	-38,87	182,0

Температура плавлення має велике значення при виборі металів для виконання паяних з'єднань, виготовлення термоелектричних приладів та інших виробів.

Ртуть — єдиний метал, який за нормальних умов перебуває в рідкому агрегатному стані. Температура плавлення ртуті — $-38,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто у твердому стані вона може існувати в місцях, де дуже холодно. За кімнатної температури ($+18\text{ }^{\circ}\text{C}$) ртуть починає випаровуватися.

Вважають, що найнижчу температуру плавлення має метал *гелій*: за нормального тиску він залишається рідким за будь-яких низьких температур.

Теплопровідність — здатність металу з тією чи іншою швидкістю проводити теплоту під час нагрівання. Метали мають велику кількість вільних електронів, а отже, їхня теплопровідність обумовлена електронною провідністю. У процесі свого переміщення всередині кристалічної ґратки металу вільні електрони переносять теплову енергію від нагрітих шарів до холодних із дуже високою швидкістю. Тому серед металів найкращі електричні провідники мають також найкращу теплопровідність.

Теплове розширення — здатність металу збільшувати свій об'єм при нагріванні. Відомо, що всі метали при нагріванні розширюються, а при охолодженні стискаються. Ступінь збільшення або зменшення початкового лінійного розміру деталі при зміні температури на один градус характеризується *коефіцієнтом лінійного розширення*. При спостереженні за зміною об'єму деталі використовують *коефіцієнт об'ємного розширення*.

Різницю коефіцієнтів теплового розширення металів використовують у виготовленні пластин із біметалу, які застосовують у складі різних систем терморегулювання, а також у термореле багатьох модифікацій. Елемент, що має властивість деформуватися (згинатися) в одному напрямку під впливом підвищеної температури, отримав назву *біметалева пластина*. У складі пластини є два метали. Кожний із них має свою величину коефіцієнта теплового розширення. При нагріванні такої пластини один її компонент розширюється на певну величину, а другий — на іншу. Це призводить до вигину, форма якого залежить від різниці теплових коефіцієнтів (рис. 2.3).

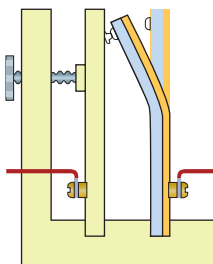


Рис. 2.3. Біметалева пластина: вигинання при нагріванні

При охолодженні пластина знову набуває вихідного положення. Вона є монолітним з'єднанням і може працювати довго. Щоб з'єднати метали в єдиний біметал, застосовують паяння, зварювання і заклепки. Прикладом поширеної біметалевої пластини є з'єднання латуні та сталі. Такий композит має високу термочутливість.

Значна хімічна активність металів є причиною того, що в земній корі вони трапляються переважно як сполуки оксидів, сульфідів, сульфатів, хло-

2.2. Властивості провідникових матеріалів

ридів, карбонатів тощо. Тільки деякі метали, як-от: золото, платина, іноді срібло та мідь, ртуть, існують у вільному стані.

Хімічні властивості металів. Метали здатні реагувати з неметалами, водою, киснем повітря, розчинами кислот, лугів тощо. Але вони здатні також чинити опір цим діям. Під час хімічних реакцій відбувається перетворення металів на інші речовини з іншими властивостями. Багато металів зазнають хімічних змін під впливом навколишнього середовища, тобто руйнуються від корозії. Результати корозії металів можна спостерігати у вигляді іржі на сталі та чавуні, зеленого нальоту на міді, білого нальоту на алюмінії та його сплавах.

За нормальних умов або при нагріванні метали реагують із киснем з утворенням оксидів. При цьому метали утворюють плівку, тобто проявляють окисненість. Наприклад, алюміній: за звичайних умов він легко взаємодіє з киснем повітря і вкривається тонкою (2×10^{-4} мм), але міцною оксидною плівкою Al_2O_3 , яка надає йому матового вигляду й сіруватого кольору та захищає від подальшого окиснення, обумовлюючи цим високу корозійну стійкість алюмінію.

Метал або сплав вважають **корозієстійким**, якщо він добре опирається впливу зовнішнього агресивного середовища. Той самий метал або сплав неоднаково опирається корозії в різних середовищах. Наприклад, алюміній стійкий в атмосфері та прісній воді й нестійкий у розчинах лугів, деяких кислот і в морській воді.

Залежно від корозійної стійкості в тому чи тому середовищі метали й сплави поділяють на кілька груп:

- **корозієстійкі (нержавіючі) металеві матеріали**; стійкі до корозії в атмосфері, ґрунті, морській і прісній воді та в інших середовищах;
- **жаротривкі (окалиностійкі) металеві матеріали**; стійкі до корозії в газових середовищах за температур понад $+550$ °С і працюють у ненавантаженому або слабо навантаженому стані, здатні протистояти утворенню окалини за підвищених температур;
- **жароміцні металеві матеріали**; працюють у навантаженому стані за високих температур протягом певного часу й мають при цьому достатню жаротривкість;
- **кислотостійкі металеві матеріали**; стійкі проти корозії в агресивних кислотних середовищах (у кислотах та їхніх сумішах різної концентрації).

Хімічні властивості металевих матеріалів обов'язково враховують під час виготовлення виробів або деталей, особливо тих, які працюють у хімічно агресивних середовищах. Високу корозійну стійкість в атмосфері й агресивних середовищах мають нікель, титан та їхні сплави (наближені до дорогоцінних металів).

За комплексом фізико-хімічних властивостей матеріалів визначають їхні технологічні властивості:

ковкість — здатність металу змінювати свою форму в нагрітому або холодному стані під дією зовнішніх сил;

зварюваність — здатність двох частин металу міцно з'єднуватися одна з одною під час нагрівання;

рідкоплинність — здатність розплавленого металу легко розтікатися й добре заповнювати форму;

механічне оброблення тиском або **різанням** — здатність матеріалу піддаватися механічному обробленню;

усадка — небажане зменшення лінійних розмірів та об'єму матеріалів унаслідок втрати ними вологи, ущільнення, твердіння чи інших фізико-хімічних процесів. Спостерігають у металах (сплавах), керамічних матеріалах, бетонах тощо.

2.2.2. Механічні властивості

Механічні властивості матеріалів пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та механічні напруження. До механічних властивостей належать міцність, пружність, пластичність, в'язкість, твердість тощо.

Міцність — це властивість матеріалів, не руйнуючись, чинити опір дії прикладених зовнішніх сил. Міцність матеріалів характеризується умовною величиною — *межею міцності*. Це механічне напруження σ_B , після перевищення якого відбувається руйнування матеріалу:

$$\sigma_B = F/S_0,$$

де F — числове значення найбільшого навантаження, Н;

S_0 — вихідна площа поперечного перерізу зразка, м².

Залежно від швидкості прикладання навантаження розрізняють *статичні* й *динамічні випробування матеріалів* (рис. 2.4). Під час статичного випробування навантаження додається повільно й зростає поступово; при динамічних випробуваннях — з високою швидкістю.

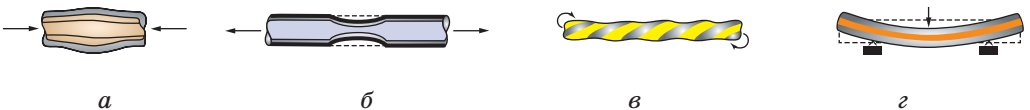


Рис. 2.4. Прикладання навантаження при статичному випробуванні: а) при стисненні; б) при розтягуванні; в) при крученні; г) при вигинанні

Пружність — здатність матеріалів змінювати свою форму під дією зовнішніх сил і відновлювати її після припинення дії цих сил. Відношення навантаження, при якому зразок починає набувати залишкових подовжень, до площини його поперечного перерізу називають *межею пружності*. Наприклад, межа пружності сталі — до 300, міді — 25, свинцю — 2,5 МПа.

Пластичність — здатність матеріалів, не руйнуючись, змінювати свою форму під дією зовнішніх сил і зберігати нову форму після припи-

нення дії сил. Пластичність металів (здатність прокатуватися в тонкі листи, витягуватися в дріт) зменшується в такому ряду: золото, срібло, мідь, свинець, цинк, залізо. Сталь значною мірою пластична, і при нагріванні її пластичність зростає. Цю властивість використовують при отриманні виробів шляхом прокатування та кування. Пластичність матеріалів оцінюють за відносним видовженням і звуженням, які вимірюють у відсотках (%).

Відносне видовження G визначають за формулою:

$$G = \frac{(l_1 - l_0) \cdot 100\%}{l_0},$$

де l_0 — довжина зразка до розриву;

l_1 — довжина зразка після розриву.

Відносне звуження X визначають за формулою:

$$X = \frac{(S_0 - S_1) \cdot 100\%}{S_0},$$

де S_0 — початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка;

S_1 — площа поперечного перерізу після розриву.

Крихкість — властивість матеріалу руйнуватися відразу після дії прикладених до нього сил, не показуючи жодних ознак деформації (наприклад, скло).

В'язкість — здатність матеріалу поглинати механічну енергію і при цьому проявляти значну пластичність. Тверді матеріали з високою в'язкістю швидко гасять вібрації, які є причиною передчасного руйнування конструкцій. Наприклад, чавун має високу в'язкість. Для виготовлення станин верстатів і корпусних деталей чавун цінніший від вуглецевої сталі.

Ударна в'язкість — здатність матеріалу чинити опір ударним навантаженням, які швидко зростають. Це робота, витрачена на ударний злам зразка. За цією характеристикою оцінюють опір матеріалу проти крихкого руйнування.

Втома — зміна механічних і фізичних властивостей матеріалів під дією сил, які циклічно змінюються під час напружень і деформацій. В умовах дії таких навантажень у деталях під час роботи утворюються й розвиваються тріщини, які призводять до повного їхнього руйнування.

Твердість — здатність матеріалу чинити опір вдавненню в нього іншого, більш твердого матеріалу. За ступенем твердості всі метали значно різняться. Наприклад, калій та натрій — м'які метали, їх навіть можна різати ножом, а хром за твердістю близький до алмазу. Чавун і сталь мають високу твердість, свинець — низьку.

Для перевірки твердості матеріалів існує три методи випробування, названі за іменами їхніх винахідників, — Брінелля, Роквелла, Віккерса (рис. 2.5, с. 20).

Випробування **за методом Брінелля** проводять шляхом вдавлювання в матеріал сталевий загартований кульки протягом певного часу.

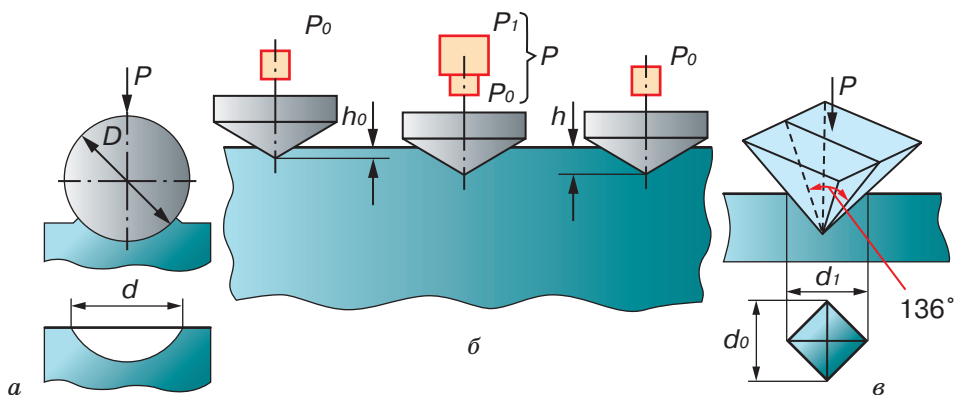


Рис. 2.5. Схеми методів визначення твердості:
а) за Брінеллем; б) за Роквеллом; в) за Віккерсом

У результаті на поверхні матеріалу (попередньо зачищеного напилком) утворюється сферичний відбиток. Що твердіший матеріал, то менша площа відбитка. Діаметр кульки D і навантаження P установлюють залежно від матеріалу, який досліджують, його твердості й товщини (рис. 2.5, а). Наприклад, при випробуванні сталі й чавуну вибирають $D = 10$ мм і $P = 30$ кН, міді та її сплавів — $D = 10$ мм і $P = 10$ кН. При випробуванні зразків товщиною менше 6 мм вибирають кульки з меншим діаметром: 5 і 2,5 мм. На практиці користуються таблицею переведення площі відбитка кульки в число твердості. Твердість за Брінеллем позначають **HB** і визначають за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

де P — числове значення навантаження на метал, Н;

D — діаметр кульки, мм;

d — діаметр відбитка кульки, мм.

Випробування *за методом Роквелла* здійснюють шляхом вдавлювання в матеріал алмазного конуса з кутом при вершині 120° або сталеві кульки $D = 1,59$ мм під певним навантаженням (рис. 2.5, б). Прилад Роквелла має три шкали — *B*, *C* і *A*. Алмазний конус застосовують для випробування твердих матеріалів (шкали *C* і *A*); сталеву кульку застосовують для випробування м'яких матеріалів (шкала *B*). Залежно від обраної шкали твердість за Роквеллом позначають **HRB**, **HRC**, **HRA**. Вимірюють в умовних одиницях. За одиницю твердості приймають величину, що відповідає осьовому переміщенню наконечника конуса на відстань 0,002 мм. Твердість за Роквеллом обчислюють у такий спосіб:

- для шкали *A* і *C*: $HR = 100 - e$;
- для шкали *B*: $HR = 130 - e$.

Величину e визначають за формулою:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002},$$

де h — глибина проникнення в метал наконечника під дією загального навантаження P ($P = P_0 + P_1$);

h_0 — глибина проникнення наконечника під дією попереднього навантаження P_0 .

Випробування *за методом Віккерса* здійснюють шляхом вдавлювання в поверхню (шліфовану чи навіть поліровану), що підлягає випробуванню, чотиригранної алмазної пірамідки з кутом при вершині 136° під навантаженням від 10 до 500 Н (рис. 2.5, в). Метод використовують для визначення твердості деталей малої товщини й тонких поверхневих шарів, які мають високу твердість. Число твердості за методом Віккерса позначають HV і визначають за спеціальними таблицями по діагоналі відбитка d . Що більша діагональ, то менша твердість матеріалу.

2.3. Матеріали високої електричної провідності

До цієї групи належать провідникові матеріали з питомим електричним опором: $\rho < 0,05$ мкОм · м. Метали високої провідності в промисловості використовують для виготовлення жил обмотувальних, монтажних, наставних проводів, жил силових кабелів і кабелів зв'язку, проводів ліній електропередачі (ЛЕП), контактів. Їх застосовують у надвисоко-частотних хвилеводах, для виготовлення електромагнітних екранів тощо. Тому основні вимоги до параметрів матеріалів високої електричної провідності такі:

- малий питомий опір — для зменшення втрат;
- стійкість до корозії — для експлуатації матеріалів при різних зовнішніх впливах;
- низька питома вага — для полегшення ваги пристроїв;
- технологічність — властивість легко піддаватись обробленню прокатуванням і волочінням;
- висока механічна міцність (при розтягуванні), гнучкість, низька крихкість;
- відносна легкість паяння або зварювання — для зменшення перешкоди опору в місцях контактів.

Найбільш поширені сучасні матеріали високої провідності, які застосовують в електротехніці й радіоелектроніці, — срібло, золото, мідь, алюміній. Останні два метали через нижчу ціну досить широко використовують, так само і сплави цих металів, оскільки вони мають кращі властивості й дешевші порівняно із чистими металами.

2.3.1. Мідь та її сплави

Мідь (Cu) — в'язкий метал рожево-червоного кольору. Переваги міді, що забезпечують її широке застосування як провідникового матеріалу:

Розділ 2. Провідникові матеріали

- найменший, після срібла, питомий опір: $\rho = 0,017$ мкОм·м;
- досить висока механічна міцність;
- задовільна стійкість до корозії (інтенсивне окиснення відбувається тільки за підвищених температур);
- висока технологічність в обробленні (з міді прокатують листи, стрічки, фольгу й протягують дроти перерізом в частку міліметра);
- відносна легкість паяння та зварювання.

Мідь отримують шляхом перероблення сульфідних руд. Електротехнічна мідь обов'язково проходить електролітичне очищення. Наявність домішок негативно позначається не лише на механічних і технологічних властивостях міді, а й значно знижує її електропровідність.

Найменший питомий електричний опір має хімічно чиста мідь. Найбільш небажаними домішками є вісмут і свинець, які майже нерозчинні в міді. Це призводить до того, що мідь під час оброблення тиском за температури $+850-1150$ °С розтріскується, зменшується її пластичність, а за низьких температур стає крихкою. Дуже шкідлива присутність у складі міді кисню, що викликає підвищення питомого опору.

Як провідниковий матеріал використовують мідь марок М1 і М0. Мідь марки М1 містить 99,9 % міді, 0,1 % домішок, у яких кисень не має перевищувати 0,08 %. Мідь марки М0 містить 99,95 % міді, 0,05 % домішок, у яких кисень не має перевищувати 0,02 %. Мідь марки МВ — ще чистіший провідниковий метал, який виплавляють у вакуумних індукційних печах. У міді марки МВ не більше 0,01 % домішок.



Рис. 2.6. Мідний дріт

Шляхом холодного протягування отримують тверду (твердотягнену) мідь МТ, яка має високу межу міцності при розтягуванні, твердість і пружність при вигинанні. Дріт із твердої міді здатний пружинити. Тверду мідь застосовують для виготовлення колекторних пластин електромашин, для хвилеводів, шин розподільних пристроїв, жил кабелів, контактних дротів тощо (рис. 2.6).

При випалюванні міді (нагріванні до кількох сотень градусів із наступним охолодженням) отримують м'яку (відпалену) мідь ММ, яка характеризується пластичністю, малими твердістю та міцністю, вищою питомою електропровідністю. З м'якої міді виготовляють фольгу, жили гнучких обмоткових проводів (у яких важливі гнучкість і пластичність, а міцність і пружність не мають великого значення).

Однак механічні й хімічні властивості чистої міді в деяких випадках не задовольняють вимог до виробів із неї. Тоді використовують сплави міді з невеликим вмістом легувальних домішок. При правильному виборі складу сплави міді мають значно кращі механічні властивості, ніж чиста мідь, хоча й поступаються їй в електропровідності.

2.3. Матеріали високої електричної провідності

Бронза — це сплав, основою якого є мідь. Головні легувальні домішки: олово, кремній, фосфор, берилій, свинець, кадмій, алюміній та ін. (крім цинку). Відповідно бронзу називають *олов'яною, алюмінієвою, берилієвою, кремнієвою, кадмієвою* тощо.

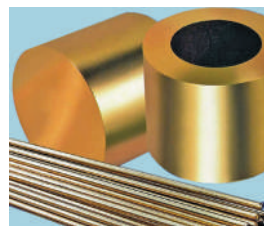


Рис. 2.7. Вироби з бронзи

Бронза поступається міді в електропровідності, але переважає за міцністю, пружністю, корозійною стійкістю. За технологічними ознаками бронзи ділять на ливарні та ті, що деформуються. Перші використовують для лиття фасонних (складної форми) деталей, другі добре обробляти тиском (прокатування, штампування) (рис. 2.7). Маркують бронзи літерами Бр. Далі в маркуванні йдуть легувальні елементи, які позначають початковою літерою назви цього елемента; за літерами вказують вміст легувальних елементів у відсотках.

Олов'яна бронза $BrO4Ц4С2,5$ (олова 4 %, цинку 4 %, свинцю 2,5 %, решта 89,5 % — мідь) має високу пластичність і пружність. З неї виготовляють прутки, трубки, стрічки. Але олово — відносно дорогий метал, тому його прагнуть частково або повністю замінити в складі бронзи іншими складовими.

Замінником дорогої олов'яної бронзи є **алюмінієва**. Вона має дещо вищі механічні й технологічні властивості. Однофазна бронза **$BrA5$, $BrA7$** (відповідно: алюмінію 5 % і 7 %, решта — мідь) високопластична й одночасно надзвичайно міцна. Алюмінієва бронза добре протистоїть корозії в морській воді й тропічній атмосфері. З неї виготовляють електричні контакти та хімічно стійкі деталі приладів.

Кремнієву бронзу $BrK3Mц1$ отримують при легуванні міді кремнієм (до 3,5 %), що підвищує міцність і пластичність сплаву. А манган (до 1 %) поліпшує механічні й корозійні властивості. Кремнієву бронзу легко обробляти тиском, різанням і зварювати. Завдяки високим механічним властивостям, пружності й корозійній стійкості її застосовують для виготовлення пружин і пружних деталей приладів і радіоустаткування, що працюють за температури до +250 °С, а також в агресивних середовищах (як у прісній, так і в морській воді).

Кадмієву бронзу $BrKд1$ (кадмію 1 %, решта — мідь) використовують для виготовлення колекторних пластин, контактних проводів, електродів для контактного зварювання. Додавання до міді кадмію значно підвищує її міцність і твердість при незначному зменшенні питомої провідності.

Берилієва бронза $BrB2$ (берилію 2 %, решта — мідь) вирізняється високою твердістю, міцністю, пружністю і зносостійкістю, добре протистоїть корозії, її зварюють та обробляють різанням. Застосовують для виготовлення струмопровідних пружин, щіткотримачів, пружних, штепсельних і ковзних контактів.

Свинцева бронза $BrС30$ (свинцю 30 %, решта — мідь) має високі антифрикційні властивості (достатня твердість, добра пластичність,

здатність утримувати змащувальний матеріал на своїй поверхні). Це зумовлює її широке застосування у виготовленні підшипників ковзання, що працюють із великими швидкостями та при підвищеному тиску. Порівняно з олов'яною підшипниковою бронзою, теплопровідність бронзи БрС30 учетверо більша, тому вона добре відводить теплоту, що виникає під час тертя.

Фосфориста бронза БрО6,5Ф0,15 (олова 6,5 %, фосфору 0,15 %, решта — мідь) вирізняється низькою електропровідністю, тому з неї виготовляють невідповідальні струмопровідні пружини.

Латунь — це сплав міді із цинком. Цинк підвищує міцність і пластичність сплаву, але до певних меж. Найбільшу пластичність має латунь, що містить 30 % цинку, а найбільшу міцність має латунь, що містить 40 % цинку. Крім того, цинк здешевлює сплав, оскільки він дешевший за мідь.

За хімічним складом латунь ділять на *просту* (подвійну), де є тільки мідь і цинк, і *складну* (*багатокомпонентну*), де для поліпшення різних властивостей додають інші елементи. Найбільш поширені домішки — алюміній, олово, кремній, нікель тощо.

Латунь характеризується високою електро- та теплопровідністю, корозійною стійкістю, добре обробляється різанням, має досить високе відносне подовження при розтягуванні. Порівняно з мідними, деталі з латуні краще штампуються і витягуються. Латунь застосовують для виготовлення різних струмопровідних деталей, трубок, гільз, дроту, листів, стрічок. За технологічною ознакою латунь, як і бронзу, ділять на ту, що деформується, та ливарну. Латунь маркують літерою Л.

У латуні, що деформується, зазначають вміст міді й легувальних елементів, які позначають відповідними літерами (О — олово, А — алюміній, К — кремній, Н — нікель, Мц — манган, Ж — залізо та ін.). Вміст елементів подають у відсотках після літерних позначень. Наприклад: латунь **Л63** містить міді 63 %, решта 37 % — цинк; латунь **ЛАЖ 60-1-1** містить міді 60 %, алюмінію 1 %, заліза 1 %, решта 38 % — цинк.

У марках ливарної латуні зазначають вміст цинку, а кількість легувальних елементів ставлять після літер, що їх позначають. Наприклад, ливарна латунь **ЛЦ40Мц3А** містить цинку 40 %, мангану 3 %, алюмінію менше 1 %; решта 56 % — мідь.



Рис. 2.8. Вироби з нейзильберу

Нейзильбер — це сплав міді й різних металів, більш відомий як мельхіор, у якому Cu — основа, Ni+Co — у межах 13,5–16,5 %, Zn — 18–22 %, а також незначний відсоток Mn, Fe, С, Pb, S. Сплав відрізняється корозійною стійкістю, доступністю для будь-якого виду механічного оброблення, пружністю після деформації. Застосовують як конструкційний матеріал і для виготовлення деталей вимірвальних електроприладів (рис. 2.8).

2.3.2. Алюміній та його сплави

Алюміній (Al) — другий за значенням (після міді) провідниковий матеріал. Належить до так званих легких металів (приблизно в 3,5 рази легший за мідь). Це м'який, білий і блискучий метал. Алюміній активно окиснюється на повітрі, покривається тонкою оксидною плівкою, яка захищає матеріал від подальшої корозії. Ця ж плівка значно ускладнює паяння алюмінієвих провідників звичайними методами — доводиться використовувати спеціальні флюси, припої та ультразвукові паяльники.



Рис. 2.9. Вироби з алюмінію

Алюміній пластичний, його легко кувати, прокатувати в тонкі листи (завтовшки до 0,01 мм) і фольгу (до 5–7 мкм). Питомий опір алюмінію: $\rho = 0,026$ мкОм·м, що приблизно в 1,63 рази більше від питомого опору міді: $\rho = 0,017$ мкОм·м. Дуже важливо й те, що алюміній менш дефіцитний, ніж мідь.

У радіоелектроніці застосовують алюміній найвищої чистоти марок А999 та А995 (домішки не більше 0,01 %) під час виготовлення фольги для конденсаторів, отримання тонких плівок у мікроелектроніці, виготовлення напівпровідників. Менш чистий алюміній (домішки до 0,03 %) марок А95, А97, А99 застосовують для виготовлення захисних кабельних оболонок, корпусів приладів, екранів тощо (рис. 2.9). Як провідниковий матеріал використовують алюміній марок А0, А5, А6, А7, А8, А85, що містить не більше 0,5 % домішок.

У місці з'єднання алюмінію та міді може з'являтися гальванічна корозія. У разі зіткнення місця контакту з вологою виникає місцева гальванічна пара з доволі високим значенням електрорушійної сили (ЕРС). Тому місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими мають бути якісно захищені від вологи лаковим покриттям.

Наявність домішок зменшує питому електропровідність алюмінію, але підвищує його механічну міцність. На відміну від алюмінію, його сплави характеризуються високою міцністю, що наближається до високоміцної сталі. Їх застосовують як конструкційні матеріали. Інші переваги всіх сплавів алюмінію — це їхня мала щільність, задовільна стійкість проти атмосферної корозії, відносна дешевизна та простота в отриманні й обробленні. Основними легувальними елементами сплавів є Cu, Mg, Cr, Mn, які додають до алюмінію для підвищення його міцності.

Дюралюмін — сплав алюмінію з міддю, додатково легований магнієм або манганом (сплави на зразок Al–Cu–Mg, Al–Cu–Mn). Назва походить від німецького міста Дюрен, де в 1909 р. було розпочато його промислове



Рис. 2.10. Застосування дюралюміну в авіабудуванні

виробництво. Промислові сплави дюралюмінію в позначенні містять літеру Д та цифри, що вказують на відсоток домішок. Наприклад, *Д1* — класичний дюралюмін, який має міді 3,5–4,5 %, мангану 0,4–1,0 %, магнію 0,4–0,8 %; *Д16* — дюралюмін підвищеної міцності з більшим (1,2–1,8 %) вмістом магнію; *Д18* — дюралюмін підвищеної пластичності (зі зниженим вмістом легувальних елементів).

Дюралюмін добре обробляють різанням, має високі ливарні властивості, високу питому міцність, стійкий до корозії, тому його широко застосовують у ракетній техніці, в авіа-, авто-, судно- й приладобудуванні (рис. 2.10, с. 25).



Рис. 2.11. Виріб із силуміну



Рис. 2.12. Застосування магналію



Рис. 2.13. Вироби з альдрею

Силумін — сплав алюмінію, міді, магнію і мангану. Маркують силуміни так: *АЛ2, АЛ4, АЛ9*, де цифра — порядковий номер сплаву. Силумін поєднує високі ливарні та механічні властивості, має малу питому вагу. Типовий силуміновий сплав *АЛ2* піддається загартуванню. Силуміни добре зварюються, мають високі пластичні властивості й корозійну стійкість, але невисоку міцність. Сплави цієї групи застосовують як листовий матеріал для виготовлення складних за формою виробів, використовуючи при цьому холодне й гаряче штампування і прокатування (рис. 2.11).

Магналій — сплав алюмінію з магнієм 9,5–11,5 %. Сплав характеризується поєднанням достатньої міцності, високої пластичності, корозійної стійкості та зварюваності, є стійким до вібрацій. Застосовують для зварних конструкцій і виготовлення стрілок різних електро- та радіотехнічних вимірювальних приладів (рис. 2.12). Сплави маркують так: *АМг0,5* (0,4–0,8 % магнію), *АМг2* (1,7–2,4 % магнію), *АМг5* (4,8–5,8 % магнію), *АМг6* (5,8–6,8 % магнію) — зі збільшенням порядкового номера зростає міцність сплаву.

Альдрей — сплав алюмінію з 0,3–0,5 % магнію, 0,4–0,7 % кремнію, 0,2–0,3 % заліза. Він легший за алюміній і близький до нього за питомим електричним опором.

У сплаві утворюється сполука Mg_2Si , яка забезпечує високі механічні властивості альдрею. Застосовують для виготовлення малонавантажених повітряних ЛЕП (сплав із домішками Mg, Si, Fe) (рис. 2.13). Зберігаючи легкість алюмінію і не дуже відрізняючись від нього провідністю, за механічною міцністю альдрей подібний до твердої міді.

Деякі властивості різних марок міді й алюмінію

Властивості	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтягуванні, Н/м ²	$(3,6-3,9) \times 10^8$	$(2,6-2,8) \times 10^8$	$(1,6-1,7) \times 10^8$	8×10^7
Відносне подовження при розриві, %	0,5–2,5	18–25	1,5–2,0	10–18
Питомий опір, мкОм·м	0,0182	0,0175	0,0295	0,0286

2.4. Матеріали високого питомого опору

Матеріали з високим опором: $\rho = 0,4-0,5$ мкОм·м — це метали (вольфрам, молібден, тантал, ніобій, реній, хром тощо) і металеві сплави (манганін, константант, ніхром, нікелін, фехраль, хромаль тощо).

Вони мають високу механічну міцність і пластичність, що дає змогу виробляти з них дроти та стрічки необхідного перерізу для дротяних резисторів і реостатів, термопар. Також їх застосовують при виготовленні електровимірювальних приладів та електронагрівальних пристроїв, які мають тривалий час працювати на повітрі за високих температур. Бажано, щоб матеріали високого питомого опору були також технологічні, дешеві, не містили дефіцитних компонентів.

2.4.1. Тугоплавкі метали

Розглянемо властивості та застосування деяких металів із великим питомим опором, які ще називають *тугоплавкими*, тобто вони мають дуже високу температуру плавлення (понад $+1700$ °С) і стійкість до зношування.

Вольфрам (W) — дуже важкий, твердий метал сірого кольору. З усіх металів має найвищу температуру плавлення — $+3422$ °С. У природі трапляється як сполука. Волокниста структура обумовлює гнучкість вольфрамових ниток. Межа міцності при розтягуванні для тонких ниток — $3000-4000$ МПа, а відносне подовження при розриві — 4 %.

Вольфрам з 1890 р. використовують для виготовлення ниток ламп розжарювання (рис. 2.14). З нього виробляють елементи електровакуумної техніки: електроди, підігрівачі, пружини та гачки в електронних лампах, рентгенівських трубках тощо. Він має найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед усіх чистих металів. Цю властивість використовують при виготовленні термічно узгоджених з'єднань вольфраму з тугоплавким склом, яке теж має низький температурний коефіцієнт лінійного розширення.



Рис. 2.14. Вольфрам у лампах розжарювання

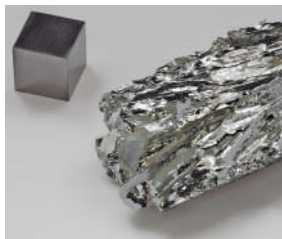


Рис. 2.15. Молибден

починаючи з температури $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому молибденові деталі, які нагрівають, мають працювати у вакуумі або відновлювальному середовищі. Серед тугоплавких металів молибден має найменший питомий опір. Висока міцність і пластичність роблять його одним із найкращих провідникових матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють за високих температур. З молибдену виготовляють сітки й електроди електронних ламп, рентгенівських трубок і допоміжні деталі електровакуумних приладів із напруженим тепловим режимом.



Рис. 2.16. Тантал

діапазоні температур від $+600$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також тугоплавкості, пластичності й формостійкості він є одним із найважливіших матеріалів для електровакуумної техніки. Та через природну дефіцитність і високу вартість тантал використовують переважно для виробів, що працюють у напруженому тепловому режимі, як-от: аноди та сітки генераторних ламп, катоди прямого й непрямого розжарювання та інші деталі електровакуумних приладів. На основі танталу виготовляють і широко застосовують електролітичні й тонкоплівкові конденсатори з великою питомою ємністю та тонкоплівкові резистори.



Рис. 2.17. Ніобій

Молибден (Mo) — метал (рис. 2.15), за зовнішнім виглядом та технологією оброблення подібний до вольфраму. Він також має високу температуру плавлення — $+2623\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відпалений дрібнозернистий молибден характеризується високою пластичністю. Поліпшення структури й підвищення механічної міцності молибдену досягають уведенням спеціальних домішок. За кімнатної температури це відносно інертний метал. На повітрі він окиснюється,

Тантал (Ta) — метал сріблясто-білого кольору (рис. 2.16). Завдяки міцній оксидній плівці він подібний до свинця. Метал дуже міцний, твердий, має пластичність, що порівнюють із золотом. Температура плавлення — $+3017\text{ }^{\circ}\text{C}$. З танталу виготовляють листи, стрічки та фольгу завтовшки до $10\text{ }\mu\text{m}$. На противагу вольфраму й молибдену, тантал не стає крихким при нагріванні у вакуумі за досить високих температур. Завдяки здатності попередньо дегазованого танталу поглинати гази в

Ніобій (Nb) — метал, за властивостями подібний до танталу. За звичайних умов — сріблясто-білий, блискучий (рис. 2.17). Температура плавлення — $+2477\text{ }^{\circ}\text{C}$. Саме завдяки цій якості, а також поєднанню низької хімічної активності й надпровідності, ніобій стає дедалі популярнішим у практичній діяльності: його використовують у ракетобудуванні, атомній енергетиці та радіо-

техніці. Щодо електровакуумних приладів, то ніобій застосовують як катоди розжарювання в потужних генераторних лампах.

Реній (Re) — один із рідкісних і дуже важких металів із температурою плавлення, близькою до температури плавлення вольфраму, — $+3186\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.18). Реній і його сплави з вольфрамом застосовують у виробництві електроламп та електровакуумних приладів (замість чистого вольфраму); з нього створюють термопари для вимірювання температур (до $+2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) у вакуумі, у водні або інертному середовищі.



Рис. 2.18. Реній

Реній використовують як покриття для захисту від корозії і зношування деталей із міді, срібла, вольфраму, молібдену. У радіоелектроніці тонкі плівки ренію застосовують для виготовлення прецизійних резисторів в інтегральних мікросхемах.

Хром (Cr) — досить поширений у земній корі елемент, що має високу стійкість до окиснення, а тому його використовують для захисного покриття виробів (зокрема, для роботи за підвищених температур). Хром — метал голубувато-білого кольору, найтвердіший з усіх металів (рис. 2.19). Температура плавлення — $+1857\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2.19. Хром

Хромування здійснюють електролітично або за допомогою насичення хромом поверхневих шарів сталевих виробів дифузійною із зовнішнього середовища. З тонких плівок хрому виготовляють резистори й адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних з'єднань в інтегральних мікросхемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів. Електричні властивості хромових плівок дуже чутливі до умов нанесення внаслідок поглинання залишкових газів у процесі осадження. Однак хром має добру адгезію до скляних, силіконових і керамічних основ мікросхем. Крім того, він добре поєднується з будь-яким провідниковим матеріалом. Додатково перевагою хрому є легкість сублімації (перехід речовини з твердого стану в газоподібний, оминаючи рідкий) під час отримання плівок. Він входить до складу великої кількості сплавів для нагрівальних приладів, термопар, конструкційних нержавіючих, жароміцних сталей і магнітних матеріалів.

2.4.2. Провідникові резистивні матеріали

Матеріали високого питомого опору за призначенням можна поділити на провідникові резистивні матеріали, плівкові резистивні матеріали, матеріали для термопар.

Провідникові резистивні матеріали — це сплави для виготовлення дротяних резисторів (манганін, константан) та електронагрівальних елементів (ніхром, фехраль, хромаль). Висока нагрівостійкість цих сплавів досягається завдяки додаванню до їхнього складу досить вели-

кої кількості металів, які при нагріванні на повітрі утворюють суцільну оксидну плівку (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Властивості деяких сплавів високого опору

Назва сплаву	Щільність, кг/м ³	Питомий опір, мкОм•м	Температурний коефіцієнт питомого опору, 1/°С	Температура робоча, максимальна, °С	Межа міцності при розтягуванні, Н/м ²	Відносне подовження при розриві, %
Манганін	8,4×10 ³	0,48	(5–30)×10 ⁻⁶	100–200	(4,5–6,0)×10 ⁸	15–30
Константан	8,9×10 ³	0,52	(5–25)×10 ⁻⁶	450–500	(4,0–5,0)×10 ⁸	20–40
Ніхром марки Х15Н60	8,3×10 ³	1,2	(1–2)×10 ⁻⁴	1000	(6,5–7,0)×10 ⁸	25–30
Ніхром марки Х20Н80	7,5×10 ³	1,1	(1–2)×10 ⁻⁴	1100	–	–
Хромаль марки Х13Ю4	7,5×10 ³	1,35	(1–2)×10 ⁻⁴	850	7,0×10 ⁸	20

Манганін — сплав на основі міді (мангану 12 %, нікелю 3 %, решта 85 % — мідь) (рис. 2.20), є основним для виготовлення еталонних резисторів, шунтів і додаткових резисторів для вимірювальних приладів, резистивних датчиків тиску. Питомий опір: $\rho = 0,42\text{--}0,47$ мкОм•м,



Рис. 2.20. Дріт, виготовлений із манганіну

$t_{\text{пл}} = +960$ °С. Його електричний опір має малу залежність від температури, а спеціальним термічним обробленням можна забезпечити високу стабільність опору в часі. Манганін має дуже мале значення термоЕРС разом із міддю, що дає змогу широко використовувати його під час виготовлення електровимірювальних приладів найвищих класів точності.



Рис. 2.21. Дріт, виготовлений із константану

Константан — сплав міді та нікелю (міді 58–60 %, нікелю 32–40 %, мангану 1–2 % та ін.). Назва підкреслює стабільність електричного опору сплаву при зміні температури (з латин. *constans* — постійний, незмінний). Питомий опір: $\rho = 0,45\text{--}0,52$ мкОм•м, $t_{\text{пл}} = +1260$ °С. Застосовують для виготовлення резисторів, термопар та електронагрівальних елементів, які працюють за температури +400–500 °С. Константан добре піддається механічному обробленню, що свідчить про його високі технологічні властивості. Високі механічні характеристики у поєднанні з пластичністю дають змогу виготовляти із цього

2.4. Матеріали високого питомого опору

сплаву найтонший дріт (рис. 2.21), стрічки, смуги та фольгу. Високі значення термоЕРС разом із міддю і залізом успішно використовують при виготовленні термопар.

Ніхром — сплав нікелю (55–80 %), хрому (15–23 %), мангану (1,5 %) і заліза (решта). Характеризується високим питомим опором: $\rho = 1,04\text{--}1,17 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, високою термостійкістю, $t_{\text{пл}} = +1400^\circ\text{C}$, високотехнологічний, легко протягується в тонкий дріт або стрічки. Основний недолік — нестійкий до різких перепадів температури, що руйнують захисну оксидну плівку. Застосовують для виготовлення елементів електронагрівальних приладів, зокрема паяльників (рис. 2.22), а також як матеріал для плівкових резисторів інтегральних схем. Як і константан, ніхром містить чимало дорогого й дефіцитного нікелю, що обмежує його застосування.



Рис. 2.22. Спіраль нагріву електропаяльника

Фехраль і хромаль — це сплави заліза з хромом та алюмінієм у різних пропорціях: фехраль — заліза 82 %, хрому 15 %, алюмінію 3 %; хромаль — заліза 65 %, хрому 30 %, алюмінію 5 %. Мають питомий опір: до $1,39 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $t_{\text{пл}} +1500^\circ\text{C}$, а робочі температури — до $+1400^\circ\text{C}$. Такі сплави значно дешевші від ніхрому, але менш термостійкі й менш технологічні, більш тверді й крихкі за ніхром, що ускладнює їхнє оброблення для отримання необхідних виробів (рис. 2.23). Тому дроти й стрічки з них можна виготовити тільки з більшим поперечним перерізом, а отже, їх застосовують в електронагрівальних елементах великої потужності.



Рис. 2.23. Вироби з фехралю

2.4.3. Плівкові резистивні матеріали

Плівкові резистивні матеріали найширше застосовують під час виготовлення постійних і частково змінних резисторів різних типів, а також використовують у мікроелектроніці при виготовленні плівкових резисторів і резистивних елементів дуже малих розмірів, у мікросхемах, інтегральних схемах та інших пристроях.

До плівкових резистивних матеріалів висувають такі вимоги: можливість виготовлення стабільних у часі резисторів із низьким температурним коефіцієнтом питомого опору, висока корозійна стійкість і стійкість до тривалого впливу високої температури, добра адгезія до матеріалу основи.

Для виготовлення **металоплівкових** і **металооксидних резистивних матеріалів** використовують тугоплавкі метали: тантал, титан, нікель, хром, паладій, вольфрам і сплави на їхній основі.

Тонкі **металеві плівки** з тугоплавких металів завтовшки 1–10 мкм мають дрібнозернисту структуру, підвищене значення питомого поверх-

невого опору, низькі значення температурного коефіцієнта питомого поверхневого опору.

Для нанесення цих плівок використовують методи вакуумної технології: термічне вакуумне випаровування (хром, ніхром) або розпилювання резистивного матеріалу під дією бомбардування його йонами в середовищі інертного газу (тантал, реній і ін.). Напилення резистивної плівки відбувається на діелектричну основу. Як матеріал основи використовують скло, кераміку, ситал, полікор, шаруваті пластики тощо.

Залежно від товщини плівок та умов їхнього нанесення параметри плівкових резисторів можна регулювати в досить широких межах. Наприклад, якщо нанесення танталових плівок здійснювати в атмосфері азоту, відбувається осадження плівок нітриду танталу з вищим поверхневим опором і поліпшеною стабільністю. Однак за інших однакових умов застосування резистивних плівкових матеріалів треба враховувати дефіцитність танталу та його високу вартість.

Сплави марки *РС* містять кремній та легувальні компоненти (хром, залізо, нікель). Це сипкі порошки з розмірами частинок 40–70 мкм, їх застосовують для отримання тонкоплівкових резисторів, зокрема прецизійних, мікросхем загального та дрібносерійного виробництва.

Сплави марки *МЛТ* багатокомпонентні й містять кремній, залізо, хром, нікель, алюміній, вольфрам, а деякі — і лантаноїди. Виробляють як дрібнозернисті порошки. Вони відрізняються великою стійкістю до окиснювачів і впливу різних хімічно активних середовищ. Застосовують при виготовленні тонкоплівкових дискретних резисторів, мікросхем широкого призначення.

Більшість чистих оксидів металів у нормальних умовах — добрі діелектрики. Однак при неповному окисненні (у разі порушення стехіометричного складу за рахунок утворення кисневих вакансій), а також при додаванні деяких домішок провідність оксидів різко підвищується. Такі матеріали можна використовувати як контактні й резистивні шари.

З *металооксидних резистивних плівок* найбільше застосовують плівки зі станум(IV) оксиду (SnO_2). Для їхнього нанесення використовують різні методи, але найбільш поширений — термічне розкладання хлоридного олова. Отримані плівки вирізняються щільною дрібнозернистою структурою. Міцність зчеплення цих плівок із керамічною чи скляною основою в багато разів переверщує міцність зчеплення металевих плівок. Питомий опір металооксидних резистивних плівок: $\rho = 10^{-5}$ Ом·м. Вони стійкі до стирання й досить хімічно стійкі, що дає змогу випускати на їхній основі не тільки постійні, а й змінні резистори.

2.4.4. Матеріали для термопар

Для виготовлення термопар використовують переважно сплави на основі металів, хоча існують матеріали (напівпровідники) з величинами термоЕРС, що набагато перевищують термоЕРС металів, але техно-

2.4. Матеріали високого питомого опору

логія їхнього виготовлення є недосконалою. Матеріали для термопар поділяють на безпосередньо термоелектроди та матеріали для подовжувальних дротів (табл. 2.4). Щоб отримати чутливу термопару, для термоелектродів обирають матеріали із суттєвою різницею значення термоЕРС.

Таблиця 2.4

Характеристики сплавів для виготовлення термопар

Сплав/параметр	Копель	Хромель	Платинородій	Алюмель
Склад сплаву	44 % Ni 56 % Cu	90 % Ni 10 % Cr	90 % Pt 10 % Rh	93–96 % Ni, частка інших металів (Al, Mg, Si, Co) не перевищує 2 % для кожного
Питомий електричний опір ρ , мкОм·м	0,465	0,66	0,19	0,305
Застосування	Подовжувальні дроти		Електроди термопар	

Матеріали, які утворюють термопару, підбирають так, щоб у діапазоні вимірюваних температур вони мали максимальне значення термоЕРС (рис. 2.24). Отже, для вимірювання температур можуть застосовуватися такі термопари:

- мідь — константан, мідь — копель (до +350 °С);
- залізо — константан, залізо — копель, хромель — копель (до +600 °С);
- хромель — алюмель (до +900–1000 °С);
- платинородій — платина (до +1600 °С);
- вольфрам — молибден (до +2000 °С);
- вольфрам — реній (до +2800 °С).

Більшість термопар стійко працюють в окиснювальному середовищі. Але в процесі тривалої експлуатації можна спостерігати поступову зміну термоЕРС термопари. Причини такої нестабільності — забруднення домішками з навколишньої атмосфери, окиснення дротів, летючість компонентів, різкі вигини й механічні деформації, які вносять внутрішні напруги та створюють неоднорідність структури. Найвищу стабільність, точність, відтворюваність, незважаючи на невелике значення термоЕРС, мають платинородієві термопари. Це обумовлено хімічною інертністю та високим ступенем чистоти матеріалу.

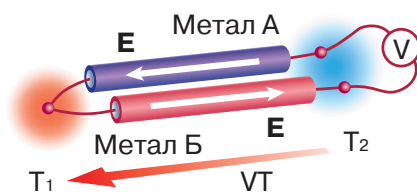


Рис. 2.24. Термопара

2.5. Дорогоцінні метали

Дорогоцінними металами здавна вважали так звані благородні метали за їхній гарний вигляд і стійкість до різних хімічних реагентів і впливів. До них належать золото, срібло, платина, паладій ін. У природі вони трапляються як у різних рудах і мінералах, так і у самородках. У результаті металургійного, хімічного й електролітичного перероблення отримують метали дуже високої чистоти: срібло — 99,999 %; золото — 99,998 %; платину — 99,9998 %; паладій — 99,94 %.

Унаслідок хімічної інертності до впливу агресивного середовища дорогоцінні метали стали незамінними в електроніці при виготовленні контактних виводів реле, конденсаторів, діодів, транзисторів і мікросхем. Їх застосовують в електротехнічній промисловості для виготовлення покриттів електричних контактів приладів, що працюють в агресивних середовищах. Срібло також використовують для виготовлення твердих припоїв.



Рис. 2.25. Злитки золота

Золото (Au) — блискучий метал жовтого кольору з високою пластичністю, теплопровідністю та електропровідністю (рис. 2.25). Золото має виняткову хімічну інертність. Воно стійке на повітрі та у воді. З киснем, азотом, воднем, фосфором, стибієм і вуглецем безпосередньо не взаємодіє. На нього не діють ні розведені, ні концентровані кислоти. Золото розчиняється тільки в суміші нітратної (65–68 % маси) і хлоридної (32–35 % маси) кислот, узятих у співвідношенні 1:3 за обсягом ($\text{HNO}_3 + 3\text{HCl}$).

Золото стійке до дії атмосферної корозії і не тьмяніє. Межа міцності на розтяг золотого дроту дорівнює 150 МПа, відносне видовження при розриві — приблизно 40 %. Тобто золото має найвищі, порівняно з усіма іншими металами, пластичність і ковкість. Воно легко розплющується на найтонші пластинки — сухозлітки. Так, 1 г золота можна розплющити в пластинку площею 1 м². Товщина найтонших пластинок золота 0,1 мкм.

За електропровідністю золото посідає третє місце після срібла й міді. Питомий опір золота: $\rho = 2,2 \times 10^{-8}$ Ом·м, $t_{\text{пл}} = +1064,5$ °С. В електронній техніці його використовують як контактний матеріал, матеріал для корозієстійких покриттів резонаторів надвисоких частот, внутрішніх поверхонь хвилеводів, гальванічних покриттів контактних поверхонь, золотих провідників, контактних площадок і роз'ємів друкованих плат. Мікросхеми можуть містити сотні дротяних з'єднань, у кожному з яких є крихітна кількість золота. Тонкі плівки золота застосовують як напівпрозорі електроди у фоторезисторах і напівпровідникових фотоелементах.

Срібло (Ag) — білий блискучий метал, стійкий до окиснення при нормальній температурі (рис. 2.26). Серед металів срібло відрізняється

найменшим питомим опором: $\rho = 1,59 \times 10^{-8}$ Ом·м, $t_{\text{пл}} = +962$ °С. Межа міцності на розтяг для срібного дроту дорівнює орієнтовно 200 МПа, відносно видоуження при розриві — приблизно 50 %.

Срібло застосовують у широкій номенклатурі контактів в електричній апаратурі різної потужності. Високі значення питомих теплоємності, теплопровідності й електричної провідності срібла забезпечують, порівняно з іншими металами, найменше нагрівання контактів і швидке відведення тепла від контактних точок. Його використовують і для безпосереднього нанесення на діелектрики (як електроди) у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів. Ним покривають внутрішні поверхні хвилеводів для отримання шару високої провідності. Із цією ж метою срібленню піддають провідники високочастотних котушок, струмопровідні контакти, дроти.

Порівняно з іншими дорогоцінними металами, срібло має знижену хімічну стійкість. Зокрема, має схильність до утворення непровідних темних плівок у результаті взаємодії із сірководнем, мізерна кількість якого завжди є в атмосфері. Тому срібні контакти не рекомендовано застосовувати разом із гумою, ебонітом та іншими матеріалами, що містять сірку. Наявність вологи також прискорює перебіг реакції.

Платина (Pt) — сріблясто-білий метал, що практично не сполучається з киснем і дуже стійкий до хімічних реагентів, $t_{\text{пл}} = +1773,5$ °С, питомий опір: $\rho = 10,6 \times 10^{-8}$ Ом·м (рис. 2.27). Платина чудово піддається механічному обробленню, витягується в дуже тонкі нитки й стрічки. На відміну від срібла, платина не утворює сірчистих плівок при взаємодії з атмосферою, що забезпечує платиновим (як і золотим) контактам стабільний перехідний опір. Платину застосовують для виготовлення термопар, розрахованих на робочі температури до +1600 °С (у парі зі сплавом платинородієм). Через малу твердість її іноді використовують для контактів у чистому вигляді, але вона є основою для деяких контактних сплавів. Найбільш поширені сплави платини з іридієм — вони не окиснюються, мають високу твердість, мале механічне зношення, однак дорогі. Їх застосовують тоді, коли треба забезпечити високу надійність контактів.

Паладій (Pd) — важкий сріблястий метал, за деякими властивостями подібний до платини й часто є її заміником, тому що дешевший у 4–5 разів (рис. 2.28). Використання паладію в електровакуумній техніці обумовлене його здатністю активно поглинати водень. Останній, на відміну від інших газів,



Рис. 2.26. Злитки срібла



Рис. 2.27. Злитки платини



Рис. 2.28. Злитки паладію

дифундує в паладій, а потім знову виділяється в чистому вигляді під час нагрівання паладію у вакуумі до температури $+350\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$. Виділеним із паладію чистим воднем наповнюють деякі типи газорозрядних приладів. Паладій та його сплави зі сріблом і міддю застосовують як контактні матеріали. У відпаленому стані паладій має дуже хороші механічні властивості: межа міцності на розтяг — приблизно 200 МПа, відносне подовження при розриві — до 40 %, температура плавлення — $+1554\text{ }^\circ\text{C}$. Паладій добре полірується, не тьмяніє, не схильний до корозії, але легше піддається хімічному впливу. Порівняно з іншими платиновими металами менш стійкий до дії окисників, розчиняється в суміші нітратної і хлоридної кислот.

2.6. Метали та сплави різного призначення



Рис. 2.29. Залізо

Залізо (Fe) — блискучий, сріблясто-сірий, важкий метал, $t_{\text{пл}} = +1538\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2.29). Залізо електропровідне, але порівняно з міддю та алюмінієм має вищий питомий опір (приблизно $\rho = 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{м}$), теплопровідне, досить пластичне. Його легко кують, штамнують, витягують у дріт і вальцюють у тонкі листи. Залізо — один із металів, який найбільше використовують, на нього припадає до 95 % світового металургійного виробництва. Є основним компонентом сталі та чавуну — найважливіших конструкційних матеріалів.

У сухому повітрі за звичайної температури залізо досить стійке, але у вологому повітрі швидко окиснюється, укриваючись товстим шаром іржі. Тому чисте залізо має досить обмежене застосування. В електротехніці його використовують в електровакуумних приладах для виготовлення анодів та екранів, що працюють за температур понад $+500\text{ }^\circ\text{C}$.



Рис. 2.30. Вироби із сталі

Сталь — сплав заліза (металу) та вуглецю (неметалу), якого в сплаві від 0,025 до 2,24 % (рис. 2.30). Крім вуглецю, у сплаві містяться інші елементи (легувальні), які додають для отримання тих чи тих властивостей. Технічними сортами є: *маловуглецева* сталь, вміст вуглецю становить 0,01–0,1 %, у *конструкційній* сталі вуглець міститься в кількості 0,1–0,7 %, а в *інструментальній* та *спеціальній (легованій)* сталі — 0,7–1,7 %.

Сталь як найбільш дешевий і доступний метал становить інтерес і як провідниковий матеріал. Для виготовлення сталевих проводів застосовують сталь із вмістом вуглецю 0,1–0,15 %. Для захисту від атмосферної корозії сталеві дроти покривають тонким шаром (0,016–0,020 мм) міді або цинку.

У лініях електропередачі зазвичай застосовують багатодротові проводи — *сталалюмінієві* (рис. 2.31, а). Одно- або багатодротовий сталевий оцинкований дріт використовують як серцевину (для підвищення механічної міцності на розрив), обвиту алюмінієвими дротами.

2.6. Метали та сплави різного призначення

Сталеалюмінієві проводи широко використовують у ЛЕП напругою 110 кВ і вище, їхній переріз досягає 600–700 мм².

Сталеві проводи або шини прямокутного перерізу застосовують також як серцевину в біметалевих проводах, забезпечуючи значну економію провідникової міді.



Рис. 2.31. Провідникові вироби: а) сталеалюмінієвий провід;
б) біметалевий провід

Сталь легко намагнічується та розмагнічується. Тому її використовують для виготовлення магнітопроводів електромашин, електроапаратів і трансформаторів, електромагнітів (електротехнічна сталь). Залежно від потрібних властивостей електротехнічна сталь містить різну кількість кремнію, який підвищує її електричний опір, зменшує питомі втрати енергії (на гістерезис і вихрові струми), але знижує індукцію насичення та пластичність.

Чавун — це сплав заліза з вуглецем із масовою часткою вуглецю від 2,14 до 6,67 %. Також у чавуні є кремній, манган, сірка, фосфор та інші компоненти. Чавун — твердий, але крихкий матеріал (рис. 2.32). Його найширше застосовують у машинобудуванні для виготовлення різноманітних конструкційних деталей, а для провідникових виробів чавун не застосовують.



Рис. 2.32. Вироби з чавуну

Нікель (Ni) — сріблястий метал, який широко застосовують в електровакуумній техніці як матеріал для арматури електронних ламп, деяких типів катодів. Він навіть у холодному стані легко піддається всім видам механічного оброблення: куванню, пресуванню, прокатуванню, штампуванню, волочінню тощо (рис. 2.33). Цінною властивістю нікелю є хімічна стійкість, особливо до розчинів лугів, що не діють на нього навіть у нагрітому стані. Крім застосування в електровакуумній техніці, нікель використовують як компонент деяких магнітних і провідникових сплавів, а також для захисного покриття виробів із заліза.

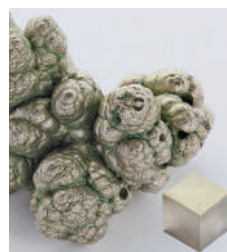


Рис. 2.33. Нікель

Олово (Sn) — легкий метал сріблясто-білого кольору з блискучою поверхнею, ковкий і пластичний, має добру корозійну стійкість у середовищі органічних кислот і солей. Сучасна промисловість випускає різноманітну продукцію з олова. Найбільш поширені чушки (як вихідний матеріал для виробництва інших напівфабрикатів), дріт, прутки й аноди.



Рис. 2.34. Олово



Рис. 2.35. Свинець

У виробництві електронних приладів, де дуже часто для з'єднання елементів застосовують паяння, олово входить до складу багатьох низькотемпературних припоїв (рис. 2.34). Метал є складовою великої кількості сплавів із міддю. Серед найвідоміших сплавів — бабіти, бронзи. Оловом також покривають мідні жили проводів, де воно захищає мідь від негативного впливу сірки, що міститься в гумовій ізоляції.

Свинець (Pb) — важкий, м'який, ковкий метал сірого кольору (рис. 2.35). Хімічно малоактивний, завдяки чому його використовують для виготовлення кабельних оболонок. В електротехнічній і приладобудівній галузях свинець відіграє важливу роль як компонент припійних сплавів, досить поширених завдяки низькій вартості, зручності застосування та хорошим фізичним характеристикам. Метал широко використовують для захисту від гамма-випромінювання. Проте його сполуки токсичні: потрапляючи в організм, свинець накопичується в кістках, викликаючи їхнє руйнування. Тому під час паяння обов'язково включають витяжку.



Рис. 2.36. Натрій

Натрій (Na) — сріблясто-білий метал, дуже легкий і м'який (ріжеться ножом) (рис. 2.36). Для нього характерні металевий блиск, пластичність, добра електропровідність (перспективний матеріал для виготовлення провідників із застосуванням герметичної оболонки) і теплопровідність. Легко взаємодіє з багатьма неметалами — галогенами, сіркою, фосфором тощо. Усі солі натрію добре розчинні та є сильними електролітами.

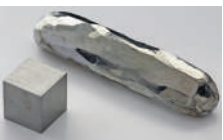


Рис. 2.37. Кадмій

Кадмій (Cd) — м'який, ковкий, тягучий метал сріблясто-білого кольору, легко піддається механічному обробленню (рис. 2.37). Застосовують як захисне покриття, пігмент у регульовальних стрижнях для атомних реакторів. Припої, що містять кадмій, досить стійкі до температурних коливань.

Легування міді невеликими домішками кадмію дає змогу робити більш зносостійкими дроти на лініях електротранспорту. Мідь із домішками кадмію майже не відрізняється за електропровідністю від чистої міді, проте помітно перевершує її за міцністю та твердістю. У промисловості хімічних джерел струму помітне місце належить кадмій-нікелевим (лужним) акумуляторам (АКН), які відрізняються від свинцевих (кислотних) більшою надійністю (наприклад, дуже компактні акумулятори для керованих ракет).

Цинк (Zn) — метал синьо-білого кольору (рис. 2.38). Під впливом кисню з'являється оксидне покриття, що оберігає метал від подальшої реакції окиснення. За кімнатної температури це крихкий матеріал, який

практично не гнеться, але за підвищеної температури він легко згинається. У приладо- й машинобудуванні цинк застосовують не лише як захист від корозії, а й для збільшення міцності, тривалого терміну експлуатації виробів.

Літій (Li) — дуже легкий (найлегший метал), м'який, сріблясто-білий, хімічно активний метал. Унаслідок своєї низької густини літій спливає у воді (рис. 2.39) й гасі. Його можна обробляти пресуванням і плющенням, легко витягувати в дріт. В електроніці сплави літію зі сріблом, золотом, міддю є дуже ефективними припоями. Літій використовують під час наповнення освітлювальних газорозрядних металогалогенних ламп. З літію виготовляють аноди хімічних джерел струму (аккумуляторів і гальванічних елементів) із твердим електролітом. Літій та його сполуки широко застосовують у ракетній техніці як ракетне паливо або як домішки до нього.

Ртуть (Hg) — це єдиний із відомих металів, який залишається рідким за кімнатної температури. Зовні нагадує рідке срібло; при потраплянні на плоску поверхню крапля ртуті моментально розсипається на сотні дрібних кульок, які немов відштовхуються одна від одної і розбігаються в різні боки (рис. 2.40). Ртуть взаємодіє зі сріблом, золотом, цинком, змочуючи їх і утворюючи амальгами. Вона не сумісна лише з двома металами — залізом і платиною. Ртуть та її сполуки дуже токсичні й небезпечні для організму людини.

Вона є важливим елементом у виробництві ртутних ламп освітлення. В електротехніці застосовують випрямлячі змінного електричного струму в постійний із рідким ртутним катодом.

Антифрикційні (підшипникові) сплави — матеріали, які використовують для виробництва підшипників ковзання. Вони повинні мати низький коефіцієнт тертя, неоднорідну структуру, яка б сприяла затримуванню мастила, високу міцність на стиск і стирання, пластичність для притирання тертьових поверхонь та одночасно необхідну твердість, яка б не викликала інтенсивного стирання, але була б достатньою, щоб не спричиняти деформування.

Бабіти — найкращі антифрикційні сплави на олов'яній або свинцевій основі, які застосовують для заливання підшипників ковзання. Бабіти поділяють на *олов'яні*, що містять не менше 72 % олова; *олов'яно-свинцеві* з вмістом 5–17 % олова і 64–72 % свинцю; *неолов'яні (свинцеві)*, що містять не менше 80 % свинцю.

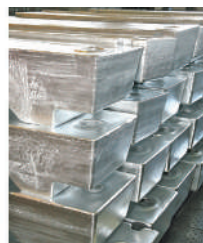


Рис. 2.38. Вироби із цинку



Рис. 2.39. Літій у воді



Рис. 2.40. Ртуть

Бабіти позначають літерою *B* із числом, що вказує на вміст олова в сплаві. Наприклад, бабіт **B83** складається з 83 % олова, 10–12 % стибію і 5,5–6,5 % міді. Він призначений для заливання підшипників парових турбін, дизелів тощо. До олов'яно-свинцевих належить бабіт **B16**, що містить 15–17 % олова, 15–17 % стибію, 1,5–2 % міді, а решта — свинець. Цей сплав застосовують для заливання підшипників парових турбін, електродвигунів, прокатних станів, дробарок тощо.

До неолов'яних належить кальцієвий бабіт — сплав зі свинцевою основою та невеликими домішками кальцію 0,75–1,1 % і натрію 0,65–0,95 %.

2.7. Надпровідники та кріопровідники

У 1911 р. нідерландський фізик Х. Камерлінг-Оннес під час дослідження електропровідності металів за «гелієвих» температур (температура переходу гелію в рідкий стан: 4,2 К) відкрив, що електричний опір кільця із замороженої ртуті стрибкоподібно зменшується до мізерного значення, яке неможливо виміряти. Таке явище має назву **надпровідність**, а речовини, здатні переходити в надпровідний стан, почали називати **надпровідниками**. Критичну температуру охолодження, за якої виникає перехід речовини в надпровідний стан, називають **критичною температурою переходу $T_{кр}$ (К)**.

Явище надпровідності має й зворотний характер: за підвищеної температури надпровідність зникає, і речовина переходить у нормальний стан із кінцевим значенням питомої провідності γ .

Відомо 35 надпровідникових металів і понад 1000 сплавів і хімічних сполук різноманітних елементів. Явище надпровідності пов'язане з тим, що одного разу наведений у надпровідному контурі електричний струм буде тривалий час (упродовж років) циркулювати по цьому контурі без будь-якого підведення енергії ззовні. Такий надпровідний контур створює в просторі магнітне поле, подібне до постійного магніту.

Однак на практиці з'ясувалося, що надпровідність порушується не тільки в разі підвищення температури до значень, що перевищують $T_{кр}$, а й під час виникнення на поверхні надпровідника магнітного поля з магнітною індукцією, що перевищує індукцію переходу $B_{кр}$. Найбільша можлива температура переходу (критична температура) певного надпровідникового матеріалу відповідає критичній магнітній індукції і навпаки.

Розрізняють такі надпровідники: *I роду* — перехід у стан надпровідності під час охолодження відбувається стрибкоподібно; *II роду* — перехід у стан надпровідності під час охолодження відбувається поступово; також у них існує проміжний стан між нижнім і верхнім значеннями критичної магнітної індукції переходу, що відповідає значенням температур $T < T_{кр}$ (рис. 2.41).

2.7. Надпровідники та кріопровідники

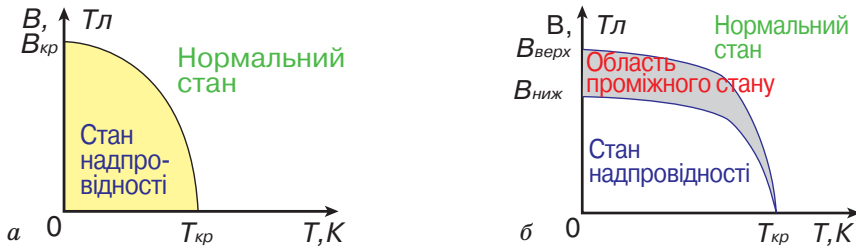


Рис. 2.41. Залежність величини магнітної індукції від температури: а) для надпровідників I роду; б) для надпровідників II роду

Порівняно з надпровідниками I роду надпровідники II роду мають вищі значення як критичної температури переходу $T_{кр}$, так і критичної магнітної індукції $B_{кр}$. Останній фактор є визначальним для широкого застосування надпровідників у сучасних електричних апаратах (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Деякі параметри надпровідникових матеріалів

Надпровідники	Найбільше значення температури переходу $T_{кр}$, К	Найбільше значення магнітної індукції переходу $B_{кр}$, Тл
Елементарні I роду		
Алюміній Al	1,2	0,010
Олово Sn	3,7	0,031
Ртуть Hg	4,2	0,041
Тантал Ta	4,5	0,083
Свинець Pb	7,2	0,080
Елементарні II роду		
Ніобій Nb	9,4	0,195
Ванадій V	5,3	0,13
Складні сплави II роду		
44 % Nb + 56 % Ni	8,7	12
50 % Nb + 50 % Zr	9,5	11
Сполуки II роду		
Ванадій галід V_3Ga	14	50
Ніобій станид Nb_3Sn	18	22

У 1933 р. німецькі фізики В. Майснер і Р. Оксенфельд зробили нове фундаментальне відкриття: надпровідники під час переходу з нормального стану в надпровідний стають ідеальними діамagnetиками, тобто їх відносна магнітна проникність μ стрибком зменшується від 1 до 0. Тому зовнішнє магнітне поле не може проникнути в надпровідниковий матеріал, надпровідники здатні відштовхувати його (рис. 2.42, с. 42).

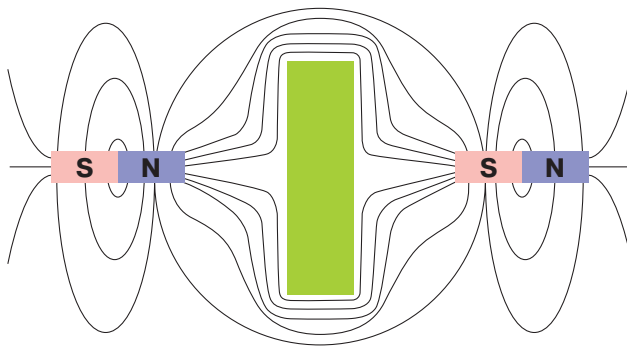


Рис. 2.42. Огинання надпровідника силовими лініями магнітного поля

За принципом механічного виштовхування надпровідників із магнітного поля побудовано надшвидкісний залізничний транспорт на «магнітній подушці». Порушення надпровідності матеріалу зовнішнім магнітним полем використовують у роботі приладу, який називають *кріотроном* (рис. 2.43). На кріотронних елементах виготовляють комірки обчислювальних машин. З кріотронів можна зібрати будь-яку схему пам'яті або перемикачів. Два стани — з нульовим і кінцевим опором — природно ототожнюють із позиціями 0 і 1 у двійковій системі числення. Перевагами комірок на плівкових кріотронах є висока швидкість, малі втрати й надзвичайна компактність.

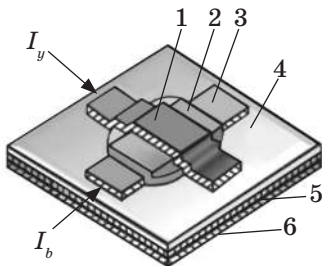


Рис. 2.43. Хрестоподібний плівковий кріотрон:
 1 — керувальна плівка; 2 — ізолювальний шар;
 3 — керована плівка; 4 — ізоляція;
 5 — екранувальний прошарок; 6 — основа;
 I_y — керувальний електричний струм;
 I_b — керований електричний струм

Надпровідне електрообладнання дасть змогу різко збільшити електричні й магнітні навантаження в елементах пристроїв і завдяки цьому різко зменшити їхні розміри. У надпровідному дроті допустима густина струму в 10–50 разів перевищує густина струму у звичайному провіднику. Магнітні поля можна буде довести до значень індукції орієнтовно 10 Тл порівняно з 0,8–1,0 Тл у звичайних машинах і трансформаторах.

Застосування надпровідникового обладнання та технологій в електроенергетиці забезпечує багато переваг:

- скорочення вдвічі-утричі втрат електроенергії;
- зниження маси й габаритних показників обладнання у 2–4 рази;
- підвищення надійності та подовження терміну експлуатації електрообладнання за рахунок зниження старіння ізоляції;
- підвищення надійності та стійкості роботи енергосистем;
- підвищення рівня пожежної та екологічної безпеки електроенергетики.

2.8. Неметалеві провідникові матеріали

Нині на основі надпровідників виготовляють генератори, електродвигуни й трансформатори з вищим ККД і малими масою і розмірами, більш екологічні, надійні, з великим терміном експлуатації. Передбачається, що в електроенергетиці відбудуватиметься поступова заміна традиційного резисторного обладнання на більш дешеве й компактне надпровідникове, яке істотно надійніше й ефективніше. Перспективним напрямом є пошук так званих теплих надпровідників із вищою температурою переходу $T_{кр}$ у стан надпровідності, що зменшить складність і вартість апаратури охолодження.

Крім явища надпровідності, у сучасній електротехніці дедалі ширше використовують явище *кріопровідності*, тобто поступове (без стрибків) досягнення металами малого питомого опору за криогенних температур без переходу їх у надпровідний стан. Метали з такими властивостями називають *кріопровідниками*. Питомий опір кріопровідника за робочої температури може бути меншим за питомий опір цього ж провідника за нормальної температури в сотні, а в деяких випадках і в тисячі разів.

Найчастіше як кріопровідники використовують алюміній, срібло, золото, берилій. Як охолоджувальні агенти застосовують рідкий водень (з урахуванням його здатності утворювати вибухонебезпечну суміш із повітрям) і рідкий азот.

Використання кріопровідників замість надпровідників веде до спрощення та зменшення вартості виконання теплової ізоляції пристроїв, зниження витрат потужності на їхнє охолодження. Для отримання високоякісних кріопровідників потрібні винятково висока чистота металу (відсутність домішок) і відсутність наклéпу (відпалений стан).

2.8. Неметалеві провідникові матеріали

З твердих неметалевих провідникових матеріалів виготовляють електротехнічні вироби: щітки електричних машин і генераторів, електроди для прожекторів, електроди для дугових електричних печей (завдяки високій електропровідності й хімічній стійкості до практично будь-яких агресивних водних розчинів), розрядники для телефонних мереж і мікрофони, що містять вугільний порошок, численні струмопровідні клеї, пасти, покриття, емалі, а також високоомні недротяні резистори.

2.8.1. Матеріали для електровугільних виробів

Як сировину для електровугільних виробів використовують графіт, сажу та антрацит.

Природний графіт — одна з алотропних форм чистого вуглецю. У природі вуглець трапляється у двох основних видах: графіт (рис. 2.44) та алмаз. Їхня хімічна формула ідентична, але фізичні властивості радикально відрізняються. Саме будова кристалічної ґратки впливає на ці характеристики.



Рис. 2.44. Графіт

Природний графіт має шарувату структуру. Його фізичні властивості в напрямку шарів і перпендикулярно до них різні, тому він характеризується анізотропією як електричних, так і механічних параметрів. У напрямку шарів електропровідність графіту має металічний характер ($\rho = 8 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$).

Графіт — темно-сірий мінерал, має металевий блиск, добре проводить електричний струм і тепло, дуже м'який, тому легкий у механічному обробленні. Окремі частинки графіту легко відділяються й ковзають по його поверхні. Цю властивість використовують у техніці для виготовлення сухих змазок на основі графіту. Температура плавлення варіює в діапазоні $+3845\text{--}3890$ °С. Графіт — інертна речовина, не розчиняється хімічно активними компонентами. Це можливо тільки в разі потрапляння його в середовище розплавленого металу з високою точкою кипіння. У природі графіт ніколи не трапляється в чистому вигляді. Його добувають, збагачуючи спеціальні руди. Широко використовують в технології напівпровідникових матеріалів для виготовлення різних нагрівачів та екранів, човників, тиглів, касет тощо. Заготовки графіту мають вигляд брусків і пластин.

Від режиму відпалу залежить форма, у якій вуглець знаходиться у виробі. За високих температур відпалу ($+2400\text{--}2800$ °С) вуглець штучно перетворюється на графіт, розміри кристалів графіту збільшуються, підвищується провідність матеріалу та знижується його твердість. Цей процес називають *графітуванням*.

Штучний графіт — вуглецевий матеріал, що має кристалічну структуру графіту. Його отримують шляхом кристалізації аморфного вуглецю за температури $+2500$ °С. У багатьох випадках штучному графіту віддають перевагу перед природним завдяки чистоті складу.

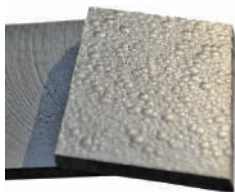


Рис. 2.45.
Піролітичний
вуглець

Піролітичний вуглець — анізотропний вуглецевий матеріал (рис. 2.45), отриманий шляхом піролізу (термічного розкладання без доступу кисню) газоподібних вуглеводнів (метану, бензену, гептану) в камері, де знаходяться керамічні або скляні основи заготовок лінійних резисторів поверхневого типу. Властивості плівок із піролітичного вуглецю залежать від ступеня їхньої дисперсності. Як в'язучі речовини застосовують лаки, термопластичні й термореактивні смоли. Товщина отриманих плівок не більше 10^{-5} мм; питомий опір: $\rho = 1,5 \times 10^{-7}$ Ом \cdot м. Плівки мають високу стабільність параметрів, низький рівень шумів. На основі вуглецевих матеріалів виготовляють порівняно дешеві плівкові резистори широкого застосування.

У результаті піролізу борорганічних сполук $\text{B}(\text{C}_3\text{H}_7)_3$ або $\text{B}(\text{C}_4\text{H}_9)_3$ отримують *боровуглецеві плівки*. Вони характеризуються малим тем-

пературним коефіцієнтом питомого опору. Їх використовують для виготовлення металоплівкових резисторів типу МЛТ.

Недротяні резистори, які виготовляють із природного графіту, сажі, піролітичного вуглецю, відрізняються від дротяних меншими габаритами й високою верхньою межею номінального опору. Вони повинні мати малу залежність електричного опору від прикладеної напруги, високу стабільність за підвищеної температури й вологості.

Саж — це дрібнодисперсний вуглець із домішками смолистих речовин (рис. 2.46). Її використовують під час виробництва стрижневих електродів. Сажу та графіт змішують із в'язучими матеріалами (кам'яновугільна смола, а інколи рідке скло). Отриману масу прочавлюють крізь стальний мундштук або пресують у відповідних прес-формах і піддають термообробленню. Для сумішей характерний широкий діапазон питомого опору: $\rho = 0,01 - 400 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.



Рис. 2.46. Сажа

Антрацит — це викопне вугілля чорного блискучого кольору найвищого ступеня вуглефікації (понад 90 %) (рис. 2.47). Горить майже без полум'я, без запаху й диму, не спікається. Цю сировину використовують під час виготовлення абразивів, відновників, вугільних електродів, які працюватимуть за високих температур (+300 °С). Вугільний порошок для мікрофонів також виготовляють з антрациту. Питомий опір порошку залежить від розміру зернин, режиму відпалу та щільності завантаження. Порошки для мікрофонів бувають двох типів: *дрібнозернисті* (після просіювання крізь сито з 52-ма отворами на 1 см²) і *крупнозернисті* (проходять крізь сито з 45-ма отворами на 1 см²). Відпал порошоків, який веде до зростання їхнього електричного опору, здійснюють за температури +600–800 °С. Отримані порошки не можна спресовувати протягом певного часу, щоб не злиплися під дією підвищеної вологості.



Рис. 2.47. Антрацит

За наявності у вугільних матеріалах значної пористості їх просочують лаками, воскоподібними речовинами, а інколи розплавленими металами — оловом, свинцем тощо. Після просочування електровугільних виробів металами різко зростає їхня механічна міцність та електропровідність. Остаточної форми й чистоти виробу набувають після механічного оброблення.

За наявності у вугільних матеріалах значної пористості їх просочують лаками, воскоподібними речовинами, а інколи розплавленими металами — оловом, свинцем тощо. Після просочування електровугільних виробів металами різко зростає їхня механічна міцність та електропровідність. Остаточної форми й чистоти виробу набувають після механічного оброблення.

Для видалення з вуглецевих матеріалів летких речовин, крім графіту й сажі, їх прожарюють за температури +1200–1300 °С, потім подрібнюють до порошкоподібного стану і в певних пропорціях змішують (іноді з додаванням металевих порошоків). До суміші додають зв'язувальні речовини (смоли) і старанно перемішують. Цю електровугільну суміш сушать, розмелюють, просівають та отримують порошок, з якого у сталевих прес-формах виробляють різноманітні електровугільні вироби.

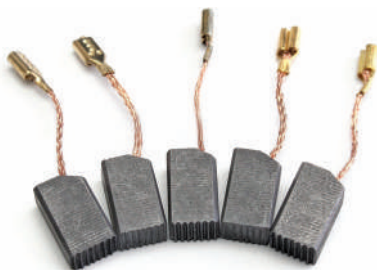


Рис. 2.48. Щітки вугільні

Вугільні матеріали використовують для виготовлення щіток, які призначені для утворення ковзного контакту між нерухомою частиною електричної машини й обертовою частиною, а також для підведення (відведення) струму до колектора або контактних кілець (рис. 2.48).

Для різних марок щіток характерні певні значення питомого опору, допустимої густини струму, лінійної швидкості на колекторі, коефіцієнта тертя тощо. Розрізняють такі щітки: графітні, вугільно-графітні, електрографітні, металографітні з домішками міді.

Графітні щітки виготовляють із натурального графіту. Вони працюють безшумно. Застосовують при швидкостях 20–40 м/с, їхній питомий електричний опір становить: $\rho = 8\text{--}30 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Вугільно-графітні щітки виготовляють із графіту, коксу й зв'язувальних смол. Вони мають підвищену твердість, механічну міцність та абразивність. Застосовують при швидкостях 10–40 м/с. Їхній питомий опір: $\rho = 20\text{--}60 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Електрографітні щітки виготовляють із графіту, коксу, сажі та зв'язувальних смол. Після пресування та випікання щітки графітизують за температури $+2500^\circ\text{C}$ для збагачення їх графітом і забезпечення підвищеної механічної міцності. Питомий опір: $\rho = 2\text{--}75 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Використовують в електричних машинах із важкими умовами комутації струму. Допустимі колові швидкості — 40–90 м/с.

Металографітні щітки виготовляють із порошоків графіту й міді, інколи з домішками порошку олова та срібла. Вони мають низький питомий опір: $\rho = 0,3\text{--}0,8 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Застосовують при швидкостях 20–25 м/с.

2.8.2. Композиційні резистивні матеріали

Композиційні резистивні матеріали — це механічні суміші дрібнодисперсних порошоків металів з органічною або неорганічною діелектричною зв'язкою. Як провідникову фазу використовують метали (срібло, паладій), напівпровідникові матеріали — оксиди названих металів, а також карбіди Si, W. Як зв'язувальні речовини застосовують діелектричні матеріали — термопластичні й термореактивні полімери, порошокоподібне скло, неорганічні емалі, органічні смоли (епоксидну, гліфталеву тощо).

Композиційні матеріали поєднують цінні властивості: великий питомий опір, який не надто залежить від температури, можливість управління електричними властивостями шляхом зміни складу, порівняно проста технологія виготовлення. Композиції, що містять органічні зв'язувальні речовини, порівняно легко піддаються дії вологи й підвищеної температури. Їхні граничні робочі температури не вище $+150^\circ\text{C}$.

У композиціях із неорганічними зв'язувальними речовинами (скло, емаль) після спікання за високих температур досягають високої вологої теплостійкості до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$, але верхня межа опорів резисторів знижується, збільшуються нелінійність і власні шуми. Крім цих основних недоліків композиційних матеріалів, треба також назвати залежність опору від частоти, «старіння» та тривалого навантаження.

Серед розмаїття композиційних резистивних матеріалів на найбільшу увагу заслуговують *контактоли* й *кермети*, *провідникові* та *резистивні пасти*.

Контактоли — малов'язкі або пастоподібні полімерні композиції. Вони виконують роль струмопровідних клеїв, фарб, покриттів та емалей. Як зв'язувальну речовину в них використовують різні синтетичні смоли (епоксидні, фенолформальдегідні, кремнійорганічні тощо), а струмопровідними наповнювачами є дрібнодисперсні порошки металів високої теплопровідності (срібла, нікелю, паладію). Необхідної в'язкості контактолів перед їхнім нанесенням на поверхню досягають додаванням розчинників (ацетон, спирт тощо). Швидкість полімеризації залежить від складу та кількості розчинника.

Вони мають такі властивості: питомий електричний опір: $\rho = 10^{-4} - 6 \times 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{м}$, низьку густина, високу міцність, еластичність, корозійну стійкість.

Контактоли, що містять *срібло*, мають питомий електричний опір: $\rho = (1 - 6) \times 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{м}$, виражену адгезію до різних матеріалів, високу стабільність параметрів при різних механічних і кліматичних впливах.

Контактоли, що містять *нікель*, мають нижчий питомий опір, ніж у композиціях зі сріблом, добру адгезію до різних матеріалів, високу стабільність параметрів при різних механічних і кліматичних впливах, але низьку життєздатність (до 30 хв).

Контактоли, що містять *паладій*, мають високий питомий опір: $\rho = (10 - 20) \times 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{м}$, хорошу адгезію до всіх матеріалів (зокрема, до напівпровідників), високу стабільність параметрів при різних механічних і кліматичних впливах.

Композиції слугують для отримання контактів між різними металами, металами й напівпровідниками, для створення електродів на діелектриках, екранування приладів від перешкод, для струмопровідних комунікацій на діелектричних основах мікросхем, у гнучких хвилеводах та інших виробах електронної промисловості.

Керметами називають композиції металу й діелектрика з неорганічною зв'язкою, що містять діелектричну та провідникову фази. Вони мають кристалічну структуру, у якій дисперсні кристали кераміки, що становлять майже до 90 % від загального обсягу, укладені в металеву матрицю. Як керамічну складову використовують оксиди Al, Be, Mg, Zr, Th, U; карбіди W, Ti, Ta, Nb, Cr; бориди Zr, Ti; як металеву складову —

Розділ 2. Провідникові матеріали

метали Cr, Ni, Al, Fe, Co, Ti, Zr та сплави на їхній основі. Металева матриця керметів об'єднує тверді керамічні частинки в єдиний композиційний матеріал, забезпечуючи виробам необхідну міцність. Кермети поєднують властивості кераміки (високі твердість та опір зносу, тугоплавкість, жароміцність тощо) і металів (теплопровідність, пластичність).

Композиції виготовляють методами порошкової металургії — порошковим і твердофазним спіканням, рідкофазним спіканням, просоченням, екструзією, гарячим пресуванням, прокатуванням тощо.

В електро- й радіотехніці кермети застосовують для виготовлення тонкоплівкових резисторів. Готову пасту наносять на основу, піддають термообробленню (+1100 °C) та отримують плівки завтовшки 20–25 мкм. Істотною перевагою керметних плівок є можливість варіювання їх опором у широких межах (від 10^3 до 10^6 Ом).

Найбільш поширена мікрокомпозиція Cr–SiO, тонкі плівки з якої виготовляють методом термічного випарювання та конденсації у вакуумі з наступним термообробленням для стабілізації властивостей.

У товстоплівкових мікросхемах використовують резистори, отримані на основі композиції скла з паладієм і сріблом. Скло розмелюють у порошок до розміру зернин 3–5 мкм, змішують із порошком срібла й паладію, з допоміжною органічною зв'язкою та розчинником. Отриману пасту наносять на керамічну основу й спікають у звичайній атмосфері. Питомий опір плівок залежить від відсоткового вмісту провідних компонентів і режиму спікання. Керметні плівки вирізняються однорідністю, стабільністю параметрів, хорошою адгезією, підвищеною термостійкістю, мають хороші механічні властивості; їх широко використовують для виготовлення резистивних мікрозбірок.

Матеріалами для виготовлення пасивних елементів гібридних інтегральних мікросхем (ГІМС) є пасти: *резистивні, провідникові* тощо.

Усі пасти складаються з трьох компонентів: дрібнодисперсний порошок скла (фрит), наповнювач і матеріал, що утворює каркас. Крім того, для отримання необхідної в'язкості до названих компонентів додають розріджувач. Елементи мікросхем створюють, наносячи пасти на керамічні основи методом трафаретного друку через сітчасті трафарети з наступним сушінням і випалюванням.

Фрит утворюють із нелужного скла, до якого додають оксиди Ti, Pb, Li, Ca, Zn тощо. Змінюючи оксиди, можна в широких межах змінювати температуру плавлення фриту.

Для утворення каркасу використовують целюлозу або етилцелюлозу.

Наповнювачами паст є порошки золота, платини, срібла, паладію, рутенію та їхні композиції, які становлять 70–80 % від загальної маси твердої фази пасти.

Провідникові пасти мають забезпечувати низький електричний опір провідників, їхню здатність до паяння. Поверхневий опір залежить від складу наповнювача й товщини плівки. У технології товстоплівкових

мікросхем провідники покривають припоями, що значно збільшує їхню провідність.

У резистивних пастах кількість функціонального матеріалу визначають питомим електричним опором. Найбільше застосовують резистивні пасту на основі паладію та сполук рутенію. Паладій додають для зниження корозії та міграції, а також зменшення вартості пасту. Резистивні пасту на основі сполук рутенію мають вищу стабільність опору, тому переважають у товстоплівковій технології.

2.9. Матеріали для контактів

Електричні контакти для комутаційних процесів в електроустаткуванні є струмопровідними деталями, які розмикають, замикають і перемикають електричні кола. Загальна площа контакту — сума площ певних ділянок, що значно менша за контактну поверхню, так звану умовну площу контакту. Стан поверхонь контактів безпосередньо впливає на *перехідний опір* і нагрівання контактів під час проходження через них струму. Тому матеріали для контактів повинні бути стійкими до корозії, мати струмопровідну оксидну плівку, високу тепло- й електропровідність, не зварюватися, бути дугостійкими, тобто мати високу температуру плавлення, високу зносостійкість до стирання, бути механічно міцними й легко піддаватися механічному обробленню (притиратися один до одного), бути дешевими й недефіцитними.

Основні причини зношення контактів під час їхньої експлуатації залежать від умов використання:

- ерозія контактів — порушення форми робочих поверхонь;
- перенесення матеріалу з одного контакту на інший, утворення краєтерів, заклинювання контактів;
- електричне зношення контактів, зумовлене електричною дугою, іскрінням контактів під час розмикання та вібрації;
- механічне зношення, пов'язане із силою удару контактів, контактним тиском і частотою замикань контакту;
- хімічне зношення, на яке впливають склад навколишнього середовища, його вологість і температура.

Для виготовлення контактів застосовують *чисті метали, сплави металів, металокерамічні (композиційні) матеріали*.

Електричні контакти бувають нерухомі й рухомі.

Нерухомі контакти — роз'ємні та нероз'ємні, призначені для тривалого з'єднання провідників. *Роз'ємні контакти* утворюють за допомогою затискачів, болтів, гвинтів тощо. *Нероз'ємні контакти* створюють паянням, зварюванням або клепаанням.

Рухомі контакти поділяють на *розривні* (контакти реле, кнопок, вимикачів, контакторів тощо) і *ковзні* (контакти між колектором і щітками, контакти комутаторів, пакетних вимикачів, реостатів, потенціометрів тощо).

2.9.1. Матеріали для рухомих контактів

Рухомі контакти призначені для періодичного замикання та розмикання електричних кіл, можуть бути розривними й ковзними.

Розривні контакти забезпечують періодичне замикання чи розмикання електричних кіл протягом тривалого часу, зокрема в таких пристроях, як реле, пускачі, електромеханічні перетворювачі. При цьому між контактними площадками може утворюватися електрична дуга, що призводить до зростання температури, а отже, до зниження механічної міцності, окиснення матеріалу контактів, з'являється вірогідність їхнього зварювання, а також можлива ерозія матеріалу.

Щоб матеріал розривних контактів надійно працював, він має відповідати таким вимогам: мати високі електропровідність, температуру плавлення, теплоту випаровування, теплопровідність; бути стійким до корозії; бути твердим.

За значенням комутованого струму розривні контакти поділяють на *слабкоструміві* (одиниці ампер) і *сильнострумові* (десятки, сотні ампер).

Слабкоструміві розривні контакти виготовляють із дорогоцінних і тугоплавких металів і сплавів на їхній основі. Контакти із чистої міді застосовують дуже рідко через виникнення окалини під навантаженням (робота не більше 8 год). Тому мідь покривають сріблом.

Для розривних контактів незначної відповідальності (побутові вимикачі) як матеріал зазвичай обирають *латунь* — сплав міді із цинком. Наявність у сплаві цинку сприяє підвищенню механічної міцності та зростанню корозійної стійкості.

Приклади основних галузей застосування контактних матеріалів:

срібло — реле, сигнальна апаратура, телефонна та телеграфна апаратура, управління флуоресцентними лампами, контакти допоміжних кіл контакторів і магнітних пускачів;

срібло-мідь-нікель — сигнальні реле, перетворювачі струму, реле автоматики, електромагнітні лічильники, автомобільні й залізничні сигнальні реле;

срібло-кадмій — реле, термостати холодильників, стартери, теплові вимикачі;

срібло-оксид міді — контактори змінного й постійного струму, автоматичні запобіжники;

мідь-вольфрам — потужні масляні й повітряні високовольтні вимикачі дугових печей і перетворювачі струму;

срібло-вольфрам — магнітні пускачі й контактори з високою частотою включення, кнопки керування, вимикачі, випрямлячі струму.

Більшість дорогоцінних металів застосовують для контактів як **гальванічне покриття**, яке більш зносостійке в електричному полі. Його товщина коливається в межах від одного до кількох десятків мікронів.

Срібло для виготовлення контактів можна застосовувати і в чистому вигляді. *Золото й платину* в чистому вигляді використовують у виняткових випадках (для супутників, космічних об'єктів, медичних приладів діагностики), здебільшого як покриття для особливо важливих контактів.

Якщо робоча напруга на контактах велика, а струми невеликі, використовують метали платинової групи: *платину, паладій, іридій, осмій, рутеній і родій*. Застосовують також *золото і молибден*.

Сильнострумові розривні контакти виготовляють із металокерамічних матеріалів, які отримують *методом порошкової металургії*. При цьому використовують метали, які мають різні позитивні властивості: $Ag+Cd$; $Ag+W$; $Cu+W$. Наприклад: W і Ag . Їх спікають під тиском за високої температури й отримують композит із вищою, ніж у срібла, температурою плавлення та кращою, ніж у вольфраму, електропровідністю.

Також застосовують композиції:

- срібла з кобальтом, нікелем, хромом, вольфрамом, молибденом і танталом;
- міді з вольфрамом і молибденом;
- золота з вольфрамом і молибденом.

Необхідним вимогам відповідають матеріали системи $Ag-CdO$ при вмісті CdO 12–20 %. Такий матеріал отримують у разі нагрівання в окиснювальній атмосфері сплаву срібло–кадмій.

Металокерамічні контакти мають переваги порівняно зі звичайними металевими: більш стійкі до приварювання та зношення, значно збільшують термін використання контактів при середніх навантаженнях, підвищують надійність і довговічність конструкції апаратів при значній економії срібла.

Металокерамічні матеріали для контактів, через які проходять високі струми, мають складатися з компонентів, які не взаємодіють один з одним. Срібло й мідь забезпечують високу електро- і теплопровідність, а тугоплавка частина композиції підвищує зносостійкість, термостійкість та опір до зварювання контактів. Питомий опір металокерамічних контактів має бути не більшим $0,7 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, відрізнитися високою стабільністю в часі та малою залежністю від умов експлуатації.

Під час проектування контактних з'єднань потрібно уникати сполучень із двох різнорідних металів залежно від їхнього положення в електрохімічному ряді напруги, оскільки при потраплянні вологи й пилу на місце контактного з'єднання утворюється гальванічна мікропара з певною різницею потенціалів. Що далі один від одного розташовані метали, які утворюють пари, то більша різниця потенціалів, котру вони створюють у гальванічній мікропарі, і тим більшим буде руйнування металу від корозії. При цьому значно руйнується метал, який має більший негативний потенціал у ряді (*табл. 2.6, с. 52*).

Електрохімічний ряд матеріалів контактних з'єднань

Елемент	Ag	Cu	H ₂	Sn	Ni	Cd	Fe	Zn	Al
Потенціал щодо H ₂	+0,8	+0,52	0	-0,14	-0,22	-0,4	-0,43	-0,76	-1,34

Ковзні контакти забезпечують перехід електричного струму від нерухомих частин пристрою до рухомих, наприклад у потенціометрах, реостатах, пакетних вимикачах, електричних машинах.

Матеріали для ковзних контактів повинні мати малий питомий опір, високу стійкість до стирання (особливо значного при сухому терті, коли обидва контакти виготовлено з одного матеріалу, а так само при невдалому виборі контактної пари), витримувати роботу на високих швидкостях. Найвищі якості мають контактні пари, складені з металевого матеріалу та матеріалів, які містять графіт. Крім низького коефіцієнта тертя, графіт і матеріали на його основі відрізняються великою напруженою дугоутворення, тому зношення контактів від іскріння незначне. Крім того, на поверхні графіту не утворюються оксидні плівки.

Матеріали для ковзних контактів можна поділити на пружинні металеві й електротехнічні вугільні. Як *пружинні металеві контактні матеріали* використовують спеціальні сорти *бронзи* (наприклад, кадмієві та берилієві) і *латунь*, що відрізняються високою механічною міцністю, стійкістю до стирання, пружністю, антифрикційними властивостями та стійкістю до атмосферної корозії. Із цих матеріалів виготовляють контакти рубильників, пакетних вимикачів тощо.

Ковзні контакти є також у щітково-колекторному пристрої електричних машин, де один елемент переміщується щодо іншого. Для колекторів використовують холоднодеформовану мідь, а для виготовлення щіток — вугільно-графітні матеріали.

2.10. Металокераміка

Металокераміка — штучний матеріал, який складається з гетерогенної композиції металів або їх сплавів із неметалами (керамікою). Металокераміку об'єднують важливі конструкційні й експлуатаційні властивості металів і неметалів. Металева фаза металокерамічних матеріалів може містити Cr, Ni, Al, Fe, Co, Ti, Zr та їхні сплави. До керамічної фази належать оксиди (Al₂O₃, Cr₂O₃, SiO, SiO₂, ZrO₂), карбіди (SiC, Cr₃C₂, TiC), бориди (Cr₂B₂, TiB₂, ZrB₂), молібден силіцид (MoSi), титан нітрид (TiN) і вуглець (алмаз, графіт). Керамічна складова в металокераміці залежно від її типу змінюється в широких межах від 15 до 85 % (за об'ємом).

Вироби з металокераміки характеризуються великою міцністю, високими зносостійкістю і теплостійкістю, антикорозійними властивостями. Основними перевагами застосування металокераміки також є: можливість отримання деталей відповідних фізико-хімічних якостей, геоме-

тричних розмірів і високої чистоти поверхні; значне зниження витрати металу через відсутність відходів і втрат, а також можливість використання відходів виробництва (окаліни, стружки, наждачного пилю); відносно незначні початкові капіталовкладення. Найчастіше поняття *металокераміка* пов'язують із *порошковою металургією*. Типова технологія виробництва заготовок виробів методом порошкової металургії має чотири основні операції: отримання порошку вихідного матеріалу (металів і кераміки); формування заготовок; спікання; остаточне оброблення.

Існують різні методи отримання металокерамічного покриття.

Методом *газотермічного напилення* частинок порошку отримують металокерамічні покриття для захисту поверхонь деталей від зношення й корозії під час їхньої експлуатації. Цей же метод формування металокерамічного покриття використовують для ремонту під час відновлення розмірів зношених деталей.

Металокерамічне покриття також отримують на змащуваних металевих деталях при ревіталізації механізмів. До мастила, яке використовують у механізмі, наприклад у підшипниках, додають спеціальну речовину — *ревіталізант*, який під дією контактних навантажень формує на поверхнях підшипників металокерамічне покриття. Воно водночас зміцнює та відновлює зношені поверхні, які труться, збільшує їхній ресурс.

Іншим прикладом металокераміки, отриманої спіканням порошків суміші заліза й графіту, можуть бути пористі самозмазувальні підшипники, матеріал яких після спікання просочують мастилом.

Тонкоплівкову металокераміку отримують методом термічного випаровування металу або сплаву у вакуумі й конденсації його парів на поверхню пластинки. Прикладом такого матеріалу може бути мікрокомпозиція Cr–SiO₂, яку використовують при виготовленні тонкоплівкових резисторів.

Металокераміку застосовують як антифрикційне або захисне покриття деталей і самостійних конструкційних матеріалів в авіабудуванні, автомобілебудуванні, приладобудуванні, турбобудуванні й інших галузях промисловості.

Типова технологія виготовлення металокерамічних деталей:

1-ша операція — приготування шихти (просіювання порошку крізь сито з отворами 0,3–0,5 мм і подальше дозування);

2-га операція — перше пресування (на гідравлічному пресі);

3-тя операція — перше спікання за температури, нижчої від температури плавлення початкових матеріалів або із частковим розплавленням (проводять в електричній або вакуумній печі);

4-та операція — друге пресування;

5-та операція — остаточне спікання;

6-та операція — хіміко-термічне оброблення (процеси цементації, загартування та відпускання проводять в електричних печах);

7-ма операція — механічне оброблення (отримання остаточних розмірів і форм на металорізальних верстатах).

Застосування металокераміки збільшує вартість апаратури, проте в експлуатації ці витрати компенсують за рахунок збільшення терміну служби пристрою та підвищення його надійності.

2.11. Металеві покриття

Будь-які деталі та вироби з вмістом заліза схильні до корозії. Її початок залежить від того, як швидко кисень — неодмінний учасник процесу окиснення — дістанеться до металу. Тому можна стверджувати, що ступінь руйнування металів і сплавів залежить від рівня антикорозійного захисту.

Хімічна корозія — це процес, який полягає в руйнуванні металу при взаємодії з агресивним навколишнім середовищем і не має зв'язку з дією електричного струму. Зазвичай у такому випадку на метал діє сухий газ або рідина-неелектроліт (гас, масло, смола тощо). При цьому на поверхні металу утворюються хімічні сполуки, найчастіше — плівки оксидів. Міцність оксидних плівок різних металів різна. Наприклад, плівки оксидів заліза є слабкими, а алюмінієва оксидна плівка досить міцна, щільно прилягає до поверхні металу й захищає його від подальшого руйнування.

Міцна оксидна плівка захищає метал також від електрохімічної корозії, тому що працює як ізолятор. **Електрохімічна корозія** виникає в результаті впливу на метал електролітів — розчинів солей, кислот, лугів, морської води тощо.

Атмосферна корозія (корозія на відкритому повітрі) — це комбінована хімічна й електрохімічна корозія.

Сталь і чавун, які є головною частиною всіх технічних сплавів, досить сильно ржавіють, тому захист їх від корозії потребує особливої уваги. Виробництво корозієстійких сплавів (наприклад, високохромистої і хромонікелевої сталі) це спосіб боротьби з корозією, до того ж найбільш ефективний. Нержавіючі сталь й чавун, як і корозієстійкі сплави кольорових металів, є найбільш цінними конструкційними матеріалами, однак використання таких сплавів не завжди доцільне через їхню високу вартість або з технічних міркувань.

Способи захисту металевих виробів від корозії — металеві покриття, хімічні покриття, катодний захист, неметалеві покриття.

Металеві покриття — це захист від корозії шляхом нанесення тонкого шару металу, який має достатню стійкість у певному середовищі, дає хороші результати й досить поширений. До захисних металевих покриттів є такі основні вимоги: вони суцільні, непроникні, мають високу міцність зчеплення з основним металом, високу твердість, зносостійкість і рівномірно розподіляються по всій поверхні, яку захищають.

Металеві покриття можуть бути нанесені: гарячим, гальванічним і дифузійним способами; термомеханічним шляхом; металізацією (розпиленням) тощо.

Гарячий спосіб використовують для нанесення тонкого шару легкоплавких металів: олова (лудіння), цинку (цинкування) або свинцю (свинцювання). При цьому способі очищений виріб занурюють у ванну з розплавленим металом, метал змочує виріб і відкладається на ньому тонким шаром.

Гальванічний спосіб полягає в нанесенні на виріб цинку, кадмію, олова, свинцю, нікелю, хрому й інших металів. Розрізняють анодне й катодне гальванічні покриття.

Анодне покриття здійснюють металами, потенціал яких у цьому електроліті нижчий від потенціалу металу виробу (цинк, кадмій, олово).

Катодне покриття здійснюють металами, потенціал яких у цьому електроліті вищий від потенціалу основного металу (мідь, нікель, срібло). Катодне покриття захищає основний метал, доки воно є суцільним. Для нанесення покриття виріб занурюють в електролітичну ванну з розчином солей того металу, який потрібно нанести захисним шаром. Виріб є катодом, а як анод використовують той метал, який буде осаджуватися.

Гальванічний спосіб використовують досить широко, оскільки, не вимагаючи нагрівання виробу, він дає змогу нанести на нього будь-який метал і при цьому точно регулювати товщину захисного шару.

Гальванічні покриття наносять не лише з метою захисту від корозії, а й для підвищення поверхневої твердості та стійкості виробів проти стирання (хромування, нікелювання); підвищення їхньої жаростійкості (хромування); покращення декоративного вигляду (золотіння, нікелювання, хромування); отримання поверхні з більшою відбивальною здатністю (нікелювання з наступним поліруванням, хромування тощо).

Дифузійний спосіб полягає в насиченні захисним металом поверхневого шару виробу. Це реалізується шляхом дифузії захисного металу в основний за високих температур (хіміко-термічне оброблення). Таким способом здійснюється алітування (насичення алюмінієм), хромування та силіціювання (насичення кремнієм).

Термомеханічне покриття (плакування) полягає в отриманні біметалів (подвійних металів) шляхом спільного гарячого прокатування основного й захисного металу. Зчеплення між металами здійснюється за рахунок дифузії під впливом тиску й високої температури. Цей метод є найбільш надійним способом захисту від корозії. Сталь захищають міддю, томпаком (різновид латуні), нержавіючою сталлю, алюмінієм; сплав дюралюмін плакують чистим алюмінієм.

Металізацію здійснюють шляхом розпилення крапель розплавленого захисного металу по поверхні виробу за допомогою спеціального

апарата — пістолета. Як захисний метал використовують дріт, який подають у пістолет, його розплавляють ацетиленово-кисневим полум'ям або електричною дугою і розпилюють струменем повітря. Металізація зручна для захисту великих виробів і здійснення однобічних покриттів. Як захисні метали під час металізації використовують нержавіючу сталь і кольорові метали.

Неметалеві покриття — це покриття фарбами, емалями, лаками, маслами, а також гумою (гумування).

2.12. Припої

Паяння широко застосовують у різних галузях промисловості. В електропромисловості та приладобудуванні паяння є в деяких випадках єдиним можливим методом з'єднання деталей. Його використовують під час виготовлення електро- та радіоапаратури, комп'ютерної техніки, деталей електромашин, плавких запобіжників тощо.

Паяння — це процес отримання з'єднання матеріалів за допомогою спеціальних сплавів, температура плавлення яких нижча за температуру плавлення з'єднуваних деталей. Під час паяння відбувається змочування, розтікання й заповнення зазору між деталями розплавленим припоєм і зчеплення деталей при кристалізації паяного шва. Отже, **припоєм** називають спеціальний сплав, який застосовують для паяння.

Наявність оксидних плівок, механічних та органічних забруднень на поверхні з'єднуваних деталей заважає процесу паяння. Тому перед паянням поверхні, що з'єднують, ретельно очищують, а в процесі паяння захищають від окиснення флюсами. **Флюси** — допоміжні матеріали для отримання якісного й надійного паяння, поліпшують умови змочування поверхні металу, захищають поверхню паяного металу та розплавленого припою від окиснення під час нагрівання та паяння, розчиняють наявні на поверхні металу й припою плівки оксидів.

Припої мають відповідати таким вимогам:

- температура їхнього плавлення має бути нижчою за температуру плавлення матеріалів, які з'єднують;
- мають добре змочувати матеріал і легко розтікатися по його поверхні;
- бути достатньо міцними й герметичними, стійкими до корозії;
- мати малий інтервал температур кристалізації;
- мати високу електропровідність.

Припої виготовляють у вигляді дротів, смуг, листів, кілець, дисків, зернин, трубок із внутрішнім набиванням флюсом (рис. 2.49), а також як порошки і пасти.

Паяльна паста є композицією з припою і флюсу. Вона незамінна під час паяння у важкодоступних місцях і монтажу безкорпусних радіодеталей. Пасту наносять лопаткою в потрібній кількості на місце паяння, а потім прогрівають електропаяльником.

У разі застосування трубок із внутрішнім набиванням флюсом наклеплення флюсу й припою здійснюють за один прийом, що значно спрощує процес паяльних робіт і сприяє його механізації, а також полегшує паяння у важкодоступних місцях і поліпшує його якість.

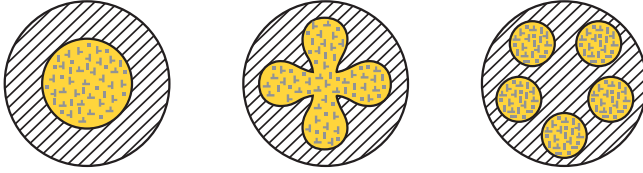


Рис. 2.49. Форми перерізів трубчастих припоїв і заповнення їх флюсом

Усі припої за температурою плавлення поділяють на *м'які* (температура плавлення нижче $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$, межа міцності — $5\text{--}7\text{ кгс/мм}^2$) і *тверді* (температура плавлення — $+500\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, межа міцності — до 50 кгс/мм^2 і вище).

М'які припої широко застосовують у різноманітних галузях промисловості та побуті: для паяння сталі, міді, цинку, свинцю, олова та їхніх сплавів, сірого чавуну, алюмінію, кераміки, скла тощо. Їх використовують для паяння внутрішніх виводів корпусів мікросхем, дровових виводів навісних компонентів, герметизації корпусів, місць монтажу тощо (табл. 2.7, с. 58).

За складом елементів м'які припої бувають: *олов'яно-свинцеві*, *малоолов'яні* й *безолов'яні*, а також *легкоплавкі* та *спеціальні*.

Припої олов'яно-свинцеві (ПОС) ($t_{\text{пл}} = +183\text{--}265\text{ }^{\circ}\text{C}$) є сплавами олова та свинцю з незначними домішками стибію ($1,5\text{--}2,5\%$). Їх позначають як ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50, ПОС-61, ПОС-90 (цифра — відсоток вмісту олова). Олов'яно-свинцеві припої мають високу змочувальну здатність, хороший опір корозії. Різні кількісні співвідношення олова та свинцю визначають властивості припоїв. Для отримання спеціальних властивостей до олов'яно-свинцевих припоїв додають стибій, бісмут, кадмій, індій, цинк та інші метали. Додавання стибію, наприклад, підвищує міцність ПОС.

Маркування буде таким: ПОССу-30-0,5 (олова 30 %, стибію 0,5 %, решта — свинець).

Малоолов'яні й безолов'яні м'які припої: свинцеві ($t_{\text{пл}} = +327\text{ }^{\circ}\text{C}$), свинцево-срібні ($2,5\%$ срібла, $t_{\text{пл}} = +304\text{ }^{\circ}\text{C}$) та ін.

Легкоплавкі м'які припої ($t_{\text{пл}} = +60\text{--}145\text{ }^{\circ}\text{C}$) застосовують під час паяння деталей, які чутливі до нагрівання, — мікросхем, напівпровідникових виробів тощо. Зниження температури плавлення припою отримують шляхом збільшення кількості компонентів, які розчиняються один в одному в рідкому стані й нерозчинні у твердому стані (зростає ентропія системи).

**Склад, основні властивості та сфера застосування м'яких припоїв,
поширених у приладобудуванні**

Марка припою	Вміст елементів, %	Початкова $t_{пл}$, °C	Сфера застосування
ПОС-90	Sn – 90; Pb – 9,7; Sb – 0,3	220	Паяння деталей, які надалі піддають гальванічному обробленню
ПОС-61	Sn – 61; Pb – 38,1; Sb – 0,8; Bi – 0,1	183	Лудіння та паяння деталей вимірвальних приладів і відповідальних деталей зі сталі, міді, латуні, бронзи, коли неприпустиме або небажане високе нагрівання в зоні паяння. Паяння виводів обмоток, радіоелементів і мікросхем
ПОС-40	Sn – 40; Pb – 60	238	Лудіння та паяння тонкого проводу, наконечників, з'єднання проводів із пелюстками, деталей з оцинкованого заліза
ПОСК-50	Sn – 50; Pb – 32; Sb – 18	145	Паяння деталей із міді та її сплавів, яке не допускає локального перегріву. Паяння напівпровідникових приладів
ПОСК-47	Sn – 47; Pb – 36; Sb – 5,5; Cd – 11,5	180	Паяння проводів і виводів елементів до шару срібла, нанесеного на кераміку
ПОСВ-33	Sn – 33,3; Pb – 33,4; Bi – 33,3	130	Паяння радіоелементів, для яких неприпустимий поверхневий перегрів. Паяння або лудіння тонкого дроту при виготовленні друкованих плат малих розмірів. Паяння плавких запобіжників
Сплав Розе	Bi – 50; Pb – 25; Sn – 25	90	Паяння, коли потрібна особливо низька температура плавлення припою

2.12. Припої

Продовження табл.

Сплав д'Арсенваля	Bi – 50; Pb – 26,67; Sn – 13,33; Cd – 10	79	Те саме
Сплав Вуда	Bi – 50; Pb – 25; Sn – 12,5; Cd – 12,5	60	Те саме
ABIA-1	Sn – 55; Cd – 20; Zn – 25	200	Паяння струмопровідних тонких деталей з алюмінію та його сплавів
ABIA-2	Sn – 40; Cd – 20; Zn – 25; Al – 15	250	Паяння чистого алюмінію та його сплавів
Г17	Ga – 30,2; Sn – 6; In – 13,8; Ag – 50	145	Галієвий припій для з'єднання деталей, чутливих до підвищення і різкої зміни терморезиму
ПОССу-40-0,5	Sn – 39–41; Pb – 58,5–60,5; Sb – 0,5	183	Паяння або лудіння обмоток електромашин, монтажних елементів, кабельних виробів, трубок радіаторів
ПОССу-61-0,5	Sn – 60–62; Pb – 37,5–39,5 Sb – 0,5	183	Паяння або лудіння електроапаратури при жорстких вимогах до температури
ПСр-2	Sn – 30; Pb – 63; Ag – 2; Cd – 5	225	Паяння монтажних з'єднань, що працюють в умовах підвищених температур
ПСр-2,5	Sn – 6; Pb – 91,5; Ag – 2,5	295	Паяння монтажних з'єднань та елементів мікроелектроніки, що працюють в умовах підвищених температур
ПСрОСІн-3-56	Sn – 56; Pb – 37,5; Sb – 0,5; Ag – 3; In – 3	175	Паяння та лудіння тонких дротів із золота, срібла й покритих ними деталей
ПСрІн-3	Ag – 3; In – 97	141	Те саме

Складні леговані м'які легкоплавкі припої: **сплав Розе** (Bi 50 %, Pb 25 %, Sn 25 %) за $t_{пл} = +90-98$ °C; **сплав Вуда** (Bi 50 %, Pb 25 %, Sn 12,5 %, Cd 12,5 %) за $t_{пл} = +60-68$ °C.

У деяких випадках (паяння тонких золотих і срібних дротів) як м'який припій використовують сплав бісмуту 25 %, олова 42 % і талію 33 %. Вибір цього припою пояснюють тим, що в ньому золото й срібло не розчиняються, тому під час експлуатації не відбувається стоншування провідників.

Спеціальні м'які припої використовують для паяння матеріалів, які не піддаються якісному паянню стандартними припоями, причому найчастіше їх використовують для паяння алюмінію та його сплавів. Застосовують спеціальні м'які припої на олов'яній основі, які містять цинк, кадмій, іноді алюміній, а також чисте олово (99,92 %), до того ж найкращими є олов'яно-цинкові, олов'яно-кадмієві та кадмієво-цинкові припої ($t_{\text{пл}} = +197\text{--}310\text{ }^{\circ}\text{C}$), оскільки цинк і кадмій (особливо цинк) добре дифундують в алюмінії.

До *твердих припоїв* ($t_{\text{пл}} = +500\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) належать мідні, мідно-манганові, мідно-нікелеві, з додаванням дорогоцінних металів (срібла, золота, платини). Для паяння електричним паяльником такі припої не використовують. Нагрівання заготовок під час паяння твердими припоями здійснюють газовими пальниками, у печах, струмом високої частоти, а також в електричних контактних машинах.

Тверді припої відрізняються тугоплавкістю та високою механічною міцністю, але технологія паяння при цьому значно складніша. Під час паяння твердими припоями відбувається дифузія матеріалу припою в матеріал паяних виробів, тому тверді припої забезпечують високу міцність з'єднань.

Вироби з алюмінію та його сплавів паяють припоями на алюмінієвій основі з кремнієм, міддю, оловом та іншими металами.

Магній та його сплави паяють припоями на основі магнію з домішками алюмінію, міді, мангану та цинку.

Вироби з корозієстійких сталей і жароміцних сплавів, що працюють за високих температур (вище $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$), паяють припоями на основі заліза, мангану, нікелю, кобальту, титану, цирконію, гафнію, ніобію і паладію.

Як тверді припої використовують чисту мідь, сплави міді із цинком (ПМЦ), сплави міді з фосфором, сплави на основі срібла (ПСр). Цифри в марках мідно-цинкових припоїв показують вміст міді у відсотках, а в марках срібних припоїв — вміст срібла. Наприклад, **ПМЦ-36**: Cu 36 %, Zn 64 %; **ПСр-25**: Ag 25 %, Cu 40 %, Zn 35 % (табл. 2.8).

Припої з титаном мають підвищену активність і здатність змочувати поверхні тугоплавких металів і металів, покритих оксидами, а також поверхні металокераміки; їх застосовують для паяння тугоплавких металів, титану та його сплавів. Паяння виконують в інертних газах (аргон, гелій), які не містять кисню, азоту та водню, або у вакуумі.

Склад, основні властивості та сфера застосування твердих припоїв

Марка припою	Вміст елементів, %	Початкова $t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Сфера застосування
ПСр-72	Ag – 72; Cu – 28	779	Лудіння та паяння міді, нікелю, мідних і мідно-нікелевих сплавів. Паяння міді з нікельованим вольфрамом, з посрібленими стальними деталями
ПСр-45	Ag – 45; Cu – 30; Zn – 25	725	Паяння та лудіння деталей зі сталі, міді, бронзи, нікелю, срібла. Шви мають велику механічну міцність і стійкість до корозії
ПСр-37,5	Ag – 37,5; Cu – 49; Mn – 8; Zn – 5,5	725	Паяння та лудіння міді, нікелю, мідних і мідно-нікелевих сплавів, ковару, нейзильберу. Паяння міді та мідних сплавів із жароміцними сплавами
ПМЦ-54	Cu – 54; Zn – 46	860	Паяння міді та мідних сплавів
ПМГ-9	Cu – 90,6; Ge – 8,7; Ni – 0,5; B – 0,2	950	Паяння електротехнічної сталі, нержавіючої сталі, нікелю
ПМТ-45	Cu – 49-52; Fe – 1-3; Si – 0,7-1,0; Ti – 45,0-48,3	955	Паяння титану та його сплавів в електровакуумній техніці для вводів, що вплавляють у скло

2.13. Провідникові вироби

До провідникових виробів належать проводи, шнури й кабелі. Їх використовують для передання, підведення й розподілу електроенергії, сигналів зв'язку, виготовлення обмоток електричних машин і приладів тощо. Основними елементами всіх типів проводів, шнурів і кабелів є струмопровідні жили (з алюмінію або міді), ізоляція (з гуми, емалей, пластмаси тощо), екрани, оболонки та зовнішні покриття. Від правильного вибору механічних, фізико-хімічних та інших властивостей провідникових виробів значною мірою залежить надійність роботи електрообладнання.

Обмоткові проводи призначені для виготовлення обмоток електричних машин, апаратів і приладів. Для струмопровідних жил використовують мідь і алюміній. Ізоляція, яку застосовують для виготовлення обмоткових проводів, може бути емалевою, волокнистою, емалево-волокнистою, плівковою тощо.

Розділ 2. Провідникові матеріали

Обмоткові проводи з емалевою ізоляцією найпоширеніші, мають малу товщину ізоляції, еластичність і механічну міцність під час стирання емалевих покриттів, хороші електроізоляційні характеристики, нагрівостійкість, термопластичність. Емалева ізоляція на дроті — це гнучке лакове покриття, отримане в результаті затвердіння шару лаку, нанесеного на дріт на емалювальних верстатах. Має найменшу товщину (0,007–0,065 мм) порівняно з волокнистою і плівковою ізоляцією. Це дає змогу закласти більшу кількість витків в об'єм котушки й тим самим збільшити потужність електричної машини або апарата. Наразі промисловість випускає емальовані проводи з ізоляцією на основі олійних і високоміцних синтетичних лаків із температурними індексами ТІ (°С) +105, +120, +130, +155, +180 і вище.

Унаслідок недосконалості технології виготовлення емалева ізоляція може мати точкові пошкодження, тому обмотки, виготовлені з проводу з емалевою ізоляцією, обов'язково просочують електроізоляційними лаками. Сучасна промисловість випускає багатий перелік обмоткових емальованих проводів. Характеристики деяких із них подано в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Мідні й алюмінієві обмоткові проводи з емалевою ізоляцією

Марка проводу	Характеристика проводу	Діаметр металевої жили, мм	Товщина шару ізоляції, мм	Сфера застосування
З мідними жилами Цифри 1 і 2 в марках проводів відповідають нормальній і підвищеній товщині ізоляції				
ПЕЛ	Провід з ізоляцією на основі олійних емалей	0,02–2,44	0,007–0,05	Для котушок електричних апаратів і приладів, які працюють за підвищених температур (до +150 °С) і вологості
ПЕВ-1	Провід з ізоляцією полівінілацеталевою емаллю (вініфлекс)	0,05–2,44	0,012–0,05	Для обмоток електричних апаратів і машин, що працюють за температур до +110 °С

2.13. Провідникові вироби

Продовження табл.

ПЕМ-2	Провід із механічно міцною емалевою ізоляцією ВЛ-941	0,05–2,12	0,08–2,25	Для обмоток електричних апаратів і машин, що працюють за температур до +105 °С
ПЕВТЛ-2	Провід з ізоляцією поліуретановою емаллю підвищеної теплоємності; луджений	0,06–1,0	0,012–0,05	Те саме. Температурні умови до +120 °С. Емаль під час паяння не потребує попереднього зачищення
ПЕТВ-1	Провід з ізоляцією поліестерним лаком, яка добре витримує багаторазові перегини та розтягування	0,03–2,44	0,015–0,065	Для обмоток електродвигунів, трансформаторів тощо. Температурні умови до +130 °С
З алюмінієвими жилами				
ПЕВА-2	Провід, ізольований потовщеним шаром високоміцної емалі (вініфлекс)	0,57–2,44	0,014–0,022	Для котушок електричних апаратів і приладів. Найбільша допустима температура +105 °С
ПЕЛРА-1	Провід, ізольований високоміцною емаллю (поліамідно-резольною)	0,57–2,44	0,011–0,021	Те саме

Обмоткові проводи з волокнистою ізоляцією на основі бавовняної пряжі, натурального шовку, а також із капронових, азбестових і скляних волокон виготовляють зазвичай методом двошарового обмотування струмопровідних жил. Найбільшої нагрівостійкості обмоткових проводів досягають, приклеюючи скляну й азбестову пряжу до поверхні провду за допомогою гліфталевих і кремнійорганічних лаків.

До обмоткових проводів із волокнистою ізоляцією є такі вимоги:

- відсутність просвітів між нитками обмотки, накладеної на дріт;
- відсутність розривів ниток при намотуванні дроту на сталевий стрижень діаметром, що дорівнює п'ятикратному діаметру дроту (але не менше 3 мм), з волокнистою ізоляцією у два шари, або при намотуванні дроту з одношаровою ізоляцією на стрижень діаметром, що дорівнює десятикратному діаметру дроту (але не менше 6 мм).

Електроізоляційні властивості обмоткових проводів із волокнистою ізоляцією відносно невисокі, оскільки всі види волокнистої ізоляції гігроскопічні, тобто поглинають вологу з повітря. Обмотки, виконані з проводів із волокнистою ізоляцією, потребують ретельного сушіння та просочення ізоляційними лаками або компаундами.

Мідні круглі (діаметром 0,36–5,20 мм) і прямокутні (перерізом 1,7–83,1 мм²) проводи із *двошаровою бавовняною ізоляцією* мають маркування ПВД. Алюмінієві проводи з таким само типом ізоляції мають маркування АПВД. Їх випускають діаметром 1,32–8,00 мм і перерізом 6,8–88,7 мм².

Проводи з *ізоляцією із двох шарів натурального шовку* випускають як із мідними прямокутними жилами перерізом 2,24–8,0 мм² (марки ПШД), так із жилами круглої форми з м'якого (марки ПШДКМ) і твердого (марки ПШДКТ) константану діаметром 0,09–0,4 мм і перерізом 6,8–88,7 мм².

Ізоляцію із двох шарів лавсанових ниток мають круглі мідні проводи марки ПЛД, які випускають діаметром 0,4–1,32 мм у дуже обмеженій кількості, оскільки лавсанова ізоляція має малу стійкість до ударних навантажень.

Круглі мідні проводи марок ПЕБО діаметром 0,4–2,2 мм, ПЕШО діаметром 0,05–1,5 мм, ПЕЛЮ діаметром 0,2–1,32 мм мають відповідно *ізоляцію з одного шару бавовняного, шовкового й лавсанового волокна* й належать до ТІ +105 °С. Такий же температурний індекс мають проводи марок ПЕВЛЮ, ПЕЛШКО, ПЕЛШКД, ПЕЛБД і т. д.

На ТІ +120 °С випускають проводи марок ПЕВТЛЛЮ діаметром 0,2–1,32 мм і ПЕПЛОТ діаметром 0,08–0,5 мм, а на ТІ +130 °С — проводи марки ПЕТВЛЮ діаметром 0,2–1,32 мм.

В *обмоткових проводах з емалево-волокнистою ізоляцією* поверх шару емалі наносять обмотку з бавовняної, шовкової, капронової або скляної пряжі. Такі проводи застосовують для важких умов роботи в тягових, шахтних електродвигунах та в інших електричних машинах та апаратах, де для емалевої ізоляції потрібне захисне покриття з волокнистого матеріалу й немає жорстких обмежень щодо товщини ізоляції. Найбільшу механічну міцність має обмотка проводів капроновими волокнами. Підвищеною нагрівостійкістю відрізняється обмотка зі скляної пряжі.

Плівкова ізоляція обмоткових проводів — стрічки з триацетатної плівки (триацетатцелюлоза), які накладають до поверхні проводу за допомогою клейких лаків (гліфталевих і кремнійорганічних). Обмоткові проводи з плівковою та пластмасовою ізоляцією виготовляють із мідних проводів, зокрема емальованих, шляхом покриття їх ізоляцією з лавсану (плівки або нитки), поліетилену, ПВХ пластикату, фторопласту тощо. Проводи відрізняються високою електричною міцністю, їх використовують переважно для обмоток заглиблених електродвигунів.

Проводи марок ПЕТВПДЛ-3 і ПЕТВПДЛ-4 випускають із мідними жилами діаметром 1,74–2,83 мм. Ізоляція цих проводів складається із шару поліестерної емалі, трьох (чотирьох) шарів лавсанової плівки, двох шарів лавсанової нитки з підклеюванням і просоченням поліестерною смолою марки ТФ-60 і належить до ТІ +120 °С.

Класичний приклад обмоткових проводів із плівковою ізоляцією — **паперова стрічка**, яку добре просочують мінеральним мастилом. Цим забезпечують високу електричну міцність ізоляції обмоток. Для підвищення механічної міцності паперової ізоляції зверху на неї накладають обмотку з бавовняної (проводи марок ПББО тощо) або капронової (проводи марок ППКО тощо) пряжі. Такі проводи становлять найбільш масову групу серед обмотувальних проводів для виготовлення обмоток трансформаторів. Для трансформаторів високої напруги використовують проводи марки ПБУ перерізом 12–109 мм² з ізоляцією з ущільненого високовольтного кабельного паперу завтовшки 0,08 мм.

Обмоткові проводи з пластмасовою ізоляцією належать до ТІ +105 °С, їх застосовують здебільшого для виготовлення обмоток заглиблених електродвигунів, які працюють у середовищі перекачування рідини за підвищених температур і тиску. Проводи випускають із мідною жилою номінального діаметра 2,24–7,8 мм. Проводи марок ПВДП-1 і ПВДП-2 мають двошарову ізоляцію з поліетилену низької і високої щільності, що дає змогу експлуатувати їх при напрузі відповідно 380 В і 660 В. На робочу напругу до 3 кВ виготовляють провід марки ППВЛ із двошаровою поліетиленовою ізоляцією.

Крім зазначених, випускають такі обмоткові проводи:

– **зі склоподібною ізоляцією**, які мають високу надійність, підвищену нагрівостійкість, стійкість до струмових перевантажень. Їх застосовують переважно для обмоток електродвигунів, що працюють у складних умовах (хімічне устаткування), електродвигунів для кранів, морських суден і сухих трансформаторів із повітряним охолодженням. Проводи з мідними й алюмінієвими жилами бувають круглого та прямокутного перерізу. За ТІ +155 °С виготовляють проводи з ізоляцією із двох шарів скловолокна, яке підклеюють і просочують гліфталевим лаком (дроти марок ПСД, ПСДТ, ПСД-Л, ПСДТ-Л, АПСД);

Розділ 2. Провідникові матеріали

– з *дельта-азбестовою ізоляцією* (марка ПДА), які використовують для виготовлення обмоток тягових електродвигунів;

– з *фторопластовою ізоляцією*, які використовують для обмоток електричних машин, що працюють в умовах підвищеної вологості, агресивного середовища й високої температури (+200–250 °С). Обмотувальний провід діаметром 0,05–1,00 мм марок ПФЕ-1 і ПФЕ-2 (з підвищеною товщиною ізоляції).

Монтажні проводи застосовують переважно короткими відрізками для нерухомої (фіксованої) прокладки при з'єднанні елементів усередині радіотехнічних пристроїв (табл. 2.10). Їх випускають із мідними струмопровідними жилами: одножильні й багатожильні, без ізоляції, луджені діаметром 0,64–1,35 мм і багатожильні луджені, ізольовані. За видом ізоляції проводи мають багато марок, але перша літера в них завжди М — монтажний, друга літера В — ПВХ ізоляція, П — поліетиленова, ПО — поліетиленова опромінена (модифікована), Р — гумова, З — зі скловолкна, Л — лавсанова, Ф — фторопластова, Ш — шовкова. Наступні літери позначають: К — капронова оболонка, Е — екран у вигляді облплетення з мідного дроту, Т — тропічне виконання, У — посилена жила тощо. Іноді на друге місце ставлять літеру Г — гнучкий.

За типом ізоляції монтажні проводи можна поділити на три групи.

Монтажні проводи загального застосування випускають із мідними лудженими жилами з волокнистою, пластмасовою та комбінованою ізоляцією в капроновій оболонці або без неї. Вони призначені для роботи, коли напруга змінюється до 1000 В у діапазоні температур від –60 до +70 °С.

Нагрівостійкі монтажні проводи виготовляють із застосуванням ізоляції зі шзшитого поліетилену, кремнійорганічної гуми, фторопластів, а також комбінації скловолкна з фторопластовою плівкою, що дає змогу використовувати їх в інтервалі температур від –60 до +250 °С.

Високовольтні монтажні проводи з поліетиленовою ізоляцією використовують, коли напруга становить 2; 2,5 і 4 кВ в інтервалі температур від –60 до +85 °С.

Таблиця 2.10

Марки, характеристики та сфера застосування монтажних проводів

Марка проводу	Характеристика	Інтервал робочих температур, °С	Сфера застосування
ОШП	З одиночних дротів, ізольований обмоткою з шовку в поліетилені	–60 ... +70	Для фіксованого внутрішнього та міжприладового монтажу

2.13. Провідникові вироби

Продовження табл.

МШВ	З одиночних дротів, ізолюваний подвійною обмоткою із штучного або просоченого натурального шовку та ПВХ	-60 ... +70	Для фіксованого внутрішнього та міжприладового монтажу електричних пристроїв
МГП	Багатодротовий, ізолюваний поліетиленом	-60 ... +120	Те саме при будь-якому розрядженні атмосферного тиску
МГШ	Багатодротовий, ізолюваний обмоткою зі штучного шовку	-60 ... +105	Те саме за умов, які потребують підвищеної механічної надійності проводу
МГВ	Багатодротовий, ізолюваний ПВХ	-40 ... +70	Для фіксованого монтажу схем слабкострумової РЕА та електроприладів
ПМВ	З одиночних дротів, ізолюваний ПВХ	-60 ... +50	Для фіксованого монтажу слабкострумової РЕА
МГТФ	Багатодротовий, ізолюваний стрічками із фторопласту	-60 ... +220	Для монтажу схем слабкострумової апаратури, що працює за підвищеної температури середовища
МГТЛ	Багатодротовий, ізолюваний обмоткою та обплетенням із лавсанового волокна, лакований	-60 ... +150	Фіксований і нефіксований монтаж усередині приладів та електричних пристроїв
ПТЛ-200	Багатодротовий, ізолюваний стрічками із фторопласту-4 та лакований обплетенням зі скловолокна	-60 – +250	Для монтажу схем апаратури, яка працює за підвищених температур навколишнього середовища

Настановні проводи й шнури застосовують для нерухомих прокладок у силових та освітлювальних установках як на відкритому повітрі, так і всередині приміщень, а також для живлення електродвигунів, підключення промислових і лабораторних приладів та апаратів. Такі проводи використовують із напругою 380, 660 і 3000 В. Вони бувають круглої та плоскої форми з мідними й алюмінієвими жилами, скрученими або розташованими паралельно. Жили ізолюють електроізоляційною

Розділ 2. Провідникові матеріали

гумою, поліетиленом або ПВХ пластикатом. Поверх ізоляції може бути накладено захисний покрив — обплетення з бавовняної або шовкової пряжі, інколи його просочують протигнільним складом. В окремих конструкціях проводів зовнішню обмотку виготовляють зі сталевих оцинкованих дротів для захисту від легких механічних впливів.

Настановні проводи з гумовою ізоляцією (ПРТО, АПРН тощо) допускають тривале нагрівання до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$; при використанні теплостійкої гуми на основі бутилкаучуку — до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, а проводи з кремнійорганічною гумовою ізоляцією працюють за $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$. У деяких випадках ці проводи можуть мати гумову (ПРПП), пластмасову (ПРВД) або металеву (ПРФЛ) оболонку.

Настановні проводи з пластмасовою ізоляцією (поліетиленова або з ПВХ) допускають нагрівання до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Їхні основні марки — АПВ, АППВ, ПВ, ППВ (рис. 2.50). Літера А свідчить про те, що жили з алюмінію; якщо літера А відсутня — жили мідні. Застосування проводів саме з ПВХ ізоляцією забезпечує високу водостійкість, маслостійкість і негорючість проводки.

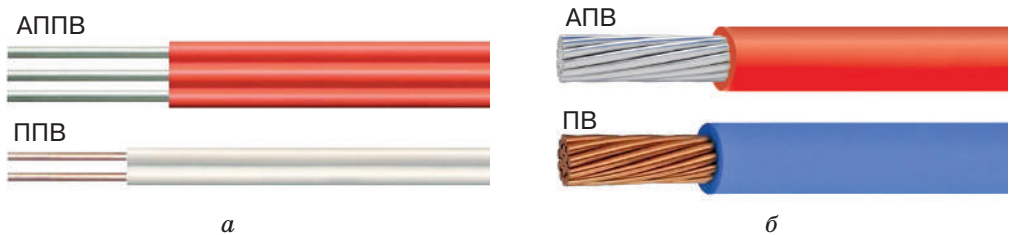


Рис. 2.50. Проводи настановні, ізоляція з ПВХ пластикату:
а) трижильний алюмінієвий (АППВ) і двожильний мідний (ППВ);
б) одножильний багатодрововий алюмінієвий (АПВ) і мідний (ПВ)

Шнури випускають двожильні й трижильні; жили звиті між собою з лівим направленням скручування. Для забезпечення більшої гнучкості жили шнурів виготовляють багатодрововими (рис. 2.51).



Рис. 2.51. Електричні настановні шнури для електропроводки на роликах

2.13. Провідникові вироби

У таблиці 2.11 подано основний асортимент настановних проводів і шнурів.

Таблиця 2.11

Марки, елементи конструкції та сфера застосування деяких настановних проводів і шнурів

Марка проводу	Переріз жили, мм ²	Кількість жил	Характеристика проводу	Сфера застосування
АПВ	2,5–120	1	Провід з алюмінієвою жилою та ПВХ ізоляцією	Монтаж силових і освітлювальних мереж, для прокладення в сталевих трубах, пустотних каналах будівельних конструкцій
АППВ	2,5–6	2; 3	Провід з алюмінієвими жилами, ПВХ ізоляцією, плоский, з роздільною основою	Нерухомий монтаж силових та освітлювальних мереж; для відкритої прокладки по негорючих конструкціях; під час закладання в будівельні конструкції
АППР	2,5–10	2; 3; 4	Провід з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, що не поширює горіння	Монтаж силових та освітлювальних мереж усередині приміщень, у вторинних колах
АПР	2,5–120	1	Провід з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, в оболонці з бавовняної тканини, просоченої протигнільним складом	Для відкритої прокладки на роликах та ізоляторах, а також для прокладення в трубах і коробах у сухих і вологих приміщеннях
ППВ	0,5–2,5	2; 3	Провід плоский із мідними жилами, ПВХ ізоляцією, з роздільною основою	Нерухомий монтаж силових та освітлювальних мереж
ПВ-3	0,5–95	1	Провід із мідною жилою, ПВХ ізоляцією, гнучкий	Гнучкий монтаж силових та освітлювальних мереж, вторинних мереж

ПРГ	0,75–120	1	Провід гнучкий із мідною жилою, гумовою ізоляцією	Приєднання електричних машин та апаратів усередині приміщення; прокладання по стінах, у металевих рукавах
ШВП	0,5–1,5	2	Шнур із мідними жилами, ПВХ ізоляцією	Освітлювальні мережі з напругою 220 В усередині приміщень; приєднання переносних струмоприймачів
ШР	0,5–0,75	2	Шнур гнучкий, з паралельними мідними жилами, гумовою ізоляцією	Для приєднання нагрівальних приладів на змінну напругу до 380 В

Силові кабелі призначені для передавання та розподілу електроенергії. Будова силового кабелю залежить від сфери його застосування, але є чотири основні елементи, без яких не обходиться жодна марка. Сучасні силові кабелі складаються з струмопровідних жил, ізоляції кожної жили, оболонки, зовнішнього захисного покриття (рис. 2.52). Загальну ізоляцію жил називають *поясною*.

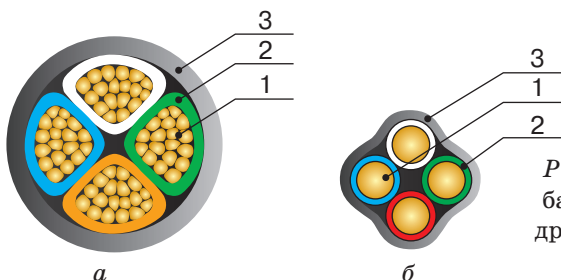


Рис. 2.52. Жили в кабелі: а) секторні багатодровові; б) круглі з одиночних дровів; 1 — жила; 2 — ізоляція жили; 3 — оболонка кабелю

Як матеріали струмопровідних жил зазвичай використовують алюміній або мідь. Кількість струмопровідних жил варіює від однієї до п'яти. Вони можуть бути круглими, трикутними й секторними; складатися з одиночного дроту або багатьох переплетьених дротів. Дроти в кабелі прокладають паралельно або скручують.

Кожна жила силового кабелю ізолювана гумою, ПВХ пластикатом, поліетиленом або просоченим папером. Ізолювані жили поміщають в оболонку, виготовлену зі свинцю, ПВХ пластикату, світлостійкої гуми або алюмінію.

Позначення маркування кабелів можна розшифрувати так: як і в проводах, у маркуванні кабелів літера А позначає матеріал струмопровідних жил — алюміній. Якщо немає літери А, це означає, що жили

кабелю з міді. Літера С позначає матеріал захисної оболонки кабелю — свинцева. Літера Б позначає наявність броньованого захисту у вигляді сталевих стрічок. Додатковий символ «л» свідчить про те, що кабель має додатковий захисний шар у вигляді бітумної стрічки, що знаходиться під бронєю. Цифри в маркуванні позначають кількість жил і площу перерізу окремої жили у квадратних міліметрах. Наприклад, маркування *АСБ-3×50* означає: кабель з алюмінієвими жилами зі свинцевою оболонкою, з бронєю зі сталевих стрічок, з трьома жилами, кожна з яких має переріз 50 мм^2 . Розгляньте будову кабелю та застосовані матеріали на *рисунку 2.53*.

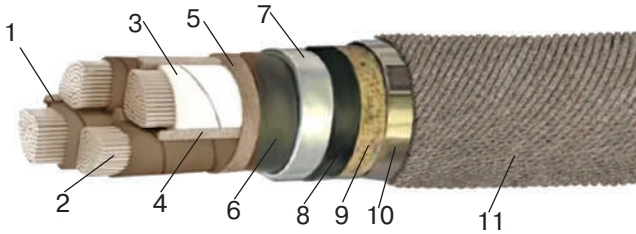


Рис. 2.53. Будова кабелю з паперовою ізоляцією жил:

1, 4 — заповнювач; 2 — алюмінієва багатодротова жила; 3 — паперова ізоляція жили, просочена в'язким нестікаючим складом; 5 — поясна ізоляція; 6 — екран; 7 — свинцева оболонка; 8 — подушка з бітуму; 9 — подушка з паперу; 10 — броня зі сталевих стрічок; 11 — зовнішній покрив із волокнистих матеріалів

Кабель марки ВВГ (*рис. 2.54*) випускають різних модифікацій. Це універсальний, міцний і гнучкий виріб з якісними мідними жилами, надійною ізоляцією з полівінілхлориду, не схильний до горіння. Поєднання всіх перелічених переваг цього кабелю робить його незамінним для електромонтерів, які займаються вкладанням і підключенням кабельних мереж.

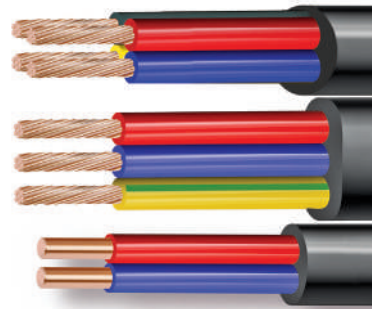


Рис. 2.54. Модифікації кабелю марки ВВГ із ПВХ ізоляцією жил

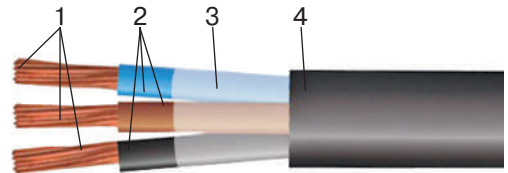
Гнучкий кабель марки КГ (рис. 2.55, с. 72) призначений для приєднання пересувних електричних пристроїв та устаткування (можна застосовувати як зварювальний) до мережі живлення напругою до 660 В і частотою до 400 Гц, а також до мережі постійного струму напругою до 1000 В. Найчастіше кабель КГ має чотири жили, одна з яких — жила

Розділ 2. Провідникові матеріали

для заземлення, а решта — фазні провідники. Жила для заземлення має переріз менший, ніж фазні жили. Струмopровідні жили складаються з гнучких, тонких, мідних луджених дротів, що гарантує значну кількість можливих згинів кабелю.

Рис. 2.55. Будова кабелю марки КГ із гумовою ізоляцією жил:

1 — струмопровідна жила; 2 — гумова ізоляція жили; 3 — спеціальна плівка, що оберігає жили від злипання; 4 — гумова оболонка кабелю



ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Як змінюється електропровідність металів із підвищенням температури?
2. Дайте визначення поняття *теплове розширення*. У яких електротехнічних пристроях знайшла використання різниця коефіцієнтів теплового розширення металів?
3. Назвіть найбільш поширені матеріали високої провідності, які застосовують в електротехніці й радіоелектроніці.
4. Що вам відомо про плівкові резистивні матеріали?
5. Назвіть матеріали, з яких виготовляють термопар. Які властивості вони мають?
6. Назвіть відомі вам дорогоцінні метали. Які властивості вони мають? Яке їх призначення в електротехнічному виробництві?
7. Які властивості мають антифрикційні (підшипникові) сплави?
8. Які речовини використовують як сировину для електровугільних виробів?
9. Які матеріали застосовують для виготовлення різних видів контактів?
10. Назвіть способи захисту металевих виробів від корозії.
11. Які припої застосовують для паяння різних провідникових матеріалів?
12. Яке призначення монтажних, обмоткових та настановних проводів? З якою ізоляцією і якими жилами їх виготовляють?
13. Виконайте тестові завдання.

• Визначте, який метал має найвищий питомий опір

А срібло

В олово

Б мідь

Г вольфрам

• Установіть відповідність між металом та його застосуванням в електротехніці:

Метал або сплав

1 Мідь

2 Латунь

3 Альдрей

4 Вольфрам

5 Хром

6 Ніхром

7 Манганін

8 Срібло

9 Платина

10 Олово

11 Електротехнічна сталь

Застосування

А виготовлення термопар

Б еталонні резистори

В жили проводів

Г нитки розжарювання

Д виготовлення магнітопроводів

Е у нагрівальних приладах

Є як захисне покриття

Ж у складі припоїв

З пружні контакти

И покриття контактів

І проводи ЛЕП

Розділ 3

ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Класифікація та галузі застосування діелектричних матеріалів

Діелектрики — речовини, матеріали, у яких електропровідність практично відсутня (унаслідок невеликої кількості вільних електронів та йонів), тобто за нормальних умов експлуатації вони практично не проводять електричний струм і мають високий питомий опір ($\rho \approx 10^6\text{--}10^{16}$ Ом·м). Ще однією електричною властивістю діелектриків є їхня здатність поляризуватися в електричному полі.

Діелектричні матеріали становлять найчисленнішу групу електротехнічних матеріалів як за різноманітністю та властивостями, так і за їхнім застосуванням в електротехніці.

Електроізоляційні матеріали — діелектричні матеріали, призначені для створення електричної ізоляції струмопровідних частин електротехнічних установок. Діелектрики, які використовують як електроізоляційні матеріали, називають *пасивними діелектриками*.

З практичної точки зору в кожному випадку вибору матеріалу електричної ізоляції необхідно аналізувати умови роботи й вибирати діелектрик відповідно до комплексу вимог до нього. Для орієнтування доцільно поділити основні діелектричні матеріали на групи за умовами застосування:

– *лінійна й підстанційна ізоляція* — фарфор, скло та кремнійорганічна гума в підвісних ізоляторах повітряних ліній; фарфор в опорних і прохідних ізоляторах; склопластики як несучі елементи; поліетилен, папір у високовольтних вводах; папір і полімери в силових кабелях;

– *ізоляція електричних приладів* — папір, гетинакс, склотекстоліт, полімери, слюдяні матеріали;

– *ізоляція в електричних машинах та апаратах* — папір, електрокартон, міканіт, фібра, тканини, лаки, компаунди, полімери;

– *конденсатори різних видів* — полімерні плівки, папір, слюда, кераміка.

Нині широко застосовують *активні діелектрики*, параметри яких можна регулювати, змінюючи напруженість електричного поля, температуру, механічне напруження й інші параметри факторів, що впливають на них. До активних діелектриків належать *сегнетоелектрики*, *п'єзоелектрики* й *електрети*. Наприклад, конденсатори з керованими (активними) діелектриками можуть бути використані для посилення сигналів за потужністю, створення різних перетворювачів, елементів пам'яті, датчиків деяких фізичних процесів і генерації коливань. Конденсатор, діелектричним матеріалом у якому є п'єзоелектрик, під

Розділ 3. Діелектричні матеріали

дією прикладеної змінної напруги стає генератором ультразвукових коливань. Ємність електричного конденсатора, виконаного із застосуванням сегнетоелектрика, змінюється залежно від напруженості електричного поля, а якщо така ємність включена в коливальний LC-контур, то змінюється і його частота налаштування.

Діелектричні матеріали класифікують за:

– *агрегатним станом* — тверді, рідкі та газоподібні. Виокремлюють діелектричні матеріали, що твердішають. У вихідному стані вони рідини, а після застосування, у період експлуатації, є твердими речовинами — лаки, емалі, компаунди;

– *способом отримання* — природні й синтетичні;

– *хімічним складом* — органічні та неорганічні;

– *будовою молекул* — нейтральні (неполярні) й полярні.

За будовою діелектрики бувають:

– **неполярні**, що складаються з атомів або молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються (рис. 3.1, а);

– **полярні**, що складаються з молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються (рис. 3.1, б).

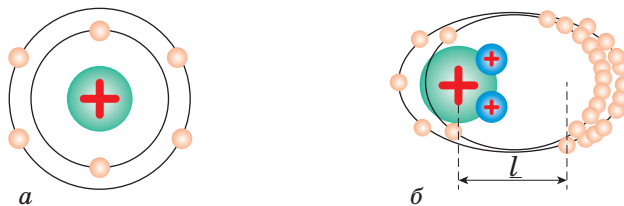


Рис. 3.1. Види діелектриків: а) неполярні; б) полярні

Неполярні діелектрики мають тільки електронну поляризацію. До цієї групи належать нейтральні й слабкополярні тверді речовини в кристалічному й амфотерному станах (парафін, фторопласт-4, полістирол, поліетилен тощо), неполярні рідини (трансформаторне або конденсаторне масло) і гази (повітря, азот, водень, інертні гази).

Розглянемо процеси в *неполярному діелектрику* (рис. 3.2), уміщеному в зовнішнє електричне поле, наприклад між різнойменно зарядженими пластинами. За відсутності зовнішнього поля позитивно й негативно заряджені частинки, що входять у молекули (атоми) неполярного діелектрика, ніби врівноважують одна одну (власне поле відсутнє); їхні молекули є електрично нейтральними або неполярними. Під дією зовнішнього поля відбувається зміщення електричного центра негативних зарядів (електронів) назустріч напрямку поля, і з точки зору електричних властивостей таку молекулу в зовнішньому полі можна розглядати як **диполь** — молекула з розділеним (полярним) електричним зарядом, поле якої спрямоване протилежно до зовнішнього поля.

3.2. Властивості діелектричних матеріалів

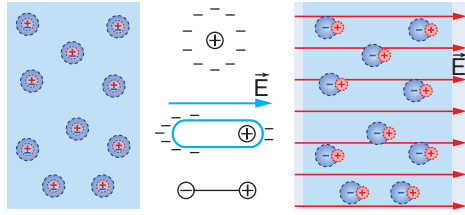


Рис. 3.2. Поляризація неполярних діелектриків

Молекули *полярних діелектриків* є електричними диполями, що мають постійний дипольний момент унаслідок асиметрії центра мас позитивних і негативних зарядів (рис. 3.3). Полярні діелектрики мають електронний та дипольний види поляризації. До цієї групи належать полярні рідкі діелектрики (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, спирти, чиста вода) та органічні полярні діелектрики (папір, текстоліт, гетинакс, тканини тощо).

Якщо полярний діелектрик помістити в електричне поле, то диполі починають повертатися своїми позитивно зарядженими кінцями до негативно зарядженої пластини, а негативно зарядженими — до позитивно зарядженої. У результаті на поверхні діелектрика біля позитивної пластини виникає тонкий шар негативних зарядів, а біля негативно зарядженої — позитивних, які й створюють зустрічне поле. За відсутності поля диполі дезорієнтуються внаслідок теплового руху.

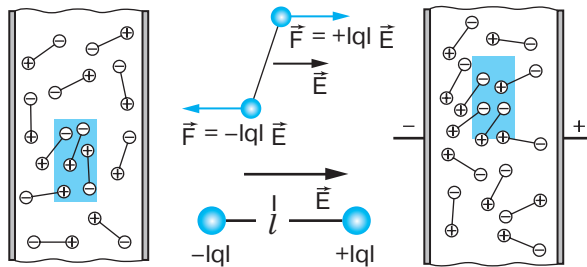


Рис. 3.3. Поляризація полярних діелектриків

3.2. Властивості діелектричних матеріалів

Діелектричні матеріали класифікують за внутрішньовидовими ознаками, які визначаються їхніми основними характеристиками: електричними, механічними, фізико-хімічними, тепловими.

3.2.1. Електричні властивості діелектриків

Молекули складаються з атомів, оточених електронними оболонками, при цьому електрони можуть рівномірно розподілятися по молекулі, а можуть і концентруватися на будь-яких атомах. У першому випадку говорять, що *молекула неполярна*. Приклад — молекула водню, або

атом гелію, або молекула бензену. У другому випадку в молекулі утворюються ділянки з позитивним і негативним зарядом. Якщо в молекулі можна визначити напрямок, уздовж якого з одного боку можна розташувати позитивні заряди, а з іншого боку — негативні, то така молекула має назву *полярна*, або *дипольна*. Наприклад, молекула HCl, у якій електрон переходить з атома гідрогена на атом хлору, тому хлор заряджається негативно, а гідроген — позитивно.

За відсутності зовнішнього електричного поля всі зв'язані й вільні заряджені частинки діелектрика, а також його полярні молекули (диполі) розташовані так, що загальний електричний дипольний момент усіх мікроскопічних обсягів дорівнює або близький до нуля.

Під дією прикладеного електричного поля всі зв'язані одна з одною заряджені частинки діелектрика трохи зміщуються зі своїх рівноважних положень на обмежені відстані — негативний заряд щодо позитивного. Виникає поляризація діелектрика, його результуючий дипольний момент стає відмінним від нуля.

Поляризація — це процес, коли під дією зовнішнього електричного поля відбувається обмежене переміщення зв'язаних заряджених частинок і деяке впорядкування в розташуванні диполів, що здійснюють хаотичний тепловий рух, у результаті чого в діелектрику утворюється результуючий електричний дипольний момент.

Потрібно розрізняти дві основні групи поляризації:

– *пружна* (або *деформаційна*) *поляризація* відбувається в діелектрику під дією електричного поля практично миттєво, без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла;

– *релаксаційна поляризація* наростає і зменшується уповільнено й супроводжується нагріванням діелектрика.

Група поляризації залежить насамперед від того, які частинки діелектрика, зміщуючись, викликають поляризацію, а також на які відстані частинки зміщуються. Пружно зв'язані заряди мають одне положення рівноваги, біля якого вони здійснюють тепловий рух. Під дією електричного поля вони зміщуються на невеликі відстані: електрони зміщуються в межах атома або йона, атоми — у межах молекули, йони — у межах осередку кристалічної ґратки тощо. Слабко пов'язані заряди (наприклад, йони в нещільно упакованій кристалічній ґратці, в аморфному тілі або на дефектах будови) мають кілька положень рівноваги, у яких вони розташовуються випадково під час теплового руху. Електричне поле надає таким переходам спрямованого характеру. Зсув слабо пов'язаних частинок відбувається на набагато більші відстані, ніж для пружно зв'язаних зарядів.

Зовнішнє електричне поле індукує в частинках діелектрика елементарні електричні моменти. В утворенні індукованих полем електричних моментів можуть брати участь: електрони, що зміщуються з рівноваж-

них станів в атомах відносно позитивно зарядженого ядра; йони, які відхиляються від рівноважного стану в кристалічній ґратці; диполі (полярні молекули або радикали), які під дією поля змінюють свою орієнтацію.

Існують основні види пружної поляризації — електронна, йонна, дипольна.

Електронна поляризація — пружний зсув і деформація електронних оболонок відносно ядра в атомах діелектрика. Вона характерна для всіх діелектриків і не пов'язана з втратами енергії. Час електронної поляризації — близько 10^{-15} с. Після зняття електричного поля електронна поляризація зникає. Оскільки поляризація визначається пружною деформацією електронних оболонок атомів, то вона не повинна залежати від температури. Однак через розширення тіла при нагріванні електричний момент одиниці об'єму речовини зменшується, і діелектрична проникність діелектриків з електронним видом поляризації з підвищенням температури зменшується практично лінійно. Оскільки час релаксації менше 10^{-15} с, діелектрична проникність від частоти майже не залежить.

Йонна поляризація характерна для твердих діелектриків з йонною будовою та обумовлена пружним зсувом йонів на відстані, які не перевищують параметр кристалічної ґратки. Час йонної поляризації близько 10^{-13} с. З підвищенням температури йонна поляризація підсилюється в результаті ослаблення пружних сил, що діють між йонами. Від частоти електричного поля діелектрична проникність майже не залежить, тому діелектрики з йонним видом поляризації широко застосовують при високих частотах.

Дипольна поляризація обумовлена поворотом (орієнтацією) дипольних молекул у напрямку електричного поля й пов'язана з тепловим рухом частинок. З підвищенням температури дипольна поляризація зростає доти, доки ослаблення молекулярних сил не виявиться сильнішим, ніж зростання хаотичного теплового руху молекул. Коли хаотичний рух стає інтенсивнішим і починає переважати над орієнтацією молекул, дипольна поляризація зменшується. Ця поляризація характерна для полярних газів і рідин. Крім того, її спостерігають у твердих полярних діелектриках. Час дипольної поляризації — 10^{-2} – 10^{-8} с. Діелектрична проникність при дипольній поляризації залежить від частоти. При високих частотах диполі не встигають стежити за зміною електричного поля, і діелектрична проникність зменшується. Через це полярні діелектрики не використовують на високих частотах.

Релаксаційна (непружна) поляризація — повільний вид поляризації. Для її здійснення потрібно затратити певну енергію, яка потім виділяється у вигляді тепла при поверненні діелектрика в початковий стан. Релаксаційна поляризація виникає при зміщенні слабо пов'язаних електронів, йонів або дипольних молекул. Її поява зазвичай обумовлена дефектами кристалічної ґратки. Слабко зв'язані частинки здійснюють

Розділ 3. Діелектричні матеріали

не тільки теплові коливання щодо деякої рівноваги в кристалічній ґратці, а й під дією теплового руху стрибком змінюють своє рівноважне становище: роблять теплові перескоки, переміщуючись на відстань атомних розмірів.

У чому ж полягає принцип поляризації? Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку сил, які більше діють на них, якщо вища напруженість поля. Дипольні моменти створюють своє електричне поле, яке протидіє тому полю, що зумовило їхню появу. Як наслідок, сумарне електричне поле зменшується.

Явище поляризації характеризують за значенням діелектричної проникності. **Діелектричною проникністю ϵ** називають параметр матеріалу, що характеризує його здатність утворювати ємність і показує, у скільки разів збільшується ємність конденсатора, коли між його пластинами внесено певний діелектричний матеріал порівняно з вакуумом:

$$C = \epsilon \cdot C_0,$$

де C_0 — ємність вакуумного конденсатора.

Ємність конденсатора залежить і від його геометричних розмірів, і від властивостей матеріалу діелектрика:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{h},$$

де S — площа обкладок конденсатора, м²;

h — товщина діелектрика, м;

ϵ_0 — електрична стала, $\epsilon_0 = 8,85416 \times 10^{12}$, Ф/м;

ϵ — діелектрична проникність матеріалу, величина безмірна.

Добуток ($\epsilon_0 \times \epsilon$) називають **абсолютною діелектричною проникністю $\epsilon_{\text{абс}}$** . Її визначено для всіх діелектриків і занесено до таблиць. Наприклад, для чистої води $\epsilon = 81$, для електрофарфору $\epsilon = 8,5$, для трансформаторного масла $\epsilon = 2,5$.

Значення ϵ різних діелектриків по-різному залежить від температури матеріалу (рис. 3.4; рис. 3.5) і від частоти прикладеної напруги.

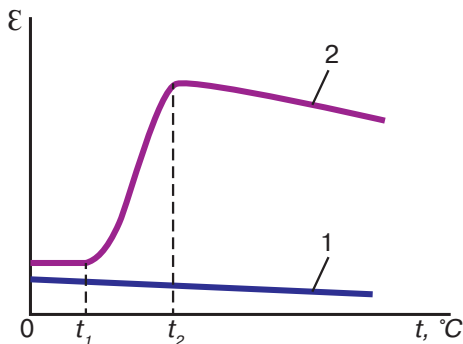


Рис. 3.4. Залежність діелектричної проникності ϵ від температури діелектрика: 1 — неполярний діелектрик; 2 — полярний діелектрик

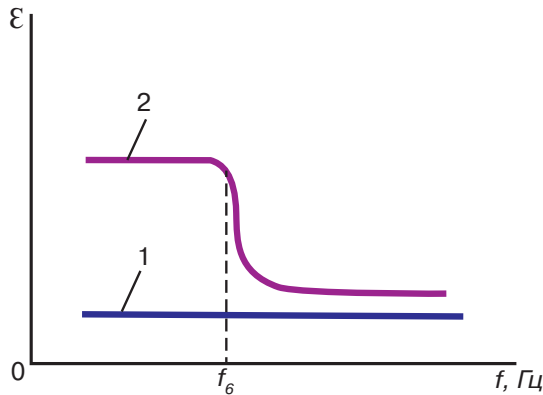


Рис. 3.5. Залежність діелектричної проникності ϵ від частоти напруги: 1 — неполярний діелектрик; 2 — полярний діелектрик

До основних електричних властивостей діелектриків, крім поляризації, належать *електричний опір, електропровідність, діелектричні втрати, пробій, електрична міцність*.

Діелектрики мають високий *електричний опір* і дуже слабо проводять електричний струм. Оскільки їх використовують як ізоляційні матеріали, то їхній електричний опір є діагностичним параметром стану ізоляції. Якщо під час вимірювання опору ізоляції виявляється, що він нижчий за певне нормативне значення, це свідчить про можливе пошкодження або «старіння» ізоляції та про неможливість її подальшої експлуатації.

Опір діелектрика, покладеного між двома електродами, при постійній напрузі, тобто опір ізоляції $R_{із}$, можна обчислити за формулою:

$$R_{із} = \frac{U}{I_{вит} - I_{поляр}},$$

де U — прикладена напруга, В;

$I_{вит}$ — струм витоку, що спостерігається, А;

$I_{поляр}$ — сума струмів, викликаних поляризацією, А.

За нормальних умов питомий опір діелектрика має значення понад 10^8 Ом · м. Розрізняють питомий опір: об'ємний ρ_v і поверхневий ρ_s .

Питомий об'ємний опір ρ_v твердого діелектрика за значенням дорівнює об'ємному опору куба матеріалу з ребром 1 м при проходженні наскрізного струму між двома протилежними гранями цього куба (рис. 3.6, с. 80); одиниця виміру — Ом · м:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h},$$

де R_v — об'ємний опір зразка матеріалу, Ом;

S — площа електродів, що знаходяться в контакт з зразком, м²;

h — товщина зразка, м.

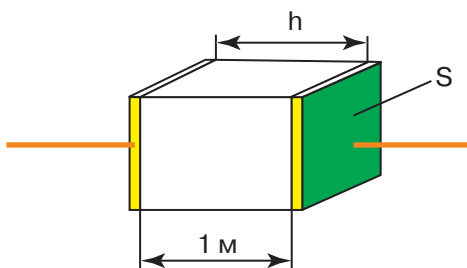


Рис. 3.6. Приклад питомого об'ємного опору

Питомий поверхневий опір ρ_s твердого діелектрика за значенням дорівнює поверхневому опору плоскої ділянки поверхні матеріалу у формі квадрата довільного розміру при проходженні наскрізного струму між його двома протилежними сторонами (рис. 3.7); одиниця виміру — Ом:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l},$$

де R_s — поверхневий опір зразка матеріалу, Ом;

d — ширина електродів, м;

l — відстань між електродами, м.

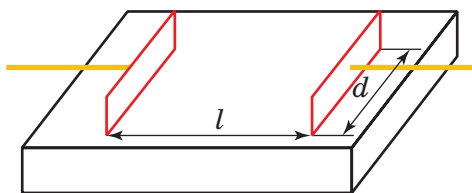


Рис. 3.7. Приклад питомого поверхневого опору

Повний опір ізоляції дорівнює:

$$R_{\text{із}} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}.$$

У природі немає такого матеріалу, який би так чи інакше не проводив електричний струм. Наявність у технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів призводить до виникнення слабких наскрізних струмів.

Електропровідність діелектриків має дві характерні особливості. *Перша особливість* — струм витоку має об'ємну та поверхневу складові. Струм, який протікає через об'єм діелектрика, називають *об'ємним*, а той, що протікає по його поверхні, — *поверхневим*. Оскільки ці струми сумарні за величиною, то при визначенні електропровідності діелектриків потрібно враховувати як об'ємну, так і поверхневу складову струму витоку:

$$I_{\text{вит}} = I_s + I_v,$$

де I_s — поверхнева складова струму витоку, А;

I_v — об'ємна складова струму витоку, А.

3.2. Властивості діелектричних матеріалів

Друга особливість — при підключенні постійної напруги струм у діелектрику спочатку стрімко зростає, а потім поступово зменшується до певного постійного значення — *струму наскрізної провідності* $I_{\text{наск}}$. Струм, який спадає з моменту прикладення постійної напруги до значення струму наскрізної провідності, називають *струмом зміщення* $I_{\text{зм}}$.

Отже, струм, що проходить крізь діелектрик, є сумою струмів:

$$I = I_{\text{зм}} + I_{\text{наск}}.$$

Електропровідність діелектриків із постійною напругою визначають так:

$$G = \frac{I_{\text{наск}}}{U}.$$

Електропровідність діелектриків має переважно йонний характер (тобто носіями зарядів є йони), тому залежить від агрегатного стану, а також від вологості й температури довкілля. При тривалій роботі діелектрика під напругою наскрізний струм, що проходить крізь нього, може зменшуватися або збільшуватися. Збільшення струму свідчить про участь у провідності зарядів, які є структурними елементами самого матеріалу. Незворотний процес нейтралізації йонів у діелектрику називають *його «старінням» під напругою*. Такий процес здатний поступово привести діелектрик до руйнування — пробую.

Електричний струм у діелектриках пропорційний до напруженості електричного поля E . Однак у досить сильних полях струм зростає швидше, ніж за законом Ома, і при деякому критичному значенні напруженості електричного поля $E_{\text{пр}}$ настає *електричний пробій* діелектрика. Ізоляція не може витримувати необмежено велику напругу без пошкодження. Руйнуються молекулярні зв'язки, діелектрик втрачає свої ізоляційні властивості, у ньому утворюється канал, що добре проводить струм. Властивості діелектрика при цьому можуть змінитися.

Значення напруги, при якій стається пробій, називають *пробивною напругою* $U_{\text{пр}}$, а відповідне значення напруженості поля — *електричною міцністю* діелектрика. Пробій (тривалий чи короточасний) призводить до втрат діелектричних властивостей матеріалу й утворення каналу з високою електричною провідністю.

Електричну міцність діелектрика (кВ/м) в місці пробую визначають за формулою:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

де $U_{\text{пр}}$ — пробивна напруга, при якій настає пробій діелектрика, кВ;
 h — товщина діелектрика в місці пробую, м.

Електрична міцність $E_{\text{пр}}$ характеризує ізоляційний матеріал, а не електроізоляційну конструкцію.

Розділ 3. Діелектричні матеріали

Високу пробивну напругу $U_{\text{пр}}$ ізоляції досягають двома шляхами — збільшенням товщини ізоляції та вибором більш якісного діелектрика. Робоча напруга, прикладена до ізоляції, завжди має бути меншою за пробивну напругу. Ізоляція повинна мати запас електричної міцності.

Електротепловий пробій діелектрика пов'язаний із нагріванням його електричним струмом, що протікає (рис. 3.8). Електричний струм може досягти такого значення, при якому діелектрик термічно руйнується (плавиться, обуглюється).

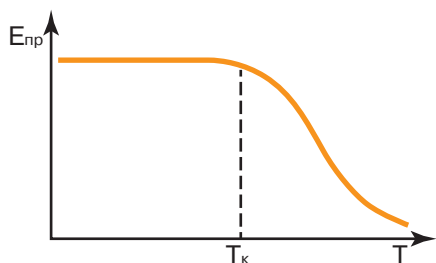


Рис. 3.8. Залежність електричної міцності від температури діелектрика

Діелектричні втрати — це енергія, яка розсіюється в матеріалі під впливом електричних полів. Через цю енергію матеріал нагрівається, через що може статися його теплове руйнування та інші несприятливі наслідки, як-от: передчасне «старіння», руйнування і розплавлення.

Втрати в діелектриках спостерігають як під час змінної напруги, так і за постійної, оскільки в матеріалі є наскрізний струм, зумовлений провідністю. Що вища частота та значення напруги, то більші втрати. Вони також зростають зі збільшенням ємності й залежать від матеріалу діелектрика. При розгляді діелектричних втрат зазвичай мають на увазі втрати із змінною напругою, тому що вони в багато разів більші, ніж із постійною.

Втрати потужності в діелектрику оцінюють кутом діелектричних втрат, а також тангенсом цього кута $\text{tg } \delta$ (рис. 3.9). **Кутом діелектричних втрат** називають **кут δ** , що доповнює до 90° кут зсуву фаз φ між струмом і напругою в конденсаторному ланцюзі.

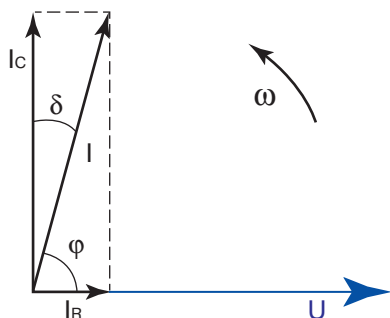


Рис. 3.9. Кут діелектричних втрат

3.2. Властивості діелектричних матеріалів

Якби в діелектрику конденсатора потужність не розсіювалася (ідеальний діелектрик), то вектор струму випереджав би вектор напруги на 90° і струм був би суто реактивним. При цьому кут $\delta = 0$, а це означає, що в ідеальному діелектрику втрат енергії немає. Що більші діелектричні втрати в діелектрику (тобто енергія, що розсіюється як тепло), то меншим є кут зсуву фаз ϕ і більшим — кут діелектричних втрат δ і $\operatorname{tg} \delta$ (див. рис. 3.9).

Тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ дорівнює відношенню активного (I_R) і реактивного (I_C) струмів:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C}.$$

Він не залежить від форми поля, розмірів і форми зразка. Його широко застосовують для оцінювання діелектричних втрат.

Діелектричні втрати (потужність, що розсіюється) P_R ділянки ізоляції з ємністю C під впливом змінної напруги дорівнюють:

$$P_R = U \cdot I_R,$$

де U — прикладена до діелектрика напруга, В;

I_R — активна складова струму, що протікає через діелектрик, А.

Схема заміщення діелектрика зазвичай виглядає як послідовно з'єднані конденсатор та активний опір. З векторної діаграми (рис. 3.9) випливає:

$$I_R = I_C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

де δ — кут між вектором повного струму I та його ємнісною складовою I_C .

Отже,

$$P_R = U \cdot I_C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

але струм:

$$I_C = U \cdot \omega \cdot C,$$

де C — ємність конденсатора (діелектрика) при кутовій частоті ω .

У результаті потужність, що розсіюється в діелектрику, дорівнює:

$$P_R = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

Вираз прийнятний для будь-яких розмірів і конфігурації ділянки ізоляції. Кут δ характеризує якість діелектрика. Що менший кут діелектричних втрат δ , то вищі діелектричні властивості ізоляційного матеріалу.

3.2.2. Механічні властивості діелектриків

Вироби з діелектричних матеріалів також зазнають впливу механічних навантажень, тому велике практичне значення мають їхні пружність, механічна міцність, здатність не деформуватися під дією механічних напружень, в'язкість.

Пружність — властивість тіл відновлювати свою форму й об'єм після припинення дії зовнішніх сил, що спричинили їхню деформацію. При невеликих механічних напруженнях після зняття навантаження форма зразка відновлюється. Але з деякого значення механічного напруження форма зразка не відновлюється.

Міцність матеріалів характеризують межами механічного напруження, яке визначають під час різних видів деформування зразків: розтягування, стиснення, згинання. З механічного напруження виникає холодна пластична текучість матеріалу, коли навіть після зняття механічного напруження форма зразка не відновлюється. Таке значення напруження називають *границею текучості* $\sigma_{\text{тек}}$. Подальше збільшення механічного напруження призводить до руйнування зразка матеріалу. Значення механічного напруження, що викликає руйнування матеріалу, називають *границею міцності* $\sigma_{\text{міц}}$.

Для діелектриків межі міцності (вимірюють у паскалях, *Па*) на розтягування, стиснення, згинання можуть значно відрізнитися. Деформацію, що виникає в результаті порівняно невеликих напружень і зникає після зняття навантаження, називають *пружною*, а та, що залишається, — *залишковою*, або *пластичною*.

Пластична деформація $\sigma_{\text{тек}} - \sigma_{\text{міц}}$ пов'язана з переміщенням атомів речовини на відносно великі відстані й викликає залишкові зміни форми, структури та властивостей без макроскопічних порушень цілісності. Матеріали, у яких немає пластичної деформації, називають *крихкими* (скло, кераміка тощо). Вони легко руйнуються під впливом вібрацій та динамічних навантажень. І навпаки, матеріали, у яких пластична деформація має широку смугу значення, називають *пластичними* (поліетилен, полівінілхлорид, гума тощо).

В'язкість (внутрішнє тертя) — властивість рідин і газів створювати опір переміщенню однієї їхньої частини щодо іншої. В'язкість більше властива матеріалам у рідкому агрегатному стані. Залежно від рівня в'язкості рідкі діелектрики можуть використовувати: як просочувальний матеріал (наприклад, що менша в'язкість лаку, то більша його просочувальна властивість); середовище для гасіння дуги (наприклад, масло в баку високовольтного автоматичного вимикача); охолоджувальне середовище (наприклад, якісне трансформаторне масло з низькою в'язкістю не перешкоджає конвекційній циркуляції масла всередині бака трансформатора та забезпечує менший опір звичайному потоку, не впливаючи на процес охолодження). В'язкість рідини значно залежить від температури, тому правила технічної експлуатації регламентують значення в'язкості рідких діелектриків за певної температури.

3.2.3. Теплові властивості діелектриків

Під час експлуатації ізоляційні матеріали працюють за підвищених температур. Ізоляція нагрівається від струму, що проходить по проводу.

3.2. Властивості діелектричних матеріалів

Тому ізоляційні матеріали обирають із певною робочою температурою та тепловими властивостями. Теплові характеристики дають змогу оцінити поведінку електроізоляційних матеріалів під час нагрівання.

Теплостійкість — це здатність діелектрика зберігати форму й розміри під час короткочасного підвищення температури.

Нагрівостійкість — це здатність діелектриків і виробів із них витримувати протягом тривалого часу вплив високої температури без погіршення своїх властивостей. Нагрівостійкість визначається тією температурою, за якої виникає неприпустима зміна експлуатаційних характеристик діелектрика. Для електроізоляційних матеріалів встановлено сім класів нагрівостійкості (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Допустимі граничні температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості

Клас нагрівостійкості ізоляції	Допустима гранична температура, °С	Короткий перелік основних груп ізоляційних матеріалів
У	90	Органічні діелектрики; непросочені волокнисті матеріали на основі целюлози та шовку (деревина, папір, картон, фібра, пряжа); полістирол, поліетилен
А	105	Ті самі волокнисті матеріали, але просочені поліамідними смолами, олійно-смолянистими й полівінілацетатними лаками
Е	120	Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт), пластмаси з органічним наповнювачем
В	130	Матеріали з великим вмістом неорганічних компонентів (скло, тканина, склотекстоліт)
F	155	Матеріали на основі слюди, скловолокна, азбесту в поєднанні зі зв'язувальними компонентами підвищеної нагрівостійкості (кремнійорганічними, епоксидними)
Н	180	Кремнійорганічні лаки, гуми, композиційні матеріали зі слюди, азбесту, клеєних за допомогою нагрівостійких кремнійорганічних смол
Г	Понад 180	Неорганічні матеріали без клейких або просочувальних органічних сполук (слюда, скло, кварц, азбест); з органічних — тільки фторопласт-4 і поліаміди

Холодостійкість — здатність діелектрика працювати без погіршення експлуатаційних властивостей за низьких температур. Ізоляція електротехнічного й радіоелектронного обладнання має зберігати свої властивості під час охолодження до температури $-60-70$ °С, а в деяких

випадках і за температури рідкого азоту ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), водню ($-252\text{ }^{\circ}\text{C}$) і гелію ($-268,7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Зазвичай із незначним зниженням температури електроізоляційні властивості діелектриків підвищуються. Проте деякі органічні діелектрики за низьких температур утрачають гнучкість, розтріскуються та легко руйнуються, особливо під час вібрацій. Гранично допустимі низькі робочі температури деяких діелектриків: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — поліетилен, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ — капрон, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ — поліпропілен.

Теплопровідність — властивість діелектрика відводити теплоту від нагрітих провідників і магнітопроводів через шар електричної ізоляції, а також відводити теплоту з товщі електричної ізоляції, нагрітої за рахунок діелектричних втрат. Від здатності діелектрика проводити теплоту залежить і нагрівання провідника, і електрична міцність самої ізоляції. Особливо це важливо для товстої ізоляції в установках високої напруги. Кількісно теплопровідність оцінюють *коефіцієнтом теплопровідності*. Його середні значення для деяких діелектриків ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$): повітря (у малих зазорах) — 0,05; папір — 0,10; лакотканина — 0,13; гетинакс — 0,35; кварцове скло — 1,16; фарфор — 1,6.

Теплове розширення — це здатність діелектриків збільшувати свій об'єм під час нагрівання. Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення. Його середні значення для деяких діелектриків (10^{-6} К^{-1}): полівінілхлорид — 160; поліетилен — 145; органічне скло — 70; полістирол — 68; скло — 9; фарфор — 3,5.

Температура плавлення — чітко виражена температура переходу матеріалу з твердого стану в рідкий. Спостерігається в діелектриків кристалічної будови (слюда тощо).

Температуру розм'якшення визначають у діелектриків з аморфною структурою (смоли, бітуми тощо), перехід яких із твердого стану в рідкий відбувається не за чітко фіксованої температури, а в інтервалі температур. За температур, близьких до температури розм'якшення, матеріал застосовувати не можна, оскільки він, розм'якшуючись, тече.

Температура спалаху парів рідких діелектриків. Пари й газу, що утворюються під час нагрівання певного об'єму рідкого діелектрика, здатні спалахнути від відкритого вогню без виникнення стійкого горіння. Що вища температура спалаху, то кращий діелектрик. Для трансформаторного масла вона має бути не нижчою $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуру спалаху визначають спеціальним приладом, вона дає уявлення про те, наскільки продукти багаті на легколеткі фракції, та вказує на ступінь пожежонебезпечності й вибухонебезпечності рідини.

3.2.4. Фізико-хімічні властивості діелектриків

До фізико-хімічних характеристик діелектриків належать кислотність, гігроскопічність, водопоглинання, хімічна стійкість, тропічна стійкість, розчинність, світлостійкість, радіаційна стійкість тощо.

Кислотність (кислотне число) — характеристика рідких діелектриків, компаундів і лаків. Кислотне число визначають кількістю міліграмів гідроксиду калію, необхідного для нейтралізації всіх вільних кислих з'єднань, що входять до складу 1 г рідкого діелектрика й погіршують його електроізоляційні властивості. Що менше кислотне число, то вища якість діелектрика. Наприклад, для трансформаторного масла кислотне число має бути не більше 0,05 мг/г. Високе кислотне число є ознакою поганого очищення масла під час його виготовлення або ознакою «старіння».

Вологоємні властивості діелектриків визначаються гігроскопічністю, водопоглинанням і вологопроникністю.

Гігроскопічність — здатність матеріалу поглинати пари води з навколишнього середовища. Зволоження діелектриків погіршує їхні діелектричні властивості. Пористі матеріали більш гігроскопічні, ніж щільні. Багато електроізоляційних матеріалів саме гігроскопічні. Для захисту поверхні електроізоляційних деталей від впливу вологи їх покривають лаками, які не змочуються водою. Матеріали, що не мають пор (скло, кераміка), накопичують вологу з довкілля на своїй поверхні, не пропускаючи її в глиб матеріалу.

Гігроскопічність матеріалу визначають за формулою:

$$W_{\text{г}} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100\%}{m_1},$$

де m_1 — маса сухого зразка матеріалу, г;

m_2 — маса зразка після тримання його в умовах відносної вологості 96–98 % протягом 24–48 год (г).

Водопоглинання — здатність ізоляції вбирати (поглинати) воду. Інколи електроізоляційні матеріали безпосередньо стикаються з водою (атмосферні опади, ізоляція деталей водяних насосів тощо). Водопоглинання визначають за формулою:

$$W_{\text{в}} = \frac{(m_3 - m_1) \cdot 100\%}{m_1},$$

де m_1 — маса сухого зразка матеріалу, г;

m_3 — маса зразка, г, після тримання його у воді протягом 24 год.

Вологопроникність — здатність діелектрика пропускати крізь себе пари води. Ця характеристика дуже важлива для оцінювання якості матеріалів, які застосовують для захисних покривів: зовнішні шланги кабелів, лакові покриття деталей тощо. Вологопроникність практично дорівнює нулю лише для скла та добре випаленої кераміки.

Кількість вологи m , яка проходить за час t крізь поверхню S шару ізоляційного матеріалу товщиною h під дією різниці тиску водяних парів P_1 і P_2 з обох боків цього шару, можна розрахувати за формулою:

$$m = \Pi \cdot \frac{(P_1 - P_2) \cdot S \cdot t}{h},$$

де коефіцієнт Π — вологопроникність матеріалу.

У системі SI вологопроникність вимірюють у секундах.

Для твердих органічних діелектриків вологопроникність має порядок значень 10^{-13} – 10^{-16} с. Для зменшення гігроскопічності й вологопроникності пористих і волокнистих ізоляційних матеріалів широко застосовують їхнє просочення.

Різні діелектричні матеріали при зіткненні між собою в процесі виготовлення або експлуатації виробів можуть частково або повністю проникати один в одного. Таку властивість називають *розчинністю*, вона важлива для підбору розчинників лаків або для оцінювання стійкості електроізоляційних матеріалів до дії різних рідин, з якими вони контактують. Найлегше розчиняються речовини, близькі до розчинника за хімічною природою.

Електроізоляційні матеріали мають різну стійкість до руйнування (корозії) під час контактування з кислотами, лугами, сольовими розчинами, маслами, паливом і газами.

Хімічна стійкість — це здатність електроізоляційних матеріалів протистояти дії хімічно активних речовин. Зразки матеріалів поміщають у середовище, подібне до експлуатаційного або більш інтенсивне за концентрацією хімічно активних елементів і несприятливе за температурними умовами. Зразок витримують певний час, потім визначають зміни маси, зовнішнього вигляду й інших показників.

Тропічну стійкість діелектрика визначають за зміною значень його параметрів під впливом тропічних кліматичних факторів. Для районів із тропічним вологим або сухим кліматом, морським кліматом характерні такі фактори, як холод, спека, волога, атмосфера, насичена морською сіллю, пустельним або степовим пилом, піском, попелом, хімічними сполуками; вплив мікроорганізмів — цвілевих грибів, бактерій; наявність шкідників тваринного світу — термітів, мурах, тарганів, гризунів та ін.

Здатність матеріалів зберігати свої експлуатаційні характеристики під дією світлового опромінення називають *світлостійкістю*. Світлові й особливо ультрафіолетові промені можуть викликати фотопровідність, хімічні зміни в деяких органічних діелектриках, а також стимулювати процеси, які погіршують їхню механічну міцність та еластичність. Світлове опромінення прискорює «старіння» електроізоляційних матеріалів.

Сучасна техніка може зазнавати впливу корпускулярного або хвильового випромінювання високої енергії, яке змінює фізичні й хімічні властивості матеріалів. Ступінь стійкості фізико-хімічних властивостей діелектриків, ступінь збереження ними електричних, механічних та інших експлуатаційних властивостей до впливу йонізуючого випромінювання називають *радіаційною стійкістю*.

Вплив випромінювання може супроводжуватися хімічними перетвореннями — розриваються та переміщуються хімічні зв'язки, утворюють-

ся вільні радикали, відбувається виділення газів, вулканізація. Найбільш вразливі до випромінювання органічні діелектрики (наприклад, полімери). Найстійкіші до опромінення неорганічні діелектрики: кварц, глинозем, слюда й слюдяні матеріали. Вплив випромінювання призводить у них до зниження питомого опору й електричної міцності, але після прогрівання опромінених неорганічних діелектриків за високих температур (відпалу) у них можливе відновлення первинних властивостей.

3.3. Газоподібні діелектрики

До газоподібних діелектриків належать усі гази, зокрема повітря (суміш газів і водяної пари). Повітря заповнює весь простір, проникає в пори, заповнює пустоти, розчиняється в рідинах, оточує всі електричні установки, проводи високовольтних ЛЕП. Повітря знаходиться між контактами при їх розмиканні в багатьох електричних апаратах (вимикачі освітлення, пускачі). Але повітря — найчастіше допоміжний, а не основний діелектрик.

Важливими властивостями газів є їхня здатність відновлювати електричну міцність, мала діелектрична проникність, високе значення питомого опору, відсутність «старіння», інертність деяких газів щодо твердих і рідких матеріалів, здатність працювати за низьких температур і під час високого тиску, нетоксичність, негорючість. Багато газів (повітря, елегаз та ін.) використовують як діелектрики в газонаповнених конденсаторах, автоматичних вимикачах тощо. Ще одне призначення газоподібних діелектриків — охолодження різних пристроїв та апаратури.

Полярізація в газах електронна. Це пов'язано з тим, що гази мають малу питому густину. Однак, попри це, їх поділяють на неполярні (O_2 , H_2 , Cl_2) і полярні (CO , HF , H_2S).

Гази мають надзвичайно малу провідність, що пов'язано з дуже низькою концентрацією носіїв заряду. Поява носіїв у газі відбувається за рахунок йонізації нейтральних молекул під дією зовнішніх факторів або при зіткненні заряджених часток із молекулами. Основним фактором, що визначає провідність газів, є космічне випромінювання. Йонізація значно збільшується при нагріванні газу. Електропровідність газу, обумовлену цим явищем, називають *несамостійною*.

Під дією сильних електричних полів заряджені частинки можуть набувати більших швидкостей та утворювати нові йони при зіткненнях із нейтральними молекулами. Електропровідність газу, обумовлену цим явищем, називають *самостійною*. У слабких електричних полях ударна йонізація відсутня.

Одночасно з утворенням носіїв зарядів відбувається протилежний процес — об'єднання заряджених частинок у нейтральні молекули. Цей процес називають *рекомбінацією*. Наявність рекомбінації пояснює встановлення певного рівня йонів через короткий час після початку дії зовнішнього йонізатора.

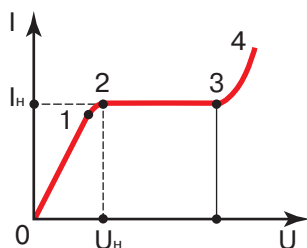


Рис. 3.10. Залежність струму від напруги, прикладеної до об'єму газу

Зміну струму залежно від напруги, прикладеної до об'єму газу, називають *вольт-амперною характеристикою (ВАХ)* (рис. 3.10). Графік ВАХ має три виражені ділянки, які характеризуються такими процесами в газах:

- при малих напругах у газі переважає процес рекомбінації, тобто взаємна нейтралізація різнойменних йонів газу при взаємних ударах. На цій ділянці діє закон Ома;

- при досягненні напруги значення насичення U_n подальше збільшення напруги не викликає збільшення струму. Струм насичення I_n невеликий і для більшості газів становить 10^{-16} – 10^{-20} А/см. Йони не встигають рекомбінувати й розряджаються на електродах. Це відповідає горизонтальній ділянці кривої;

- при подальшому збільшенні напруги внаслідок ударної йонізації з'являється самостійна провідність. Струм знову починає зростати зі збільшенням напруги. При досягненні критичної напруги (точка 3 на графіку) (рис. 3.10) у газі починає діяти ударна йонізація, що призводить до різкого збільшення концентрації йонів, збільшення струму й електричного пробою (точка 4 на графіку) (рис. 3.10). Напруга знижується до нуля. Пробій газу відбувається як іскровий розряд — іскри світяться та з'єднують поверхні металевих електродів.

Електрична міцність газів дуже залежить від тиску, особливо при його низьких значеннях. Зі зменшенням тиску вона спочатку зменшується, а потім зростає, що пов'язано зі зменшенням вірогідності зіткнення молекул, яке призводить до йонізації. У повітря за нормальних умов із товщиною шару 1 см електрична міцність становить приблизно 3×10^4 В/см, в елегазу — у 2–4 рази більша. Діелектричні втрати в газах дуже малі ($\text{tg } \delta = 10^{-5}$ – 10^{-8}) і майже не залежать від частоти.

3.3.1. Пробій газу в однорідному електричному полі

Однорідне електричне поле може бути отримане між плоскими електродами із заокругленими краями, а також між сферами, якщо відстань між ними значно менша від їхнього діаметра. Час розвитку пробою в однорідному полі дорівнює 10^{-7} – 10^{-8} с, причому величина напруги пробою залежить від температури й тиску наповнюючого газу. При нормальному тиску (0,1 МПа) і за температури $+20$ °С електрична міцність повітря при відстані між електродами 1 см становить приблизно 3,2 МВ/м.

Зі зменшенням відстані між електродами електрична міцність збільшується, що пояснюється труднощами формування розряду.

Явище пробою газоподібних діелектриків в однорідному електричному полі записують формулою (*закон Пашена*):

$$U_{\text{пр}} = A \cdot p \cdot h,$$

де $U_{\text{пр}}$ — пробивна напруга шару газу, В;

p — тиск газу, Па;

h — відстань між електродами в газі, м;

A — коефіцієнт, величина якого залежить від тиску газу та його шару.

Відповідно до закону Пашена, в однорідному електричному полі за незмінної температури напруга пробою є функцією тиску газу, що наповнює об'єм, і відстані між електродами $U_{\text{пр}} = f(p \cdot h)$. Таку залежність подано на *рисунку 3.11*.

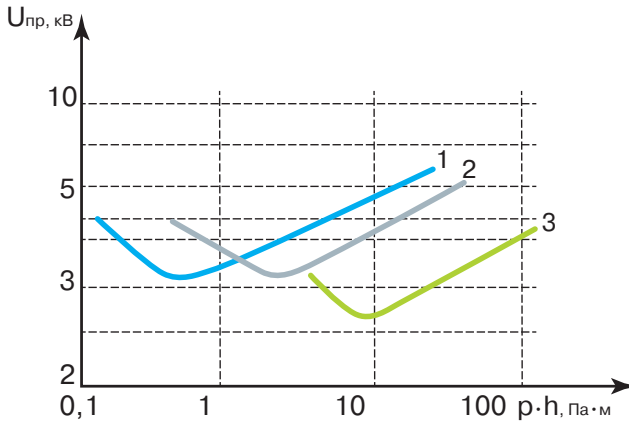


Рис. 3.11. Залежність пробивної напруги газів від добутку тиску на відстань між електродами: *крива 1* — для повітря; *крива 2* — для водню; *крива 3* — для неону

Мінімальне значення пробивної напруги для різних газів становить 280–420 В, для повітря — приблизно 300 В. При підвищенні тиску понад 100 кПа відстань між молекулами зменшується, а отже, зменшується довжина вільного пробігу електронів і відповідно збільшується електрична міцність.

Зниження напруги спостерігають при зменшенні тиску нижче атмосферного до певної величини. Подальше зменшення тиску приводить до зростання електричної міцності, що пояснюється зменшенням кількості молекул в одиниці об'єму газу й зниженням імовірності зіткнень електронів із молекулами.

При високому вакуумі електрична міцність досягає великих значень (приблизно 10^2 МВ/м). У такому разі на величину електричної міцності впливають матеріал і стан поверхні електродів.

Електрична міцність залежить від хімічного складу газу. Меншу електричну міцність порівняно з повітрям мають інертні гази (азот, аргон, гелій, неон, криптон, ксенон), які використовують для заповнення джерел світла й електровакуумних приладів. Високою електричною міцністю вирізняються деякі важкі гази з високою молекулярною масою, як-от: елегаз (SF_6), фреон (CCl_2F_2), чия електрична міцність практично у 2,5 раза вища, ніж у повітря.

3.3.2. Пробій газу в неоднорідному електричному полі

Неоднорідне електричне поле виникає між електродами, якщо хоча б один із них має малу площу: голкою і площиною, двома голками, двома сферами, при відстані між ними h , що перевищує радіус сфер. Неоднорідні електричні поля існують переважно в газорозрядних приладах, між контактами реле, між проводами ліній електропередачі. Пробій газу в неоднорідному електричному полі вже має інші закономірності й виникає під час меншої пробивної напруги. Особливістю пробою є виникнення часткового розряду у вигляді «корони» в місцях, де напруженість електричного поля досягає критичних значень, з наступним переходом «корони» в іскровий розряд і дугу під час зростання напруги.

Часто пробій виникає на межі розділення з твердим діелектриком. Такий пробій у техніці називають *поверхневим*. На поверхневу пробивну напругу в ділянках низьких частот дуже впливають вологість повітря, ступінь запилення ізолятора й хімічний склад пилу. Поверхневу пробивну напругу можна підвищити, збільшуючи шлях поверхневого розряду. Ось чому поверхню ізолятора часто роблять ребристою.

Розглянемо властивості деяких газоподібних діелектриків.

Повітря ($\epsilon \approx 1$) — суміш, яка у звичайному стані містить водяну пару, пил і гази: азот — 78 %, кисень — 20,99 %, водень — 0,01 %, аргон — 0,9325 %, неон — 0,0018 %, вуглекислий газ — 0,03 %, а також гелій, криптон і ксенон, що в сумі становлять десятитисячні частки відсотка. Електрична міцність — 3,2 МВ/м.

Азот N_2 ($\epsilon \approx 1$) — за характеристиками подібний до повітря, безбарвний газ, без запаху, кольору та смаку. Температура кипіння: -196°C . Застосовують у виробництві аміаку, нітратної кислоти, добрив, у криогенній техніці для охолодження пристроїв та як захисне середовище в мікроелектроніці.

Водень H_2 ($\epsilon \approx 1$) — легкий газ із високою теплоємністю. Використовують для охолодження радіоелектронної апаратури (РЕА) замість повітря. Водень не окиснює інші матеріали, але може утворювати гідриди. Високопроникний, вибуховий пожежонебезпечний. У суміші з киснем утворює так званий гримучий газ. Температура кипіння: -253°C .

Аргон Ar_2 ($\epsilon \approx 1$) — інертний безбарвний газ, удвічі важчий за повітря. Використовують для охолодження РЕА, у газорозрядних приладах, у мікроелектроніці — як захисний газ при мікропаяння.

Елегаз SF_6 ($\epsilon \approx 1$) — шестифториста сірка — синтетичний діелектрик із високою нагрівостійкістю (до $+800$ °С) та електричною міцністю (у 25 разів більшою, ніж повітря). Хімічно стійкий, негорючий, без запаху. Може довго працювати за температури $+150$ °С. Елегаз не «стає рідше», тобто не змінює свої властивості із часом; при електричному розряді розпадається, але швидко рекомбінує, відновлюючи початкову діелектричну міцність. У ньому не виникає електрична дуга, тому його застосовують для заповнення високовольтних трансформаторів і вимикачів. Один із недоліків — висока вартість, тому його часто використовують у суміші з азотом.

3.4. Рідкі діелектрики

Для виготовлення *рідких діелектриків* використовують ароматичні сполуки, фторовані й хлоровані вуглеводні, розплави деяких халькогенідів, дистильовану воду, зріджені гази, кремнійорганічні сполуки (поліорганосилоксани). Рідкі діелектрики застосовують для просочування ізоляції конденсаторів, кабелів; у циркулярних системах охолодження трансформаторів, випрямних установок і турбогенераторів; для гасіння електричної дуги в масляних вимикачах; для заливання компонентів у блоках радіо- й електротехнічної апаратури.

Рідкі класифікують діелектрики за:

- *ступенем горючості* — горючі; негорючі;
- *призначенням* — для конденсаторів, трансформаторів, кабелів, контакторних пристроїв управління напругою під час навантаження; ізоляції обладнання високої напруги; систем циркуляційного охолодження;
- *хімічною основою* — нафтові масла; синтетичні рідини;
- *максимально допустимою робочою температурою* — поділені на кілька груп з температурами від $+70$ до $+250$ °С. За температури до $+95$ °С підходять нафтові масла, тоді як за вищих температур використовують тільки синтетичні рідкі діелектрики.

Конкретні вимоги до рідкого діелектрика визначають конструкцією та умовами застосування електрообладнання, у якому його застосовують, ступенем екологічної небезпеки. Тому під час вибору ізолювальної рідини потрібно дотримуватися таких вимог:

- сумісність із наявними матеріалами;
- висока електрична міцність; високий питомий опір;
- малі діелектричні втрати; стабільність властивостей в умовах тривалої експлуатації;
- висока стійкість до впливу електричного поля;
- висока стійкість проти окиснення;
- пожежна й екологічна безпека.

Не всі рідкі діелектрики задовольняють ці вимоги, тому в кожному конкретному випадку перевагу віддають тим властивостям, які забезпечують необхідну стабільність параметрів, надійність і довговічність виробу.

Для забезпечення вимог екологічності останнім часом токсичні поліхлоровані дифеніли (ПХД) практично повністю витіснені замінниками, які характеризуються значно більшим ступенем горючості. Відомо, що відмови в роботі електрообладнання часто супроводжуються іскрінням і дугоутворенням, від чого може зайнятися рідина або газоподібні продукти її випаровування чи розкладання. Для гарантування безпеки експлуатації рідких діелектриків конструкція електроустаткування проектується так, щоб знизити ймовірність його пошкодження в надзвичайних ситуаціях.

Абсолютно чисті рідкі діелектрики отримати дуже важко. Постійними домішками в них є вода, гази та найдрібніші механічні частинки. Наявність домішок посилює явище пробую рідких діелектриків. Бульбашки газу, які в них є, йонізуються, виділяють енергію, котра перегріває рідину. Це призводить до утворення газових каналів між електродами та до пробую рідини. Крім газових уключень, електричну міцність, яка нижча, ніж в очищених рідин рідких діелектриків, знижує вода, краплини якої також утворюють ланцюжки з підвищеною провідністю. На неї значно впливають і тверді домішки.

Найбільш поширені в електротехнічних пристроях *нафтові (мінеральні) електроізоляційні масла й синтетичні рідини*. Мінеральні масла отримують природним шляхом. Фактично це те, що залишається від нафти після її переганяння в бензин і дизель. Наступний процес — рафінування, або очищення, нафтового дисциляту (продукту переганяння) від хімічно нестійких домішок (сірки, азоту тощо). Синтетичне масло — це повністю штучний продукт, отриманий у результаті синтезу нафтового газу.

Трансформаторне масло — це рідина від світло- до темно-жовтого кольору, яка за хімічним складом є сумішшю різних вуглеводнів (нафтових і парафінових). Головне призначення — заповнювати пори у волокнистій ізоляції, проміжки між проводами обмоток і між обмотками й баком трансформатора, що значно підвищує електричну міцність ізоляції. По-друге, трансформаторне масло поліпшує відведення тепла, що виділяється за рахунок втрат в обмотках і магнітопроводі трансформатора. Лише деякі силові й вимірювальні трансформатори виготовляють без заливання маслом (так звані сухі трансформатори).

Ще одна важлива галузь застосування трансформаторного масла — масляні вимикачі високої напруги, де масло виконує функцію дугогасіння. У цих апаратах розрив електричної дуги між контактами, що розходяться, відбувається в маслі або в газах, які виділяє масло під дією високої температури дуги. Це сприяє охолодженню каналу дуги й швидкому її гасінню.

Трансформаторне масло застосовують також для заливання маслonaповнених вводів апаратів, у деяких типах реакторів і реостатів.

Основні властивості трансформаторного масла:

- мала в'язкість для кращого відведення теплоти й просочування ізоляції;
- температура застигання: $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (важливо за низьких температур навколишнього середовища);
- електрична міцність: 10–25 МВ/м, зазвичай не встановлюється стандартами, оскільки вона надзвичайно чутлива до зволоження;
- теплоємність і теплопровідність (у 25–30 разів інтенсивніша, ніж у повітря);
- висока температура спалаху (орієнтовно $+135\text{--}145\text{ }^{\circ}\text{C}$), що уможливорює безпечну роботу в умовах перевантаження.

Недоліками трансформаторного масла є його «старіння» в процесі експлуатації, гігроскопічність (потрібно зберігати в щільно закритій тарі), а також займистість і горючість.

Швидкість «старіння» трансформаторного масла зростає:

- при доступі повітря, оскільки «старіння» масла значною мірою пов'язане з його окисненням на повітрі;
- за підвищеної температури (зазвичай найвищою робочою температурою масла вважають $+95\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- при зіткненні масла з деякими металами (мідь, залізо, свинець) та іншими речовинами — каталізаторами «старіння»;
- у разі впливу світла;
- у разі впливу електричного поля.

Для відновлення властивостей трансформаторного масла використовують кілька способів:

- пропускають під тиском крізь фільтрувальний папір у спеціальних установках;
- видаляють механічні домішки й воду за допомогою центрифуги;
- безперервно фільтрують крізь адсорбенти (сілікагель, алюмосилікати, синтетичні цеоліти);
- вводять інгібітори — спеціальні антиокиснювальні присадки (іонол, пірамідон);
- застосовують відстоювання — найпростіший метод очищення, оскільки позбавлення від води й механічних домішок відбувається шляхом природного осадження.

Кабельне масло використовують у виробництві силових електричних кабелів. Просочуючи паперову ізоляцію кабелів, масло підвищує її електричну міцність, а також сприяє відведенню тепла втрат. Для підвищення в'язкості в кабельне масло додають каніфоль (масляно-каніфольний компаунд) або синтетичний загусник.

Конденсаторне масло слугує для просочення ізоляції паперових конденсаторів, особливо силових, призначених для компенсації індуктивно-

го зрушення фаз. Конденсаторне масло подібне до трансформаторного, але вимагає особливо ретельного очищення адсорбентами. При просоченні паперового діелектрика підвищуються його діелектрична проникність та електрична міцність; це дає змогу зменшити габарити, масу й вартість конденсатора при заданій робочій напрузі, частоті та ємності.

Синтетичні рідкі діелектрики використовують тоді, коли вони за своїми властивостями перевершують нафтові електроізоляційні масла. Хлоровані вуглеводні утворюються з різних вуглеводнів шляхом заміни в їхніх молекулах деяких (або навіть усіх) атомів водню атомами хлору. Розглянемо найважливіші з них.

Совол — прозора безбарвна рідина, найбільш уживаний хлорований дифеніл, за складом подібний до пентахлордифенілу $C_{12}H_5C_{16}$. Він стабільніший при роботі в електричному полі, ніж мінеральне масло, негорючий, не окиснюється, температура спалаху в межах $+205-230$ °С, електрична міцність — $14-18$ МВ/м. Діелектрична проникність соволу за нормальної температури й під час низької частоти струму $\epsilon \approx 5$, тобто більше ніж удвічі перевищує проникність нафтового масла. Заміна нафтового масла соволом у виробництві силових паперових конденсаторів дає змогу понизити об'єм конденсатора під час однакової реактивної потужності приблизно вдвічі. Це дає чималий економічний зиск, хоча совол удесятеро дорожчий за масло. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є значне зменшення ємності під час зниження температури нижче 0 °С. Температура застигання соволу: $+5$ °С.

Сприятливі температурні властивості мають суміші хлорованих дифенілів з іншими хлорованими сполуками.

Совтол — суміш соволу з трихлорбенzenом, застосовують для ізоляції вибухобезпечних та інших трансформаторів, для низьковольтних конденсаторів. *Совтол-10* — негорюча, стабільна до окиснення, синтетична, електроізолювальна рідина зі зниженою в'язкістю та низькою температурою застигання: -25 °С.

Хлоровані дифеніли негорючі. Проте їхнім недоліком є висока токсичність як самих рідин, так і їхньої пари, тому потрібно забезпечувати захист шкіри й вентиляцію повітря. У багатьох країнах використання хлорованих дифенілів заборонено законом.

Кремнійорганічні рідини — рідкі діелектрики, що мають дуже малий кут діелектричних втрат: $\operatorname{tg} \delta = 0,0001-0,0003$, низьку гігроскопічність і підвищену нагрівостійкість. Найвища робоча температура сягає від $+250$ °С (тривало) і до $+350$ °С (короткочасно). Для таких рідин характерна слабо виражена залежність в'язкості від температури. Вони досить дорогі, що обмежує їхнє застосування. Використовують для просочення й заливання конденсаторів та інших пристроїв.

Фторорганічні рідини також мають дуже малий кут діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$, малу гігроскопічність і високу нагрівостійкість. Характерними їхніми властивостями є: мала в'язкість, низький поверхневий

натяг (що сприяє кращому просоченню пористої ізоляції), високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення (значно більший, ніж у понад 50 інших електроізоляційних рідин), порівняно висока летючість, що вимагає герметизації апаратів, які заливають фторорганічними рідинами. Важливою перевагою фторорганічних рідин порівняно з кремнійорганічними є повна негорючість і висока дугостійкість. Застосовують для просочення та заливання конденсаторів і трансформаторів, під час випробування елементів радіоелектроніки. Як і кремнійорганічні сполуки, фторорганічні рідини дуже дорогі.

3.5. Тверді органічні діелектрики

Тверді діелектрики — це надзвичайно широкий клас речовин, які радикально різняться електричними, фізико-хімічними та механічними властивостями. За хімічним складом тверді діелектричні матеріали можна поділити на органічні й неорганічні.

Органічні діелектрики — матеріали, до складу яких входить вуглець (карбон) (С). Це — *смоли, полімери, воски, лаки, гуми, папери, лакотканини*. Їхньою собливістю є горючість, незначна стійкість до атмосферних та експлуатаційних впливів. Органічні діелектрики мають просту технологію виготовлення, вони зазвичай дешевші порівняно з неорганічними діелектриками. «Старіння» на постійній напрузі практично відсутнє; на змінній напрузі органічні діелектрики «старіють» за рахунок часткових розрядів і водних триїнгів.

Більшість органічних діелектриків для виготовлення електричної ізоляції належать до групи полімерів.

Полімери — це високомолекулярні сполуки, молекули яких складаються з великої кількості ланок (мономерів), що повторюються. Полімери зазвичай хороші діелектрики: у них низькі діелектричні втрати, високий питомий опір, висока електрична міцність, висока технологічність і, як правило, невисока ціна. Крім того, на основі полімерів із дисперсними добавками різної електропровідності, теплопровідності, магнітної проникності, діелектричної проникності, твердості тощо можна отримувати різноманітні композиційні матеріали із широким спектром властивостей.

За методом синтезу синтетичні полімери поділяють на полімеризаційні (отримані шляхом полімеризації) і поліконденсаційні (отримані реакцією поліконденсації). У цих процесах речовина може переходити з газоподібного або рідкого стану в стан досить густої рідини або у твердий.

Полімеризацією називають процес з'єднання молекул мономерів, що приводить до утворення полімерів *без виділення побічних продуктів*. Будова елементарної ланки полімеру ідентична будові вихідного мономера (полістирол, поліетилен, полівінілхлорид, фторопласт тощо).

Поліконденсація — процес з'єднання молекул мономерів, що приводить до утворення полімерів *з одночасним виділенням будь-якого*

низькомолекулярного продукту (водяна пара, аміак, спирт тощо). Будова елементарної ланки таких полімерів відрізняється від будови вихідних мономерів (гліфталева смола, епоксидна смола тощо).

Властивості полімерів визначаються їхнім хімічним складом, взаємним розміщенням атомів, будовою макромолекул. Тому полімери можна поділити на лінійні (ниткоподібні) і просторові (сітчасті).

Молекули *лінійної структури* — довгі ниткоподібні повторювані ланцюги елементарних ланок. Лінійну будову мають макромолекули поліетилену, полістиролу, полівінілхлориду тощо. Довжина лінійної молекули в тисячі разів перевищує її поперечник: це ніби нитка діаметром 1 мм завдовжки 1 м. Однак молекули не виглядають як прямі лінії, вони вигнуті в різних напрямках, переплутані, а іноді навіть скручені в клубок (рис. 3.12, а).

У *просторових полімерів* макромолекули зв'язані в загальну сітку поперечними хімічними зв'язками. Типовими просторовими полімерами є фенолоформальдегідні й епоксидні смоли, дуже вулканізований каучук (ебоніт), у якого молекули внаслідок вулканізації виявляються «зшитими» між собою атомами сульфуру (S) (рис. 3.12, б).

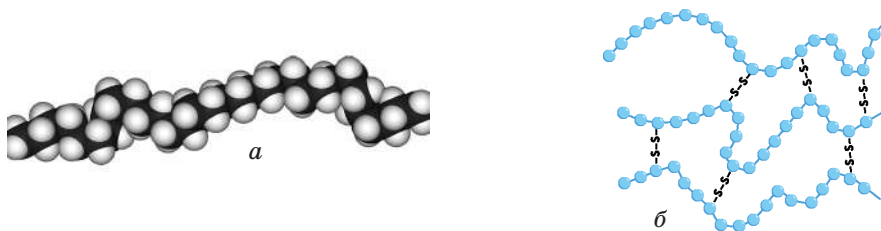


Рис. 3.12. Структури полімерів: а) лінійний ланцюг поліетилену; б) просторова сітка вулканізованого каучуку

Між лінійними та просторовими полімерами є істотні відмінності. Лінійні полімери порівняно гнучкі й еластичні, більшість із них під час помірного підвищення температури легко розм'якшуються і розплавляються. Просторові полімери мають велику жорсткість, їхнє розплавлення відбувається за високих температур, а багато з них до досягнення температури плавлення руйнуються хімічно: згорають, обуглюються тощо. Через те лінійні полімери називають *термопластичними матеріалами* (перехід від пластичного стану до твердого може відбуватися багато разів), а просторові — *термореактивними* (перехід від пластичного стану до твердого відбувається лише раз).

Завдяки слабкій міжмолекулярній взаємодії лінійні полімери здебільшого мають здатність набухати й розчинятися у відповідних за складом розчинниках з утворенням в'язких розчинів, з яких потім отримують міцні плівки й волокна. Просторові полімери малорозчинні, а значна частина з них нерозчинна взагалі.

Незалежно від виду та складу вихідних речовин і способів отримання матеріали на основі полімерів можна класифікувати як пластмаси, волокнисті матеріали, шаруваті пластики, плівки, покриття, клеї.

3.5.1. Полімеризаційні синтетичні полімери

Полімерні вуглеводні

Полістирол (рис. 3.13) — твердий прозорий матеріал, крихкий, з невисокою механічною міцністю, який отримують шляхом полімеризації стиролу ($C_6H_5-CH=CH_2$). Це — неполярний діелектрик, має хороші електроізоляційні властивості. Хімічна стійкість невисока: розчиняється в ацетоні, метилбензені, дихлоретані, повільніше — у бензині, у воді — нерозчинний. Термопластичний матеріал, який переходить в еластичний стан за температури $+80\text{ }^\circ\text{C}$. Температура плавлення: $+239\text{ }^\circ\text{C}$. Його легко формувати та склеювати, забарвлювати, обробляти механічним способом. Має низьке вологовбирання, високу вологостійкість і досить морозостійкий (до $-40\text{ }^\circ\text{C}$). Його недоліками є крихкість за знижених температур, схильність до утворення поверхневих тріщин, мала стійкість до дії розчинників (зокрема, до бензену, метилбензену тощо) і невисока нагрівостійкість. Крихкість і схильність до розтріскування значною мірою усунуті в ударостійких полістиролах, які є сумішшю полістиролу із синтетичним каучуком. Ударостійкі полістироли відрізняються підвищеними значеннями ударної в'язкості й діелектричної проникності. Полістирол застосовують переважно як високочастотну ізоляцію. З ударостійкого полістиролу виготовляють каркаси індуктивних котушок, основи й ізолятори для електровимірювальних приладів, корпуси радіоприймачів, телевізорів, моніторів тощо.

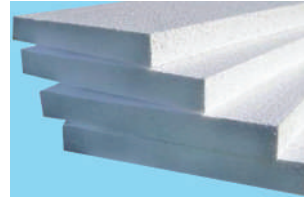


Рис. 3.13. Полістирол

Поліетилен (рис. 3.14) — неполярний, термопластичний, гнучкий діелектрик білого чи світло-сірого кольору, який отримують унаслідок реакції полімеризації газу етилену ($CH_2=CH_2$) з лінійною макромолекулою при підвищених тисках і температурах. Етилен є побічним продуктом нафтоперероблення.

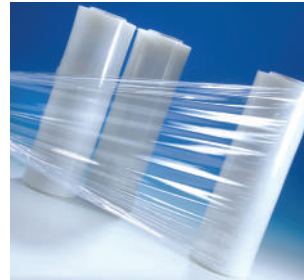


Рис. 3.14. Поліетилен

Здебільшого використовують дві технології отримання поліетилену. Першою була технологія отримання поліетилену під час високого тиску до 250 МПа й за температури до $+300\text{ }^\circ\text{C}$ за допомогою ініціювальних агентів-окиснювачів. При цьому утворюється так званий *поліетилен високого тиску*, або *поліетилен низької щільності*. Наразі більш поширена технологія отримання поліетилену за допомогою каталізаторів під час невисокого тиску до 1 МПа та за невисокої температури до $+80\text{ }^\circ\text{C}$. При цьому утворюється так званий *поліетилен низького тиску*, або *поліетилен високої щільності*. Головна відмінність отриманих продуктів із фізико-хімічної точки зору — підвищена водостійкість поліетилену низького тиску порівняно з поліетиленом високого тиску. Інші характеристики

Розділ 3. Діелектричні матеріали

майже однакові — питомий опір: 10^{14} – 10^{15} Ом·м, діелектрична проникність: 2,2–2,4, електрична міцність: 45–55 кВ/мм, щільність: 920–960 кг/м³. Клас нагрівостійкості У. Температура плавлення різних сортів поліетилену — у межах від +103 до +137 °С.

Поліетилен не реагує з лугами будь-якої концентрації, з органічними й неорганічними кислотами, навіть з концентрованою сульфатною кислотою, але розкладається за кімнатної температури під дією 50 %-ї нітратної кислоти й під впливом рідкого чи газоподібного хлору та фтору.

Електроізоляційні властивості поліетилену такого ж високого рівня, що й полістиролу. Проте він має більшу холодостійкість і навіть за температури –70 °С зберігає гнучкість. Завдяки високим електроізоляційним властивостям його широко застосовують у виготовленні деталей радіотехнічної апаратури, електроізоляційних плівок, використовують як силову електричну ізоляцію в різних дротах і кабелях (радіочастотних, монтажних, наземних і підводних телефонних тощо), особливо так званий *зшитий поліетилен* (англ. *cross-linked polyethylene*). Його отримують або опроміненням високоенергетичними частинками (електронами, фотонами, важкими частинками), або вулканізацією. Модифікований матеріал можна експлуатувати за температури до +200 °С, крім того, він більш стійкий до агресивних середовищ і розчинників, механічно міцніший, його питомий опір вищий.



Рис. 3.15. Поліпропілен

Поліпропілен (рис. 3.15) — лінійний неполярний полімер, що утворюється з газу пропілену ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$). На відміну від поліетилену, поліпропілен менш щільний (0,91 г/см³), що є найменшим значенням взагалі для всіх пластмас, більш твердий (стійкий до стирання), термостійкий (починає розм'якшуватися за температури +140 °С, температура плавлення: +175 °С), майже не піддається корозійному розтріскуванню. Має високу чутливість до ультрафіолету й кисню, хімічно стійкий.

Електроізоляційні властивості поліпропілену аналогічні властивостям поліетилену. Однак поліпропілен більш холодостійкий і гнучкий, ніж поліетилен. З поліпропілену виготовляють плівки, волокна, тканини й фасонні вироби методом лиття під тиском. Його застосовують як комбінований паперово-плівковий діелектрик у силових конденсаторах, як плівковий діелектрик в обмотувальних проводах тощо.

Полівінілхлорид — білий дрібнодисперсний порошок, лінійний термопластичний полімер, отриманий у результаті полімеризації газоподібного мономера — вінілхлориду ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$). Це — полярний діелектрик, що зумовлено асиметрією будови його молекул через наявність атомів хлору. Унаслідок полярної будови полівінілхлорид має знижені електричні властивості порівняно з неполярними полімерами, але відрізняється більшою стабільністю параметрів під час зміни частоти, його

питомий опір майже не змінюється за підвищеної температури до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Virізняється хімічною стійкістю до лугів, мінерального масла, багатьох кислот і розчинників. У чистому вигляді не підтримує горіння на повітрі. Має малу холодостійкість: $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$; нагрівостійкість: $+66\text{ }^{\circ}\text{C}$; температуру плавлення в межах $+150\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В електроізоляційній техніці широко застосовують пластифікований полівінілхлорид — *пластикат*, який має більшу еластичність, вищу холодостійкість (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), ніж неластифікований полівінілхлорид. Його недоліком є значна залежність питомого об'ємного опору від температури.

Використовують для виготовлення плівок, ізоляційних стрічок, трубок, монтажних і телефонних проводів тощо (рис. 3.16). У разі впливу електричної дуги полівінілхлорид виділяє велику кількість газоподібних продуктів, що сприяє гасінню дуги. Цю властивість використовують у розрядниках.

Вініпласт — це жорсткий полівінілхлорид, що не містить пластифікаторів, але під час перероблення полівінілхлориду у вініпласт додають термостабілізатори, матеріали змащення (для поліпшення плинності розплаву), пігменти або барвники, мінеральні наповнювачі, еластомери (для підвищення ударної в'язкості).

Вініпласт виготовляють як листів, плити, труби, профільні матеріали, а також гранули, з яких екструзією або литтям під тиском формують різні вироби (рис. 3.17). Вініпласт легко піддається механічному обробленню, зварюється і склеюється. Серед його недоліків — низька ударна міцність, невелика холодостійкість ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) і невисока температура експлуатації (до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Використовують як стійкий до корозії конструкційний матеріал для виготовлення хімічної апаратури, комунікацій, роздільників пластин акумуляторних батарей, для ізоляції водозанурених електродвигунів, вентиляційних повітропроводів, труб, фітінгів тощо. Плівковий вініпласт застосовують для ізоляції проводів, захисних оболонок кабелів.

Поліметилметакрилат (органічне скло, плексиглас) (рис. 3.18, с. 102) — твердий прозорий безбарвний полімер, який отримують унаслідок полімеризації естерів метакрилової кислоти $[\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOCH}_3]$. Це полярний термопластичний діелектрик із малою гігроскопічністю та значною хімічною стійкістю. Має високу проникність для ультрафіолетового й видимого світла (оргскло завтовшки 3 мм пропускає до 92 % УФ-променів, силікатне — лише до 3 %), високу атмосферну стійкість, хороші фізико-механічні й електроізоляційні показники. Оргскло легко



Рис. 3.16.
Використання
полівінілхлориду

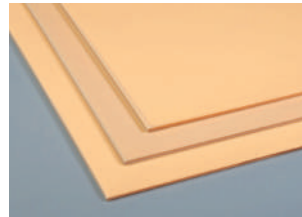


Рис. 3.17. Вініпласт
листовий



Рис. 3.18.
Поліметилметакрилат

піддається механічному обробленню: його можна різати на верстатах, свердлити й полірувати звичайними інструментами. Воно зварюється в спеціальних пристроях за температури $+140-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ із застосуванням тиску на поверхні приблизно $0,5-1\text{ МПа}$; склеюється за допомогою свого ж розчину в ацетоні або дихлоретані.

Застосовують для виготовлення корпусів приладів, прозорих шквал, лінз тощо. У разі впливу електричної дуги виділяє велику кількість газів (CO , H_2 , CO_2), а отже, оргскло має якості дугогасного матеріалу, тому його застосовують у розрядниках високої напруги, де потрібне швидке гасіння виниклої дуги.

Однак органічні полімери мають знижену теплостійкість. Карбон, який є основою органічних полімерів, на повітрі й під час нагрівання може окиснюватись, і полімер руйнується. Для підвищення теплостійкості органічних полімерів як основу використовують фтор, силіцій, титан тощо.

Фторорганічні полімери



Рис. 3.19. Вироби із фторопласту

Фторопласти (рис. 3.19) — технічна назва фторпохідних полімерів етилену, де атоми водню заміщені фтором: тетрафторетилен ($\text{CF}_2=\text{CF}_2$), трифторетилен ($\text{CF}_2=\text{CHF}$), трифторхлоретилен ($\text{CF}_2=\text{CFCl}$), вінілфторид ($\text{CH}_2=\text{CHF}$) тощо.

Перевагою фторопластів є висока стійкість в агресивних середовищах, зокрема в сильних кислотах (крім плавикової), лугах, хлорі, фторі за підвищених температур. Вони термостійкі — температура їхнього інтенсивного термоокиснення становить приблизно $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Деякі марки фторопластів мають унікальні антифрикційні властивості — низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість під час тертя без змащення (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Характеристики деяких неполярних ВЧ полімерів

Параметр	Поліетилен	Полістирол	Фторопласт-4
Електрична міцність, МВ/м	40–150	20–110	40–150
Робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	$-60 - +110$	$-40 - +80$	$-296 - +300$
Діелектрична проникність, ϵ	2,3–2,4	2,5–2,6	1,9–2,2
Тангенс кута діелектричних втрат, $\text{tg } \delta$	0,0002–0,0003	0,0002–0,0004	0,0002–0,0003
Питомий опір, ρ , Ом·м	10^{14}	10^{15}	10^{17}

У радіоелектроніці найчастіше застосовують політетрафторетилен (фторопласт-4) і політрифторхлоретилен (фторопласт-3).

Фторопласт-4. Цифра 4 вказує на число атомів фтору в молекулі мономера. Через симетричне розташування атомів у молекулах політетрафторетилен неполярний. Це білий чи сіруватий матеріал із щільністю вищою, ніж щільність звичайних органічних полімерів. Має значний діапазон робочих температур: від -250 до $+250$ °С. За електроізоляційними властивостями фторопласт-4 є найкращим із відомих діелектриків. За хімічною стійкістю він перевищує дорогоцінні метали, що дало змогу широко використовувати його під час виготовлення ізоляції, яка працює в агресивних середовищах. Негорючий, практично негігроскопічний, не змочується водою та іншими рідинами, стійкий до тропічних умов і грибків, добре витримує різку зміну температури. Фторопласт-4 застосовують при виготовленні різних фасонних виробів, листів, гнучкої плівки (5–200 мкм), ізоляції для монтажних проводів і кабельних виробів, у конденсаторному виробництві тощо. Монтажний дріт марки МГТФ (рис. 3.20) перерізом $0,35$ мм² має характерний рожевий відтінок — мідь просвічується крізь фторопластову ізоляцію.



Рис. 3.20. Моток дроту марки МГТФ

Недоліками фторопласту-4 є мала твердість, мала радіаційна стійкість і мала стійкість у зоні електричної дуги з виділенням отруйного газоподібного фтору, його висока вартість і складність технології перероблення.

Фторопласт-3. Заміна в елементарній ланці одного атома фтору атомом хлору викликає появу дипольного моменту, через що фторопласт-3 стає полярним і має значні діелектричні втрати порівняно з фторопластом-4, меншу термічну стійкість, проте велику пластичність. Без навантаження фторопласт-3 експлуатують в інтервалі температур від -195 до $+125$ °С; під навантаженням — від -60 до $+70$ °С. На холоді не розчиняється в жодних органічних розчинниках.

Технологія отримання фторопласту-3 простіша, він дешевший, ніж фторопласт-4. Його застосовують для виробництва низькочастотних кабелів, отримання антикорозійного покриття по металу, склу, фарфору, кераміці (як суспензії), отримання плівок і листів для антикорозійних обкладок судин та ємностей, виготовлення прокладок та ущільнювачів. Як антикорозійне покриття фторопласт-3 значно перевершує фторопласт-4 і багато інших матеріалів.

Кремнійорганічні полімери

Силікони (або поліорганосилоксани) містять, крім характерного для органічних полімерів вуглецю (С), кремній (Si), який є однією з найваж-

лівіших складових багатьох неорганічних діелектриків — слюди, азбесту, деяких видів скла, керамічних матеріалів. Основа будови молекули силікону — силосанове угруповання позмінних атомів кремнію та кисню ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$).

Поліорганосилоксани можуть бути термопластичними й мати лінійну будову та термореактивними з утворенням просторових структур. Силіконовий зв'язок $\text{Si}-\text{O}$ міцніший, ніж зв'язок $\text{C}-\text{C}$, що й визначає більш високу нагрівостійкість кремнійорганічних сполук порівняно з більшістю органічних полімерів. Ці сполуки мають малу гігроскопічність і практично не змочуються водою. Покриття ними целюлозних виробів, пластмас і кераміки створює гідрофобізацію оброблюваних матеріалів і робить їх водовідштовхувальними.

Кремнійорганічні полімери використовують у лаках, компаундах і в пластмасах, діелектричних складах і складах для герметизації. Електроізоляційні властивості кремнійорганічних сполук високі навіть за підвищеної температури (до $+200^\circ\text{C}$). Деякі з них витримують температуру $+300^\circ\text{C}$. Висока нагрівостійкість дає змогу використовувати їх у композиції з нагрівостійкими неорганічними матеріалами: зі слюдою, скловолокном, азбестом, міканітом, скло- та лакотканинами. Проводи в силіконовій ізоляції використовують як виводи потужних акумуляторів із великими піковими струмами, для підключення ксенонових і галогенних ламп.

Кремнійорганічні матеріали порівняно дорогі, що обмежує можливість їхнього широкого застосування.

3.5.2. Поліконденсаційні синтетичні полімери

У результаті реакції поліконденсації утворюються полімери простої структури. Це міцні, теплостійкі й термореактивні матеріали, які безповоротно втрачають здатність переходити у в'язкотекучий стан.

Фенолформальдегідні смоли отримують шляхом реакції поліконденсації формальдегіду з фенолом у кислому або лужному середовищі за температури $+70-90^\circ\text{C}$. Бувають як термореактивними, так і термопластичними. Найважливішою особливістю фенолформальдегідних смол є їхня здатність у поєднанні з різними наповнювачами утворювати **фенопласти (ФП)**, які мають такі властивості: хорошу високу міцність, електроізоляційну здатність, тривалий час функціонують за високих температур у будь-яких кліматичних умовах.

Фенолформальдегідні смоли поєднуються з багатьма полімерами й утворюють кополімери, які мають властивості фенопласту та позитивні якості поєданого з ним компонента. Такі смоли поділяють на резольні та новолачні.

Резольні (бакелітові) смоли отримують, якщо процес поліконденсації відбувається з надлишком формальдегіду в присутності лугу. Це термореактивні матеріали, полярні діелектрики. Їх застосовують для

виготовлення шаруватих пластиків: текстоліту, гетинаксу; для композиційних прес-матеріалів (фенопластів); трубок, клеїв тощо.

Новолачні смоли отримують, якщо процес поліконденсації ведуть із надлишком фенолу в присутності кислих каталізаторів. Термопластичні, плавляться за температури $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$; розчиняються в спирті, ацетоні й інших органічних розчинниках. Вони мають невисокі електроізоляційні властивості, особливо у вологій атмосфері; низьку стійкість до іскрових розрядів. Їх застосовують для виготовлення корпусів приладів, плат, роз'ємів, різних кнопок і ручок управління радіоапаратури, лаків.

Епоксидні смоли — продукт поліконденсації багатоатомних сполук, що містять у молекулі не менше двох епоксидних груп. У початковому стані мають лінійну структуру, є в'язкими рідинами, що розчиняються в ацетоні й інших розчинниках. Після додавання до них отверджувачів епоксидні смоли стають твердими (полімеризуються), набуваючи просторової структури. Як холодні отверджувачі використовують азотовмісні речовини (аміни), для отвердження при нагріванні (до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) — ангідриди органічних кислот (фталевої тощо). Вибір отверджувача впливає на властивості (еластичність, нагрівостійкість тощо) епоксидної смоли. Затверділі епоксидні смоли мають вологозахисні властивості, високу адгезію до металів, скла та кераміки, хороші діелектричні властивості й високу хімічну стійкість.

Застосовують для виготовлення клеїв, лаків, заливних компаундів (для заливання невеликих трансформаторів або вузлів апаратури, епоксидних кабельних муфт), під час виготовлення склотекстоліту. Використовуючи епоксидні смоли в стадії замішування і заливок, потрібно вживати заходів безпеки (респіратор, захисні окуляри, рукавички). Після закінчення процесу полімеризації епоксидні смоли вже не є токсичними.

Поліамідні смоли мають відносно високу механічну міцність і еластичність. Вони розчинні лише в обмеженій кількості розчинників (зокрема, у крезолі й розплавленому фенолі).

Застосовують для виготовлення синтетичних волокон, гнучких плівок і пластичних мас. Гігроскопічні й пластичні (при підвищених температурах), однак мають низьку світло- та радіаційну стійкість. До цих смол належать капрон і найлон. Це поліамідні волокна, які міцні, витримують низькі температури, хімічно стійкі (руйнуються лише концентрованими неорганічними кислотами), легко забарвлюються.

Капрон — це твердий синтетичний матеріал, який отримують у результаті полімеризації капролактаму — порошкоподібної речовини з температурою плавлення $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для отримання волокон капрону смолу чистять, пропускають через фільтри (калібрувальні отвори екструзійних або волоочильних машин). Струмки полімеру охолоджують потоком холодного повітря, які пере-



Рис. 3.21. Капронові нитки

творюються на волокна біло-прозорого забарвлення, дуже міцні на розрив, при скручуванні яких утворюються нитки (рис. 3.21). Капронова нитка діаметром 0,1 мм витримує 0,55 кг. Разом із високою міцністю капронові волокна характеризуються стійкістю до стирання, до дії багаторазової деформації (вигинів). Капронові волокна не вбирають вологу, тому не втрачають міцності у вологому стані. Цей матеріал відрізняється винятковою стійкістю до лугів, бензину, спирту, бензену, але малостійкий до дії кислот.

Капрон застосовують для виготовлення штучного волокна й технічних виробів (підшипників ковзання, шайб, гвинтів, втулок, зубчастих коліс, плівок, стрічок). Його діелектричні властивості залежать від вмісту води. В електротехніці рекомендовано застосовувати капрон, коли потрібна стійкість до масла, високих температур та ударних навантажень. Капронове волокно застосовують для ізоляції обмотувальних і деяких монтажних проводів, а також як основу електроізоляційних лакованих тканин.



Рис. 3.22. Стяжки з найлону

Найлон — поліамід, який використовують переважно у виробництві волокон. В електротехнічній промисловості його застосовують у виготовленні втулок, стяжок, хомутів, плівок і тонких покриттів (рис. 3.22). Найлон, нанесений тонкошаровим покриттям на поверхні, що труться, підвищує їхні експлуатаційні якості. Хороші антифрикційні властивості дають змогу застосовувати його в парах тертя без змащення або при недостатньому змащуванні. Матеріалами для композитів змащення на основі найлону є мінеральні масла, емульсії та вода. За температури до +150 °С мінеральні масла не впливають на найлон. Він не розчиняється в біль-

шості органічних розчинників, не піддається впливу слабких розчинів кислот, лугів і соленої води.

Поліестерні смоли — продукти поліконденсації різних спиртів і кислот (або їхніх ангідридів). Велике практичне значення мають ненасичені поліестерні смоли — продукти поліконденсації гліцерину з ненасиченими кислотами, наприклад фталевою, малеїновою тощо. Ці смоли широко застосовують для виготовлення термореактивних компаундів, для ізоляції електричних машин та апаратів, як зв'язувальні матеріали у виробництві шаруватих пластиків тощо. Мають хороші електроізоляційні властивості й високу нагрівостійкість. Найбільш поширені лавсанова та гліфталева смоли.

Лавсан (рис. 3.23) — поліестерне волокно, подібне до вовни, але має високу механічну міцність. Лавсан термостійкий, погано загоряється й

не обуглюється, не розчиняється в органічних розчинниках, але руйнується кислотами й лугами. Нитки із цього волокна мають низьку гігроскопічність і низький коефіцієнт тертя, стійкі до багаторазових деформацій при розтягуванні або вигині. Лавсан зберігає свої високі ударостійкі характеристики в робочому діапазоні температур від -40 до $+60$ °С. Матеріал має високу хімічну стійкість до впливу солей, спиртів, парафінів, мінерального масла, бензину, жирів та естерів. Має значну пластичність у холодному й нагрітому стані. Електричні властивості лавсану за температур до $+180$ °С змінюються незначно (навіть якщо є волога). Використовують для виготовлення канатів і тросів, ізоляції монтажних проводів, кіно- і фотоплівки, плівок для рентгену, магнітних плівок для відеозаписів, корозійностійких контейнерів.



Рис. 3.23. Тканина з лавсану

Гліфталева смола — продукт поліконденсації гліцерину та фталевого ангідриду. Смоли виробляють у чистому й модифікованому вигляді. Немодифікована смола має тверду та крихку структуру, прозору в тонкому шарі. Колір — від жовтого до темно-коричневого. Основне застосування мають гліфталеві смоли, модифіковані різними добавками. Вони краще розчиняються в органічних розчинниках, сумісні з іншими плівкоутворювальними речовинами. Як речовини для модифікації застосовують рослинні олії, жирні та смоляні кислоти. Гліфталеві смоли мають підвищену теплостійкість (до $+150$ °С), еластичність, стійкість до «старіння» за підвищених температур і високу адгезію. Відрізняються високими електроізоляційними властивостями й хорошою водостійкістю, що дає змогу широко застосовувати їх для виготовлення електроізоляційних пластиків та електроізоляційних лаків.

Поліміди — новий клас термостійких полімерів (до $+350$ °С), які хімічно стійкі, тугоплавкі, стійкі до термоокиснювальної деструкції та радіаційного опромінення, міцні, зносостійкі. Залежно від методу отримання та структури полімерного ланцюга поліміди можуть бути термопластичними й терморезистивними. Вони не розчиняються в органічних розчинниках, стійкі до масел, слабких кислот та основ, але гідролізуються під дією лугів і перегрітої пари. Поліміди використовують для виготовлення електроізоляційних плівок товщиною 8–100 мкм, зокрема фольгованих, призначених для гнучких друкованих плат, шлейфів та основ мікросхем; емалей для обмотувальних проводів, ізоляційних стрічок, заливних компаундів, волокон, клеїв, лаків. Вироби з полімідів можна експлуатувати в широкому діапазоні температур від -200 до $+350$ °С.

Поліуретани — лінійні полімери, у ланцюжках молекул яких між вуглеводневими залишками розташовані групи ($-\text{NHCOO}-$). За певних умов поліуретани можуть утворювати молекули просторової структури. Їх використовують для виготовлення пряжі, ниток, тканин; у виробництві лаків, компаундів, клеїв, антикорозійного покриття. Поліуретани

Розділ 3. Діелектричні матеріали

застосовують для емалювання проводів. Такі дроти більш нагрівостійкі, ніж лаковані, але поступаються дротам із поліестерною ізоляцією. Поліуретанові дроти дуже зручні під час монтажу, оскільки їх застосовують при паянні без зняття емалі.

Для полярних НЧ полімерів характерні висока діелектрична проникність, низький $\operatorname{tg} \delta$. Основні характеристики подано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Характеристики полярних НЧ полімерів

Параметр	Полівініл-хлорид	Фторопласт-3	Силікони	Лавсан	Капрон
Діелектрична проникність, ϵ	3,5–4,5	3,5	3,5	3–3,5	5–6
Тангенс кута діелектричних втрат, $\operatorname{tg} \delta$	0,2–0,5	0,04	0,01–0,03	0,002	0,06
Питомий опір ρ , Ом·м	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{12}	10^9
Робоча T_{\max} , °С	70	260	260	100	100
Робоча T_{\min} , °С	–35	–195	–70	–80	–40

3.5.3. Електроізоляційні пластмаси

Пластичні маси (пластмаси) об'єднують групу твердих або пружних матеріалів, які складаються повністю або частково з полімерних сполук. З них формують вироби методами, заснованими на використанні їхніх пластичних деформацій. Пластмаси отримують на основі різних натуральних і штучних смол. Вони успішно замінюють метали, фарфор, каучук, скло, шовк, шкіру й інші матеріали. Основна вихідна сировина для виробництва пластмас недорога й доступна (продукти перероблення нафти, природного газу, кухонної солі, вапно, пісок тощо). Перероблення пластмас у вироби — відносно нескладний і дешевий процес.

Пластмаси мають такі характеристики:

- порівняно високі механічні властивості, достатні для виготовлення виробів, які не піддають значним динамічним навантаженням;
- хороші електроізоляційні властивості, які дають змогу використовувати їх як діелектрики;
- висока стійкість до корозії;
- висока хімічна стійкість;
- низька гігроскопічність;
- легкість;
- широкий діапазон коефіцієнтів тертя і високий опір стиранню;
- хороші оптичні властивості й прозорість.

Основними недоліками пластмас є повзучість, тобто здатність матеріалу повільно деформуватися під дією постійних механічних навантажень; порівняно невисока теплостійкість; знижена міцність при змін-

них навантаженнях; швидке, порівняно з іншими матеріалами, «старіння». У складі пластмас є зв'язувальні речовини, наповнювачі, а також пластифікатори, стабілізатори й барвники.

Зв'язувальні речовини визначають переважно властивості деталей із пластмас і є органічними (полімери) та неорганічними (цементи, скло, смоли) речовинами, вміст яких у пластмасах коливається в межах 30–60 %.

Наповнювачі повинні мати здатність міцно зчіплюватися зі зв'язувальною речовиною. Вони надають пластмасам необхідні властивості: механічну міцність (деревне борошно, азбест), теплопровідність (мелений мармур, кварц), діелектричні властивості (мелена слюда, папір, бавовняні або склотканини), нагрівостійкість (азбест, скловолокно). Зазвичай пластмаси містять 40–70 % наповнювача.

Пластифікатори додають до пластмас для підвищення пластичності й холодостійкості. Як пластифікатори використовують маслоподібні рідини (стеарин, гліцерол, рицинова олія, камфора тощо). Проте велика кількість пластифікатора призводить до зниження механічної міцності пластмас.

Стабілізатори (сажа, сульфатні сполуки, феноли) сприяють тривалому збереженню пластмасами своїх основних властивостей та сповільнюють руйнування пластмаси від дії тепла, світла й інших чинників.

Барвники надають пластмасам певного забарвлення.

Пластмасам притаманні різноманітні властивості, тому й класифікувати їх можна за багатьма ознаками.

За способом перероблення пластмаси поділяють на прес-порошки та прес-матеріали, листові, фасонні, шаруваті й плівкові матеріали. Основними способами перероблення пластмас на вироби є лиття під тиском, пряме та ливарне пресування. Термопласти для лиття під тиском виготовляють як гранульовані порошки.

Залежно від використовуваних *зв'язувальних смол* пластмаси виробляють на основі кремнійорганічних, епоксидних, фенолформальдегідних, поліестерних смол.

Щодо *застосування*, то пластмаси є конструкційні, електроізоляційні та спеціальні (магнітодіелектрики, електропровідні тощо).

За *нагрівостійкістю* пластмаси поділяють на кілька класів:

– клас Е (ТІ +120 °С): плівки й волокна з поліетилентерефталату, матеріали на основі електроізоляційного картону й поліетилентерефталатної плівки, склолакотканини та лакотканини на основі поліетилентерефталатних волокон, термореактивні синтетичні смоли й компаунди (епоксидні, поліестерні, поліуретанові);

– клас В (ТІ +130 °С): матеріали на основі слюди, слюдопластів і слюдиніту, склотканини, азбестові волокнисті матеріали, ізоляції емальованих проводів, шаруваті пластики на основі скловолокнистих та азбестових матеріалів, термореактивні синтетичні компаунди, азбоцемент;

– клас F (TI +155 °C): матеріали на основі слюди, слюдиніту та слюдопластів без основи або з неорганічною основою, скловолокниста й азбестова ізоляція проводів, склотканини, шаруваті пластики на основі скловолокнистих та азбестових матеріалів;

– клас C (TI +180 °C): слюда, нелужне скло та скловолокнисті матеріали, електротехнічна кераміка, кварц, азбоцемент, шифер електротехнічний, матеріали зі слюди без основи або зі скловолокнистою основою, мікалексу, політетрафторетилен, полііміди.

Залежно від хімічного складу полімеру й характеру його переходу з в'язкотекучого в склоподібний стан пластмаси поділяють на:

– термопласти (термопластичні пластмаси) — під час нагрівання розплавляються, під час охолодження повертаються в початковий стан;

– реактопласти (терморективні пластмаси) — у початковому стані мають лінійну структуру макромолекул, а за деякої температури затвердіння набувають сітчастої структури. Після затвердіння не можуть переходити у в'язкотекучий стан. Робочі температури вищі, але під час нагрівання руйнуються, а під час наступного охолодження не відновлюють свої початкові властивості.

Є газонаповнені пластмаси — спінені пластичні маси, що мають малу щільність, пінопласти.

Термоусадкові пластмаси — матеріали на основі термополімерів, що мають властивість стискатися або розширюватися під час нагрівання гарячим повітрям, відкритим полум'ям або в гарячій воді. Виготовляють переважно з поліетилену низького або високого тиску та з інших полімерів. Температурний діапазон експлуатації термоусадкових виробів, залежно від матеріалу, може перебувати в проміжку від -60 до +260 °C. Найбільш поширені термоусадкові трубки з поліолефінів мають стандартну робочу температуру від -50 до +125 °C.

Ізоляційні термоусадкові вироби застосовують як замітник ізоляційної ПВХ-стрічки, для відновлення ізоляції пошкоджених проводів, для маркування кінців жил кабелю (різнобарвні або з літерними позначеннями), у складі термоусадкових кабельних муфт, як термоусадкові пластмасові заклепки для захисту від корозії.

3.5.4. Шаруваті пластики

Широке застосування як конструкційні й електроізоляційні матеріали мають **шаруваті пластики** — композиції, які виготовляють із волокнистого листового наповнювача — паперу, тканини, склотканини, просочених і склеєних між собою різними синтетичними смолами (фенолформальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні).

Шаруваті пластики відрізняються від інших матеріалів тим, що наповнювач, який використовують, розміщений паралельними шарами. Така структура забезпечує високі механічні характеристики, а використання синтетичних зв'язувальних речовин спричиняє досить високий питомий електричний опір, електричну міцність і мале значення $\text{tg } \delta$.

3.5. Тверді органічні діелектрики

Розрізняють кілька типів шаруватих пластиків: гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, азботекстоліт (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Склад шаруватих пластиків

Назва	Наповнювач	Зв'язувальна речовина
Гетинакс	Просочувальний папір завтовшки 0,1 мм	Фенолформальдегідна смола (ФФС)
Текстоліт	Бавовняна й синтетична тканини (саржа, бязь, міткаль, шифон, лавсан)	ФФС
Склотекстоліт	Склотканини з нелужного алюмо-боросилікатного скла	Поєднання ФФС та епоксидної смоли
Азботекстоліт	Азбестова тканина	Резольна ФФС

Гетинакс (рис. 3.24) — найдешевший шаруватий матеріал, отриманий шляхом гарячого пресування паперу, просоченого фенолформальдегідною (бакелітовою або епоксидною) смолою. Має високі діелектричні властивості. Електрична міцність становить приблизно 20–40 кВ/мм. Шарувата структура гетинаксу призводить до помітної анізотропії властивостей матеріалу — електрична міцність уздовж шарів наповнювача в 5–8 разів нижча, ніж упоперек. Зберігає свої параметри в інтервалі температур від -60 до $+105$ °С.

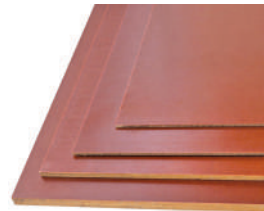


Рис. 3.24. Гетинакс листовий

Недоліком гетинаксу вважають підвищене вологовбирання (1,5–2,5 %) через шари паперу або з відкритих торцевих зрізів листів. Для підвищення вологостійкості готові вироби просочують бакелітовою смолою, розведеною в спирті. Гетинакс має низьку дугостійкість, розчиняється в кислотах і лугах.

Широко застосовують у радіоапаратурі як основу для друкованих плат. Листовий гетинакс завтовшки 0,4–50 мм використовують як щити, панелі, ізоляційні перегородки в пристроях низької напруги. Із цього матеріалу у вигляді трубок роблять каркаси котушок.

Гетинакс, позначений літерою Х, виготовляють із застосуванням модифікованої фенолформальдегідної смоли, він стійкий до дії мінерального масла, застосовують у маслонаповненій апаратурі високої напруги та в масляних трансформаторах.

Випускають спеціальні марки гетинаксу: ЛГ (лавсановий) і ГН (негорючий). У виробництві лавсанового гетинаксу використовують поліестерний папір. Негорючий гетинакс пресують із паперу, виготовленого з волокон поліаміду, і просочують епоксидними смолами. При цьому утворюються матеріали, що вирізняються хорошими електроізоляційними характеристиками для роботи в середовищі з нормальною та підвищеною вологістю. Допустимі температури: $+65$ – 150 °С.

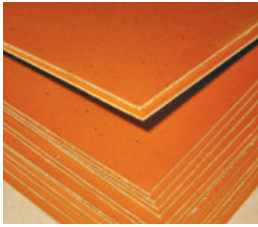


Рис. 3.25. Текстоліт

Текстоліт (рис. 3.25) отримують шляхом гарячого пресування бавовняної або синтетичної тканини, просоченої фенолформальдегідною смолою. Має високу міцність під час стискання та ударну в'язкість, тому використовують як конструкційний матеріал для виготовлення виробів, які піддають стиранню й ударним навантаженням: підшипників, втулок, кілець, шайб тощо.

Текстоліт виготовляють як листи завтовшки 0,5–8 мм і плити завтовшки до 70 мм. Інтервал робочих температур від -60 до $+150$ °С.

З текстоліту роблять панелі, каркаси, кріпильні планки. Він також є основою друкованих плат. Його широко використовують в електротехніці й радіоелектроніці як ізоляційний матеріал; для роботи в трансформаторному маслі й на повітрі в умовах нормальної вологості навколишнього середовища при частоті струму 50 Гц.

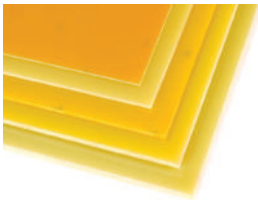


Рис. 3.26.
Склотекстоліт

Склотекстоліт (рис. 3.26) отримують шляхом гарячого пресування склотканини, просоченої терморективною епоксидною смолою. Завдяки властивостям наповнювача склотекстоліт має найвищу механічну міцність, тепло- і вологостійкість (електричні властивості залишаються високими й у вологому середовищі). Унаслідок незвичайної твердості поверхні склотекстоліти зносостійкі, але їх гірше обробляти механічно.

Існує кілька десятків марок склотекстолітів, призначених для різних цілей, зокрема підвищеної нагріво-, тропіко-, гальвано-, вогнестійкості. Склотекстоліт випускають як листи завтовшки 0,5–8 мм, плити завтовшки до 35 мм, стрижні та трубки. Із склотекстоліту виробляють шестерні, підшипники ковзання, втулки, прокладки, шайби. Інтервал робочих температур від -60 до понад $+200$ °С. Одна з найпоширеніших сфер застосування матеріалу — електротехніка, тому що склотекстоліт є основою для друкованих плат.

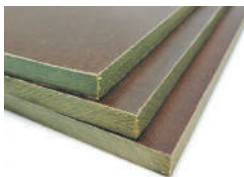


Рис. 3.27.
Азботекстоліт

Азботекстоліт (рис. 3.27) — шаруватий пластик, отриманий гарячим пресуванням азбестової тканини, просоченої фенолформальдегідною (бакелітовою) смолою. Випускають як плити завтовшки 6–30 мм. Має високу теплостійкість (до $+250$ °С). Відрізняється хімічною стійкістю, антикорозійними й електроізоляційними властивостями. Азботекстоліт застосовують переважно як термоізоля-

ційний та конструкційний матеріал для виготовлення деталей із підвищеною теплостійкістю.

Фольговані матеріали — це шаруваті пластики (гетинакс, склотекстоліт) або синтетичні плівки, облицьовані з одного або з обох боків

металевою (зазвичай мідною) фольгою (18, 30 або 50 мкм). Їх використовують як основу для друкованих плат, якість яких характеризується такими властивостями, як:

- міцність, оскільки друковані плати використовують не тільки як діелектричну основу, а як і несучу конструкцію;
- нагрівостійкість, що визначається за відсутністю здуття, розшарування та відклеювання фольги, які можуть виникати під час паяння;
- стабільність розмірів — відсутність зміни довжини при зміні температур під час паяння, коли перегрівається вся плата;
- електрична міцність.

Листові шаруваті пластики можна фольгувати двома методами. За першим металеву фольгу приклеюють до готового шаруватого пластику. Однак це викликає труднощі, пов'язані з недостатньо рівною поверхнею останнього, з відхиленнями в товщині склеюваних матеріалів. За другим методом її приклеюють одночасно з формуванням діелектричної основи. Це дає змогу використовувати для вирівнювання поверхні плинність зв'язувального наповнювача під час його нагрівання при пресуванні. Тому другий спосіб є основним.

Промисловість випускає різні марки фольгованих склотекстолітів і гетинаксів.

Фольгований склотекстоліт (рис. 3.28) — облицьований мідною фольгою. Випускають СФ-1-35, СФ-2-50 та ін., СФ-1-Н-50, СФ-2-Н-50. Літери СФ означають: склотекстоліт фольгований, перша цифра позначає товщину листа склотекстоліту в міліметрах, друга — указує товщину фольги в мікрометрах, літера Н — нагрівостійкість матеріалу. Перші дві марки застосовують для виготовлення друкованих плат із підвищеними електричними властивостями й вологостійкістю. Дві інші марки — для виготовлення друкованих плат із високою нагрівостійкістю (+180 °С) і підвищеною міцністю зчеплення фольги з основою. Випускають також СФГ-200-2 (гальваностійкий) і СФ-200-2 (нагрівостійкий) до +200 °С.

Фольгований гетинакс (рис. 3.29) менш міцний, ніж склотекстоліт, досить ламкий, але має кращі електроізоляційні властивості й учетверо дешевший за склотекстоліт. Його застосовують для виготовлення друкованих плат для апаратури масового виробництва.

Випускають ГФ-1-35 — гетинакс фольгований, товщина листа 1 мм, товщина фольги 0,035 мм; ГФ-2-50 — гетинакс фольгований, товщина листа 2 мм, товщина фольги 0,05 мм та ін.

Фольгований армований фторопласт-4 (ФАФ-4) — шарувата пластина, спресована зі

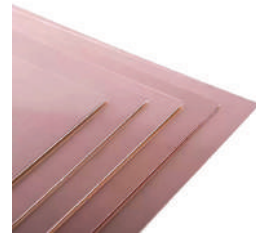


Рис. 3.28.
Фольгований склотекстоліт



Рис. 3.29.
Фольгований гетинакс

склолакотканини, просоченої суспензією фторопласту-4Д й облицьована мідною фольгою завтовшки 50 мкм. Пластини мають товщину 1,0–3,0 мм і призначені для виготовлення друкованих плат, які використовують за температури від -60 до $+250$ °С у діапазоні частот до 106 Гц.

3.5.5. Електроізоляційні плівки

Це тонкі плівки, виготовлені різними способами залежно від вихідного полімеру. Для підвищення їхньої механічної міцності застосовують той чи той прийом орієнтації молекул полімеру, у результаті чого вони витягуються в певному напрямку й закріплюються в такому стані.

Завдяки високим електричним властивостям, малій товщині, достатній механічній міцності та, у багатьох випадках, високій вологостійкості такі плівки є дуже цінним і прогресивним діелектричним матеріалом для виробництва конденсаторів, кабельних виробів тощо.

Властивості плівок обумовлені властивостями вихідних полімерів, тому їх можна поділити на два великі класи: неполярні та полярні.

Неполярні плівки

Полістирольну плівку (ПС) отримують методом витискання розм'якшеного (за температури $+140$ – 160 °С) полістиролу з одночасним розтягуванням у поздовжньому й поперечному напрямках. Промисловість випускає полістирольні плівки двох марок: ППСА — для конденсаторів і ППСБ — для кабелів і загальнопромислового застосування. *Переваги* полістирольних плівок: висока вологостійкість і малі діелектричні втрати. *Недоліки*: порівняно невисока температура розм'якшення і низька механічна міцність при надриві.

Поліетиленова плівка (ПЕ) найдешевша, міцна й еластична, вона схильна до впливу нафтового масла й за досить високої температури розчиняється в ньому. Це обмежує її застосування в конденсаторах, кабелях і монтажних проводах. *Переваги* плівки: висока холодостійкість (до -60 °С) і низька вологопроникність.

Поліпропіленова плівка (ПП) за властивостями подібна до поліетиленової, що пояснюється подібністю вихідних полімерів. Поліпропіленову плівку використовують у високовольтних конденсаторах як комбіновану паперово-плівкову ізоляцію. Робоча температура: $+110$ – 130 °С.

Політетрафторетиленова плівка (ПТФЕ) найбільш нагрівостійка (до $+250$ °С) з неполярних синтетичних плівок, завтовшки 20–150 мкм. Їх використовують як ізоляцію в проводах, кабелях, мікромашинах та іншому електроустаткуванні, що працює за високих температур. Широке застосування ПТФЕ обмежує її висока вартість.

Полярні плівки

З полярних синтетичних електроізоляційних плівок найвідоміші поліетилентерефталатна (лавсанова) плівка, плівки з естерів целюлози, полікарбонатна (ПК), поліамідна (ПАМ), полівінілхлоридна (ПВХ). Їх використовують у конденсаторному й кабельному виробництві. Для ізоляції обмоток низьковольтних електричних машин важливу роль відіграють полярні плівки з підвищеною нагрівостійкістю. Мала товщина плівок разом із високими значеннями електричної й механічної міцності забезпечує не тільки збільшення надійності, а й істотне поліпшення техніко-економічних показників. Застосування плівок завтовшки 0,2–0,35 мм дає нагоду механізувати обмотувально-ізолювальні роботи.

Для потреб мікроелектроніки освоєно випуск гнучких фольгованих плівок, які дають змогу в десятки разів зменшити масу й об'єм апаратури, знизити витрати на її виробництво.

3.5.6. Каучуки та гуми

Еластомери — це матеріали, які за нормальної температури мають високу еластичність, тобто здатність після деформації відновлювати свою форму. До них належать натуральний і синтетичний каучуки, гуми.

Натуральний (природний) каучук отримують з особливих рослин — каучуконосів, які містять каучук у соку (латексі), що є суспензією у воді дрібних частинок округлої форми (глобул). Каучук виділяється під час коагуляції латексу й видаленні домішок. Коли натуральний каучук нагрівають до +50 °С, тоді він утрачає еластичні властивості, розм'якшується і стає липким, а за низьких температур — крихким. Розчиняється у вуглеводнях і сірковуглеці. Розчин каучуку в бензині називають *гумовим клеєм*, який застосовують для склеювання каучуку й гуми. Обсяги добутого натурального каучуку недостатні для задоволення потреб у ньому. Тому вчені створили синтетичний каучук, який успішно замінює природний.

Синтетичний каучук (СК) є продуктом полімеризації вуглеводневого, бутадієнового, силоксанового мономерів та інших типів переважно за участю каталізаторів. Молекули синтетичних каучуків відрізняються від молекул натуральних каучуків більшим ступенем розгалуженості, а поєднання різних ланок при полімеризації дає змогу отримувати велику різноманітність сополімерів із широким набором фізико-механічних і спеціальних характеристик. Основними видами СК, які мають найбільше практичне значення, є бутадієнові (полібутадієни — продукти полімеризації бутадієну) і бутадієнстирольні, що належать до групи СК загального призначення, а також кремнійорганічні, поліуретанові й каучуки інших видів, які зараховують до СК спеціального призначення.

Головне застосування майже всіх каучуків — перероблення на гумово-технічні матеріали та вироби. Основним процесом перероблення каучуків на гуму є *вулканізація* — це процес перетворення сирого природ-

ного (натурального) або синтетичного каучуку на гуму шляхом нагрівання його із сіркою до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, що приводить до утворення просторово-сітчастої структури. Вулканізація сприяє підвищенню нагріво-ї холодостійкості гуми, механічної міцності та стійкості до розчинників. Вміст каучуку істотно впливає на електричну міцність гуми: при збільшенні відсотка каучуку електрична міцність гуми зростає. Для отримання ізоляційної гуми в гумову суміш уводять специфічні наповнювачі (крейду, тальк, мелену слюду тощо), а для фарбування — пігменти й барвники (сажу, цинкові білила тощо).

Головна перевага гуми — її еластичність. Вона може розтягуватися та гнутися, а потім набувати початкової форми. Гума може бути м'якою та твердою. Додаючи 1–3 % сірки, отримують м'яку гуму (висока деформація і пружність), а при додаванні 30–35 % сірки — тверду гуму (ебоніт), твердий матеріал із високою стійкістю до ударних навантажень.

Існують гуми різного призначення — для експлуатації за високих або низьких температур (тепло- або холодостійкі), для тривалого контакту з маслами (маслостійкі), кислотами й лугами, стійкі до рентгенівського випромінювання тощо. В електропромисловості гуму застосовують як конструкційний і діелектричний матеріал. Гума *для захисних оболонок* (шлангова гума) повинна мати підвищену механічну міцність і хімічну стійкість. Та, яку застосовують безпосередньо *для ізоляції* струмопровідних жил кабелів, проводів, ізоляційних труб, захисних рукавичок, килимків тощо, повинна мати підвищені електроізоляційні властивості: малі діелектричні втрати й високу електричну міцність. Отримують такі гуми з кремнійорганічних, етиленпропіленових каучуків, ізопренів, наповнених світлими мінеральними наповнювачами.

Недоліком гуми є різко виражена залежність механічних властивостей від температури: при її підвищенні вона втрачає міцність, а при її пониженні стає крихкою. Крім того, під дією кисню, озону й інших окиснювальних реагентів гума «старіє», тобто стає крихкою та ламкою, укривається сіткою тріщин, що обмежує термін її експлуатації. Залишки вільної сірки (не пов'язаної хімічно з каучуком) у гумі погано впливають на мідь: утворюється купрум(II) сульфід (CuS). Тому гумову ізоляцію безпосередньо не накладають на мідну жилу. Мідь покривають роздільником, наприклад оловом. На алюміній гуму можна накладати безпосередньо.

3.5.7. Волокнисті діелектрики

Волокнисті матеріали складаються із частинок подовженої форми — волокон, проміжки між якими заповнені повітрям у непросочених матеріалів і природними або синтетичними смолами чи маслами — у просочених. Волокнисті матеріали недорогі, мають велику механічну міцність, гнучкість, зручні в обробленні. Для них характерні невисока електрична міцність і теплопровідність. Головний недолік — гігроскопічність. Просочення поліпшує властивості волокнистих матеріалів.

Деревина — один із перших електроізоляційних і конструкційних матеріалів (завдяки своїй дешевизні та легкості механічного оброблення). Основою деревини, як будь-якого рослинного волокна, є органічна речовина — целюлоза, найбільш поширений природний полімер, який залишається одним із головних видів вихідної сировини в паперовій і текстильній галузях промисловості.

Папери й картони — це листові або рулонні матеріали коротковолокнистої будови, що складаються переважно з деревної целюлози. Для видалення домішок, що містяться в деревині, целюлозу обробляють хімічними реагентами: для писального (білого) паперу — сульфатною кислотою (H_2SO_4), а для паперів, призначених для електроізоляції, використовують лужне оброблення. Лужна целюлоза не відбілюється, зберігає жовтуватий колір, обумовлений барвниками деревини. Вона дорожча за сульфатну, однак у ній вихідна целюлоза зберігає більшу молекулярну масу й довжину молекул. Лужний папір має вищу механічну міцність, він стійкіший до теплового «старіння». Методом сульфатного варіння (оброблення деревної тріски водним розчином гідроксиду та сульфату натрію) отримують сульфатну целюлозу, яку застосовують під час виготовлення електроізоляційного паперу.

Конденсаторний папір (рис. 3.30) — найтонший (від 4 до 30 мкм) і найбільш високоякісний з електроізоляційних паперів, який у просоченому вигляді застосовують для виготовлення діелектрика конденсаторів. Виготовляють із сульфатної деревної целюлози. Щільність конденсаторних паперів досягає $1,6 \text{ т/м}^3$, тобто більше ніж у півтора раза перевищує щільність води. При цьому електрична міцність паперу завтовшки 10 мкм, просоченого конденсаторним маслом, становить до 10 кВ/мм. Конденсаторний папір залишається основним типом твердого органічного діелектрика, оскільки має високі значення електричної й механічної міцності, необмежену сировинну базу; відносно дешевий. Для поліпшення електричних характеристик паперу його сушать у вакуумі й просочують рідким діелектриком. Оскільки збільшується однорідність розподілу напруги між порами та клітковиною, це сприяє підвищенню електричної міцності. Для просочення використовують попередньо очищену рідину, що за своїми діелектричними характеристиками відповідає заданим нормам. Це спеціальні газостійкі мінеральні масла й синтетичні рідини на основі хлордифенілу. Останні є полярними рідинами й мають діелектричну проникність (ϵ) 4,8–5,5 замість 2,2 в мінерального масла.



Рис. 3.30.
Конденсаторний папір

Конденсаторний папір є чотирьох видів: КОН — звичайний; СКОН — спеціальний підвищеної надійності; МКОН — із малими діелектричними втратами; ЕМКОН — високої електричної міцності з малими діелек-

Розділ 3. Діелектричні матеріали

тричними втратами і двох типів: Н — низької вологості, В — збільшеної електричної міцності.

Різні марки конденсаторного паперу мають різні показники електричної міцності (залежить від матеріалу просочення) та діелектричних втрат. Залежно від призначення товщина паперу може становити 4–30 мкм, щільність — 0,8–1,4 г/см³ (менш щільний призначений для роботи під час змінної напруги, більш щільний — під час постійної та імпульсної напруги).



Рис. 3.31. Кабельний папір

Кабельний папір (рис. 3.31) є основним діелектриком для силових і маслонаповнених кабелів, для ізоляції телефонних кабелів та обмотувальних проводів, для виготовлення різних електроізоляційних виробів і розділового шару силових кабелів із пластмасовою ізоляцією. Застосування кабельного паперу обумовлено тим, що така ізоляція хімічно стабільна, стійка до впливу електричних полів, може тривалий час працювати за підвищених температур (до +85 °С), економніша, порівняно з іншими типами ізоляційних матеріалів (пластмаси, гуми), що застосовують у кабелях для передавання електроенергії.

Кабельний папір складається з волокон сульфатної соснової або хвойної целюлози, розташованих так, щоб утворилося механічно міцне полотно. Буває одношаровим, двошаровим і чотиришаровим. Багатошарові папери, порівняно з двошаровими, мають більшу гнучкість, еластичність і меншу повітропроникність, а отже, і більшу електричну міцність. Кабелі з паперовою ізоляцією, яка має в'язке просочення, випускають для напруги 1, 3, 6, 10, 20 і 35 кВ. Просочення підвищує електричну міцність ізоляції з 3–5 до 40–80 МВ/м. Для просочувального складу потрібна висока в'язкість за температури експлуатації +50–85 °С та малий коефіцієнт температурного розширення. Цим вимогам відповідають маслоканіфольні склади. Зазвичай застосовують склад МП-3, який містить 5–10 % каніфолі, 1–5 % поліетиленового воску та нафтове кабельне просочувальне масло марки КМ-25.

Кабельні папери випускають двошаровими й маркують літерами К (К-080, К-120, К-170) і КВ (КВ-030, КВ-045, КВ-080, КВ-120, КВ-170, КВ-240). Папери, які маркують літерами КМ (КМ-120, КМ-170) і КВМ (КВМ-080, КВМ-120, КВМ-170), складаються з трьох і чотирьох шарів. Літери в маркуванні паперів означають: К — кабельний, КВ — кабельний високовольтний, КВМ — кабельний високовольтний багатошаровий; додавання літери «у» — ущільнений на напругу 110 кВ і вище. Цифрами від 015 до 240 позначають товщину кабельного паперу в мікрометрах.

Просочувальний електроізоляційний папір (рис. 3.32) застосовують для виготовлення листового гетинаксу. Відповідно до вимог чинних стандартів, папір виготовляють зі 100 % -ї сульфатної целюлози. У мар-

куванні папір має літери: ЕІ — електроізоляційний; П — просочувальний; цифри — маса паперу в грамах на 1 м². Додатково: літера А — зниженого поглинання; літера Б — підвищеного поглинання. Виробляють таких марок: ЕІП-50, ЕІП-66А, ЕІП-66Б, ЕІП-78, ЕІП-120. Папір марки ЕІП-50 виготовляють у рулонах завширшки 500 і 1000 мм; марок ЕІП-66А, ЕІП-66Б, ЕІП-78, ЕІП-120 — у рулонах завширшки 1000, 1500 і 2500 мм. Граничні відхилення по ширині рулону не мають перевищувати ±5 мм.

Картон електроізоляційний (рис. 3.33) відрізняється від паперу більшою товщиною. Є два типи картону: повітряний (більш щільний, марка ЕВ) і масляний (більш пухкий, марка ЕМ), призначений для роботи в маслонаповнених агрегатах. Картон, як правило, використовують після просочення трансформаторним маслом. Електрична міцність просоченого картону досягає 40–50 кВ/мм.

Недоліком його є гігроскопічність: у результаті потрапляння вологи різко зменшується механічна й електрична міцність (учетверо й більше разів). Електротехнічний картон використовують як діелектричні дистанційні прокладки, шайби, розпірки, як ізоляцію між магнітопроводом трансформатора та ярмовими балками, як пазову ізоляцію і прокладки в електричних машинах тощо.

Електроізоляційний картон марок ЕВ, ЕМ завтовшки до 0,5 мм випускають у рулонах і листах, а понад 0,5 мм — тільки в листах розмірами 900×900; 900×1000; 1000×1000 мм.

Фібра електротехнічна (ФЕ) листова (рис. 3.34) складається зі спресованого паперу або картону та суміші целюлози з деревною субстанцією. Листи просочують хлористим цинком або хлористим кальцієм, після чого вони набувають характерного червоного кольору. Товщина листів: 0,6–3,0 мм, розміри листів: 1100×2000; 1350×2000 мм. Попри низьку щільність (1,0–1,5 кг/м³), листи фібри надзвичайно міцні й еластичні. Вона стійка до ударів і стирання, має високі теплоізоляційні й електроізоляційні властивості, не накопичує статичну електрику, а в разі утворення дуги при розриві або замиканні контактів виділяє особливий газ, який гасить цю дугу. Тому з фібри виготовляють дугогасні прокладки розрядних пристроїв та інших апаратів. Вона стійка до впливу нафти, спирту, бензину та бензену, естеру й органічних розчинників, негорюча.



Рис. 3.32. Просочувальний електроізоляційний папір



Рис. 3.33. Картон електроізоляційний



Рис. 3.34. Фібра електротехнічна

В електротехніці фібру застосовують для виготовлення електроізоляційних деталей, прокладок у роторах і статорах постійного та змінного струму, у низьковольтному обладнанні тощо.

Текстильна продукція (пряжа й тканини) також належить до волокнистих електроізоляційних матеріалів, які виготовляють із природних, синтетичних і мінеральних волокон. Використовують натуральну бавовну, віскозний та ацетатний шовк, лавсанові, поліетиленові, поліамідні, азбестові й інші волокна. Пряжу застосовують для захисних покриттів кабелів та обмоток проводів; стрічки й тканини — для захисту ізоляції електричних машин та апаратів. Тканини також використовують для виготовлення лакотканин і шаруватих пластиків.

Бавовняну стрічку (кіперна, тафтяна, міткалева, батистова) виготовляють із бавовняної пряжі різного плетіння (саржевого, полотняного) як смужки завширшки 10–60 мм і завтовшки 0,12–0,45 мм. Застосовують для захисту від механічних пошкоджень лобових частин обмоток електричних машин.

Електроізоляційні лакотканини виробляють із бавовняних, шовкових і капронових тканин, просочених світлим олійним або чорним олійно-бітумним електроізоляційним лаком. Тканина забезпечує значну механічну міцність, а лакова плівка — електричну міцність матеріалу. Товщина бавовняної лакотканини — 0,15–0,24 мм, шовкової та капронової — 0,04–0,15 мм; ширина рулонів — 700–1000 мм. Шовкові лакотканини дорожчі, але тонші й мають вищу електричну міцність.

Світлі лакотканини відносно стійкі до дії органічних розчинників, але мають високу схильність до теплового «старіння». Їхня електрична міцність становить від 35–50 кВ/мм (бавовна) до 55–90 кВ/мм (шовк). Чорні лакотканини мають кращі електроізоляційні властивості, їхня електрична міцність становить 55–60 кВ/мм, але гігроскопічність чорних лакотканин значно нижча, ніж світлих.

Лакотканини застосовують як електроізоляційні прокладки в електричних машинах і приладах, а також для міжшарової ізоляції котушок, ізоляції проводів, стрижнів, для виготовлення пазової ізоляції електричних машин, в апаратах, кабельних виробах найчастіше разом зі спеціальним електроізоляційним папером або електроізоляційним картоном.

Маркування лакотканин складається з літер і цифр. Літери позначають: Л — лакотканина; Ш — шовкова, К — капронова; М — на основі масляного лаку; Б — на основі бітумно-олійного лаку. Цифри позначають нагрівостійкість лакотканини (°С). Наприклад, ЛМШ-105 — лакотканина масляна, шовкова, для тривалої роботи за температур +105 °С.

Лакопапір — просочений олійним лаком, конденсаторний чи інший електротехнічний папір. Отримують гнучкий матеріал із високою електричною міцністю, який, однак, поступається лакотканині в механічній міцності. Товщина лакопаперу — 0,04–0,10 мм.

До лакотканин і лакопаперів належать також *електроізоляційні трубки* — плетені панчохи та шнури, просочені електроізоляційними лаками. Застосовують для захисту вивідних кінців в електричних машинах і приладах.

Склолакотканини просочують кремнійорганічними, поліестерними, бітумно-олійними лаками або бутадієнстирольними й полістирольними латексами. Залежно від виду просочення матеріали мають робочу температуру в межах +105–180 °С. Склолакотканину марки ЛСК-7 виготовляють із нелужної склотканини, просоченої теплостійким кремнійорганічним лаком К-44 і випускають завтовшки 0,11 та 0,15 мм. Застосовують як нагрівно- й вологостійку ізоляцію обмоток електричних машин.

Скlostрічки завширшки 8–50 мм і завтовшки 0,08–0,2 мм виготовляють із кручених скляних ниток. Відрізняються від бавовняних більшою міцністю на розрив, вищими ізоляційними властивостями. Застосовують для ізоляції обмоток електричних машин і захисту їх від механічних пошкоджень.

Азбест (або *гірський льон*) — назва деяких тонковолокнистих мінералів із класу силікатів, що утворюють у природі агрегати, які складаються з найтонших гнучких волокон. У чистому вигляді один із видів азбесту — хризотил — має низьку електропровідність, що робить його високоякісним електроізоляційним матеріалом. Серед важливих властивостей азбесту — його висока теплостійкість. Азбест хімічно інертний, на нього не діють сонячна радіація, озон, кисень, він не виділяє шкідливих газів, парів і випромінювання. Його волокна широко застосовують там, де потрібні висока кислото- й теплостійкість. Найширше застосовують азбест у виробництві композиційних матеріалів. Головним компонентом цієї групи є різновид цементу — азбоцемент.

3.5.8. Лаки й емалі

Лаки — колоїдні розчини смол, бітумів, масел, що висихають, і подібних речовин, які утворюють так звану лакову основу в розчинниках. Під час сушіння лаку розчинник випаровується, а лакова основа переходить у твердий стан, утворюючи лакову плівку. Електроізоляційні лаки використовують для захисту елементів електроапаратури від корозії, пилу та вологи. Електроізоляційні лаки поділяють за застосуванням на три основні групи: просочувальні, покривні та клейкі.

Просочувальні лаки використовують для просочення пористої, волокнистої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина, ізоляція обмоток електричних машин та апаратів). Після просочення пори в ізоляції заповнюються не повітрям, а лаком, який має значно вищу електричну міцність й теплопровідність, ніж повітря. Унаслідок просочення підвищується пробивна напруга, зростає теплопровідність, зменшується гігроскопічність і вологопроникність, поліпшуються механічні властивості ізоляції, підвищується нагрівостійкість.

Просочувальні електроізоляційні лаки добре цементують витки обмоток електричних машин (особливо обертових), оптимально швидко висихають, характеризуються високими діелектричними властивостями, теплостійкі, еластичні. В окремих випадках просочувальний лак повинен мати підвищену вологостійкість і стійкість до впливу тропічних умов, маслостійкість і хімічну стійкість. До просочувальних електроізоляційних лаків належать також лаки для просочення паперу й тканин під час виготовлення шаруватих пластиків (у цьому випадку лаки також склеюють окремі аркуші паперу або тканини під час виробництва лакотканин і лакопаперів).

Покривні лаки використовують для утворення механічно міцної, гладенької, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні виробів. Нерідко ними покривають тверду пористу ізоляцію, попередньо вже просочену. Покривні лаки захищають обмотки від дії мастил, механічних пошкоджень, атмосферних впливів, щіткового пилу, хімічних реагентів тощо. Це поліпшує властивості твердої ізоляції (зокрема, підвищує напругу поверхневого розряду й поверхневого опору, посилює захист ізоляції від дії вологи або хімічно активних речовин), а також поліпшує зовнішній вигляд виробу. Деякі види покривних лаків наносять не на тверду ізоляцію (лакування обплетення монтажних проводів), а безпосередньо на метал, утворюючи на його поверхні електроізоляційний шар (ізоляція листів електротехнічної сталі, магнітопроводів трансформаторів, електричних машин та апаратів).

Для покривних лаків особливо важливі певна швидкість висихання, добра адгезія щодо поверхонь, які покривають, здатність лакової плівки в деяких випадках бути еластичною.

Клейкі лаки застосовують для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів (наприклад, склеювання листочків розщепленої слюди при виготовленні міканітів), приклеювання до основи плівкових матеріалів та електроізоляційних матеріалів до металу, виготовлення різних композиційних електроізоляційних матеріалів тощо. Для клейких лаків особливо важлива максимальна адгезія до матеріалів, які склеюють.

Емалі — це різновид лаків, до складу яких уведено пігменти — неорганічні наповнювачі (цинк оксид, титан оксид, залізний сурик ін.), що надають лакам відповідного кольору. Пігменти також підвищують твердість, механічну міцність, вологостійкість та інші властивості лакових плівок. Емалі належать до покривних матеріалів.

За способом сушіння розрізняють *електроізоляційні лаки й емалі гарячого (пічного) і холодного (повітряного) сушіння*. Перші вимагають для свого затвердіння високої температури (+80–200 °С), а другі висихають за кімнатної температури. Лаки й емалі гарячого сушіння, як правило, мають вищі діелектричні, механічні й інші властивості. Для поліпшення характеристик лаків та емалей повітряного сушіння,

а також для прискорення затвердіння їх сушать іноді за підвищених температур (+40–80 °С).

За складом електроізоляційні лаки й емалі можна поділити на:

– *полімерні* — полістирольний та епоксидний лаки, тобто ті, у яких плівкоутворювальними елементами є полімери — полістирол, полівінілхлорид і смоли (епоксидна, кремнійорганічна);

– *нітроцелюлозні* — розчини нітроцелюлози в ацетоні; вони швидко висихають, але мають погану адгезію до металу й малу нагрівостійкість;

– *олійні* — до їхнього складу входять лляні олії або синтетичні масла, що висихають.

В олійних лаках використовують дефіцитні натуральні лляні й тунгові олії, тому їх замінюють лаками на основі синтетичних смол, які стійкіші до теплового «старіння».

Олійно-бітумні лаки утворюють гнучкі плівки чорного кольору, які стійкі до вологи, але легко розчиняються в мінеральному трансформаторному маслі. За нагрівостійкістю вони належать до класу А (+105 °С).

Гліфталеві й олійно-гліфталеві лаки й емалі вирізняються хорошою клейовою здатністю до слюди, паперів, тканин і пластмас. Плівки цих лаків мають підвищену нагрівостійкість (клас В). Вони стійкі до нагрітого мінерального масла, але потребують гарячого сушіння за температур +120–130 °С. Чисто гліфталеві лаки на основі немодифікованих гліфталевих смол утворюють тверді негнучкі плівки, які використовують у виробництві твердої слюдяної ізоляції (тверді міканіти). Олійно-гліфталеві лаки після висихання дають гнучкі еластичні плівки жовтого кольору.

Кремнійорганічні лаки й емалі відрізняються високою нагрівостійкістю, можуть довго працювати за температур у межах +180–200 °С, тому їх застосовують у поєднанні зі скловолокнистою і слюдяною ізоляцією. Крім того, плівки мають високу вологостійкість і стійкість до електричних іскор.

Лаки й емалі на основі поліхлорвінілових смол стійкі до води, нагрітого масла, до кислих і лужних хімічних реагентів, тому їх застосовують як покривні для захисту обмоток, а також металевих деталей від корозії. Необхідно звернути увагу на слабе прилипання поліхлорвінілових лаків та емалей до поверхонь. Тому останні спочатку ґрунтують й лише потім покривають лаком або емаллю на основі поліхлорвінілових смол. Ці лаки й емалі сушать за температури +20 °С, а також +50–60 °С. Недоліками таких покриттів є їхня невисока робоча температура (+60–70 °С).

Лаки й емалі на основі епоксидних смол відрізняються високою клейовою здатністю та підвищеною нагрівостійкістю (до +130 °С).

Лаки на основі алкідних і фенольних смол (фенолоалкідні лаки) добре висихають у товстих шарах, утворюючи еластичні плівки, здатні довго працювати за температур +120–130 °С. Плівки цих лаків волого- й маслостійкі.

Водно-емульсійні лаки — це стійкі емульсійні лакові основи, розчинені у водопровідній воді. Їх виготовляють із синтетичних смол, а також із масел, що висихають, і їхніх сумішей. Водно-емульсійні лаки пожежо- і вибухобезпечні, тому що в складі їх немає легкозаймистих органічних розчинників. Через малу в'язкість такі лаки мають добру здатність просочувати матеріали й вироби. Їх застосовують для просочення нерухомих і рухомих обмоток електричних машин та апаратів, які тривалий час працюють за температури до +105 °С.

3.5.9. Компаунди

Компаунди — це суміші різних ізоляційних речовин (смол, бітумів, естерів, восків, масла тощо), які в момент застосування знаходяться в рідкому стані, а після охолодження або в результаті хімічних процесів, що відбуваються в них, набувають твердого стану. Компаунди відрізняються від лаків відсутністю в їхньому складі розчинника. Якщо компаунди у початковому стані тверді, їх перед уживанням нагрівають до необхідної температури, щоб отримати масу низької в'язкості. За призначенням електроізоляційні компаунди ділять на просочувальні та заливальні.

Просочувальні компаунди застосовують для заповнення пор, капілярів і повітряних уключень в електроізоляційних матеріалах, здебільшого для обмоток електричних машин, котушок апаратів, трансформаторів та інших електротехнічних конструкцій. Після просочення підвищується електрична міцність матеріалу й усієї конструкції в цілому, поліпшуються теплопровідність, тепловіддача обмоток, що дає змогу збільшити потужність електричних машин та апаратів при тих же розмірах, зростають механічна міцність, вологостійкість, термін використання всієї конструкції.

Заливальні компаунди застосовують для заповнення порожнин конструкцій, проміжків між різними деталями, захисту ізоляції від вологи, збільшення пробивної напруги, поліпшення тепловідведення й підвищення механічної міцності тощо.

Щодо нагрівання електроізоляційні компаунди поділяють на термопластичні й термореактивні.

Термопластичні компаунди — тверді за нормальної температури, під час нагрівання розм'якшуються, стають пластичними й переходять у рідкий стан, а під час охолодження знову тверднуть. Розплавлення та затвердіння цієї групи компаундів можна повторювати багаторазово. Для їхнього виготовлення часто застосовують нафтові бітуми в поєднанні з рослинними оліями й мінеральними маслами, каніфоллю та деякими термопластичними полімерами.

Термореактивні компаунди в момент їхнього застосування перебувають у рідкому стані, а потім тверднуть у результаті хімічних реакцій, які відбуваються в них. Затвердіння компаундів цієї групи відбувається під дією отверджувача (каталізатора). Після затвердіння термореактивний компаунд стає неплавким і нерозчинним у звичайних розчинниках.

Ця група компаундів є *гарячого й холодного затвердіння*. Компаунди гарячого затвердіння переходять у твердий стан під час спеціального термічного оброблення, а компаунди холодного затвердіння переходять у твердий стан лише під дією отверджувача.

З термореактивних компаундів найбільш поширені в електронній техніці **епоксидні компаунди**, що відрізняються високою механічною міцністю, високою нагрівостійкістю, а також хорошими електричними властивостями. Однак під час роботи з епоксидними компаундами необхідно пам'ятати, що в незатверділому стані смоли й пари отверджувачів є токсичними речовинами, тому потрібно захищати відкриті ділянки шкіри обличчя і рук від потрапляння смоли, а технологічний процес проводити під витяжкою. Затверділі епоксидні композиції нетоксичні.

Компаунди широко використовують для просочення та заливання окремих вузлів електро- й радіоапаратури: трансформаторів, дроселів, конденсаторів. Їх застосовують також для герметизації й опресовування дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Деякі різновиди епоксидних компаундів мають високу оптичну однорідність і прозорість до випромінювання у видимій і ближній інфрачервоній ділянках спектра. Завдяки цим властивостям їх використовують як оптичні узгоджувальні середовища під час виведення випромінювання зі світлодіодів.

3.5.10. Клеї та герметики

Клеї — композиції на основі речовин, здатних з'єднувати (склеювати) тверді тіла завдяки утворенню між поверхнями, що сполучаються, і клейовим прошарком міцних адгезійних зв'язків. До складу клейової композиції входять отверджувачі й домішки (наповнювачі, розчинники, стабілізатори, пластифікатори тощо). Домішками регулюють специфічні властивості клею — липкість (здатність клею «зчіплюватися» з поверхнею деталі за кімнатної температури), в'язкість, швидкість затвердіння, збереження життєздатності (час, протягом якого клей придатний для застосування), а також експлуатаційні властивості клейового прошарку — міцність, жорсткість, термо-, морозо-, атмосферостійкість тощо.

За типом основи клеї поділяють на органічні та неорганічні.

До **неорганічних клеїв** належать клеї на основі речовин неорганічної природи, що належать до груп *мінеральних* і *металевих* клеїв. Мінеральні клеї виготовляють як порошки, розчини та дисперсії, переважно на основі оксидів і силікатів металів.

Керамічні клеї — композиції на основі оксидів Mg, Al, Si, Zr та оксидів лужних металів із високою температурою плавлення. Технологія їхнього виготовлення складається з операцій сплаву компонентів, швидкого охолодження сплаву у воді, сушіння, подрібнення та змішування з наповнювачами й іншими модифікаторами. Клей наносять на

поверхні виробів, які сполучають при невеликому тиску й за температури, що на $+20-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ перевищує температуру плавлення композиту. Такі клейові з'єднання можуть працювати за температури до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і застосовуються для склеювання кераміки, металів, графіту й інших термостійких матеріалів в авіаційній та електронній промисловості.

Силікатні клеї — водні розчини силікатів натрію або калію (рідке скло) чи дисперсії на їхній основі, які можуть містити наповнювачі (глина, CuO , SiO_2) і домішки (P_2O_5 або ін.). Силікатні клеї тверднуть за кімнатної температури або за температури до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в результаті випаровування води та коагуляції дисперсної фази. Клейові з'єднання здатні працювати за температури до $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Їх використовують у радіоелектроніці, авіаційній промисловості для склеювання кераміки, скла, металів, картону, паперу й інших матеріалів.

Металеві клеї поділяють на пасти, порошки та клеї-плівки.

Клеї-пасти отримують на основі рідкого металу, наприклад галію ($t_{\text{пл}} \approx 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), та порошку більш тугоплавкого металу (Cu , Al , Fe , Ni , Mg). Компоненти клею змішують безпосередньо перед застосуванням за температури, яка незначно перевищує температуру плавлення рідкого металу. Пасту наносять на поверхні склеюваних деталей, які попередньо притирають одну до одної. У результаті дифузії рідкого металу в поверхневий шар тугоплавких частинок і фізико-хімічної взаємодії компонентів у клейовому шарі утворюються міжметалічні сполуки та тверді розчини, які мають високі температури плавлення. Пасти переходять у твердий стан за кімнатної або підвищеної ($+120-140\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур.

Клеї-порошки виготовляють із легкоплавких сплавів на основі Bi , Pb , Sn , Cd .

Клеї-плівки — це попередньо спечені стрічки з тугоплавких металів, які перед використанням просочують рідким металом.

Металеві клеї надають клейовому шву високу міцність (до 30 МПа при рівномірному відриві), тепло- й електропровідність. Використовують у радіотехнічній, авіаційній та інших галузях промисловості для склеювання металів, кварцу, скла, а також для з'єднання металів із керамікою, кремнієм і феритами.

Органічні клеї поділяють на природні й синтетичні. *Природні клеї* виготовляють на основі клейких природних полімерів тваринного й рослинного походження. Вони можуть містити домішки: розчинники (вода), антисептики (саліцилова або борна кислота), стабілізатори (луги, рідке скло), а також смоли, що підвищують липкість (каніфоль).

Тваринні клеї отримують із матеріалів, багатих на колаген, а також із казеїну й продуктів його перероблення. Клеї застосовують для склеювання деревини, шкіри, фанери, паперу, картону, паперу зі склом, деревини з тканиною, для приготування клейових фарб. Міцність клейових з'єднань при зсуві не менше 6 МПа , теплостійкість $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, клеї нетоксичні. Їхній недолік — низька водостійкість і гниття під дією мікроорганізмів.

Найбільш поширені *рослинні клеї* виготовляють на основі крохмалю, декстрину й натурального каучуку. Клеї на основі крохмалю використовують переважно для склеювання паперу. Декстринові клеї застосовують для склеювання паперу, картону, паперу зі склом і деревиною.

Гумові клеї — розчини натурального каучуку в бензині або його водні суспензії, зазвичай містять агенти вулканізації й модифікатори. Застосовують для склеювання шкіри, тканин, паперу та гуми.

Органічні синтетичні клеї виготовляють на основі синтетичних мономерів, олігомерів, полімерів або їхніх сумішей. Порівняно з іншими клеями, синтетичні клеї найбільше поширені в електронній техніці завдяки можливості спрямованої зміни їхніх властивостей. Сфера застосування синтетичних клеїв дуже широка. Їхньою головною перевагою є здатність поєднувати різнорідні матеріали, забезпечуючи герметичність і стійкість з'єднання до впливу довкілля. Найбільше практично застосовують такі синтетичні клеї: на епоксидній, поліуретановій, фенолформальдегідній основі (з температурним діапазоном застосування до +100 °С); на епоксидній основі з термостійкістю до +150 °С; на основі фенольних смол і кремнійорганічних сполук із термостійкістю до +700 °С і вище для склеювання металевих і неметалевих елементів конструкцій.

Технологія отримання клейових з'єднань складається з таких операцій: приготування клею, підготування поверхонь деталей, що склеюються, нанесення (іноді з витриманням для видалення розчинника й заповнення клеєм мікрodefektів поверхні), контакт з'єднуваних поверхонь, затвердіння клейового шару. При затвердінні клейове з'єднання, як правило, витримують під тиском.

Герметики (герметизуючі склади) — пастоподібні або в'язкотекучі композиції на основі полімерів або олігомерів, які твердіють у зазорах конструкцій з утворенням еластичних прошарків, що запобігають витoku робочих середовищ. За консистенцією герметики — це замазки, пасти або розчини в органічних розчинниках. За пружністю герметики поділяють на *еластичні* та *пластичні*. Крім того, їх класифікують за теплостійкістю (+50–70 °С; +100–150 °С; понад +200 °С). Найбільш поширені герметики — синтетичні високомолекулярні каучуки.

Основні експлуатаційні характеристики герметиків: життєздатність — період часу до використання, протягом якого зберігаються їхні технологічні властивості; газонепроникність за робочих температур у різних середовищах; адгезія до поверхонь деталей з'єднання; руйнівне напруження під час розтягування та відносно подовження під час розриву; щільність герметизуючого прошарку, а також технологічність процесу герметизації. Процес герметизації включає приготування герметика, підготовку поверхонь деталей, що утворюють герметичне з'єднання, нанесення герметика, його вулканізацію або затвердіння.

У сучасній техніці герметики широко використовують для ущільнення болтових, клепаних, різьбових, фланцевих та інших нерухомих з'єднань; герметизації корпусів побутових машин. Їх застосовують також для забезпечення непроникності трубопроводів, апаратів, контейнерів з електроприладами й радіоапаратурою.

3.5.11. Флюси

Для отримання якісного паяння потрібно насамперед, щоб розплавлений припій добре змочував поверхню металів, які паяють. Якість змочування залежить від чистоти поверхні, наявності або відсутності на ній плівок оксидів.

Флюс — це допоміжна речовина під час паяння для звільнення поверхонь, що підлягають паянню, від оксидів і забруднень. Флюси також захищають поверхні, що нагріваються, і розплавлений припій від окиснення, зменшують поверхневий натяг розплавленого припою, поліпшують розтікання припою та змочування ним поверхонь з'єднуваних металів.

Флюс обирають залежно від властивостей металів, які з'єднують паянням, і застосовуваного припою, а також від способу паяння.

Флюси поділяють на два класи:

- для паяння м'якими припоями ($T_{\text{пл}}$ припоїв нижче $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- для паяння твердими припоями ($T_{\text{пл}}$ припоїв вище $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$).

За хімічним складом клас флюсів для паяння м'якими припоями поділяють на дві групи: смоловмісні й смолоневмісні.

Флюси для паяння твердими припоями поділяють також на дві групи:

- флюси на основі бури та борної кислоти;
- флюси на основі хлористих солей.

За впливом на метал, який паяють, флюси поділяють на кислотні (активні), некислотні, активовані, антикорозійні й захисні.

Кислотні флюси виготовляють на основі хлоридної кислоти, хлористих і фтористих металів, які активно розчиняють оксидні плівки на поверхні металу, завдяки чому забезпечується хороша адгезія та висока механічна міцність з'єднання. Залишок флюсу після паяння викликає інтенсивну корозію з'єднання та основного металу. Тому ці флюси застосовують тільки тоді, коли можливе ретельне промивання й повне видалення їхніх залишків. **Під час паяння електро- й радіоприладів застосування активних флюсів категорично заборонено.**

Некислотні флюси виготовляють на основі каніфолі, гліцерину та їхніх сумішей, які під час паяння очищують поверхню від оксидів та оберігають її від окиснення. Ці флюси не містять кислот, тому їх широко застосовують у монтажних роботах радіоапаратури.

Активовані флюси виготовляють на основі каніфолі з домішками активізаторів (саліцилової кислоти або хлориднокислого чи фосфорнокислого аніліну). Ці флюси дають змогу виконувати паяння без попереднього видалення оксидів після знежирення.

3.5. Тверді органічні діелектрики

Антикорозійні флюси отримують на основі ортофосфатної кислоти з додаванням різних органічних сполук і розчинників, а також на основі органічних кислот. Залишки таких флюсів не викликають корозії.

Флюси на основі спирту й розчинників потрібно зберігати в герметичній тарі, інакше рідина швидко випарується.

Дані про склад і використання деяких флюсів, які застосовують під час паяння м'якими припоями електричним паяльником у виробництві радіоелектронної апаратури, подано в *таблиці 3.5*.

Таблиця 3.5

Типи найбільш уживаних флюсів

Назва флюсу	Склад від загального обсягу, %	Галузь застосування	Спосіб приготування флюсу	Видалення залишків флюсу
Каніфольні неактивні флюси				
Каніфоль світла	Каніфоль світла — 100	Для ручного й механізованого паяння монтажних елементів із міді та її сплавів з покриттям оловом, сріблом, кадмієм. Для консервації підготовлених до паяння поверхонь	Готовий до використання	Залишки можна не видаляти
Спиртово-каніфольний	Каніфоль — 20, каніфоль — 6, спирт — 80	Паяння міді та її сплавів м'якими припоями у важкодоступних місцях	Розчинити в етиловому спирті порошок каніфолі	Спиртом або ацетоном, пензлем
Гліцериново-каніфольний	Гліцерин — 14, спирт — 80	Герметичне паяння міді та її сплавів м'якими припоями у важкодоступних місцях	Розчинити в етиловому спирті порошок каніфолі, додати гліцерин	Залишки можна не видаляти
Каніфольний хлоридно-цинковий (флюс-паста)	Хлористий цинк — 4, каніфоль — 16, вазелін — 80	Паяння підвищеної міцності кольорових і дорогоцінних металів, важливих деталей із чорних металів	Готовий до використання	Ацетоном, пензлем

Кислотні активні флюси				
Хлоридно-цинковий	Хлористий цинк — 25, хлоридна кислота — 1, вода — 74	Паяння деталей із чорних і кольорових металів	Кислоту повільно вливають у посудину до 3/4 її висоти зі шматочками цинку. Коли перестануть виділятися бульбашки водню, флюс готовий	Промивання водою або розчином питної соди у воді, пензлем
ФІМ	Ортофосфорна кислота — 16, спирт етиловий — 1,6; вода — решта	Паяння міді, срібла, константану, платини, нержавіючої сталі, чорних та інших металів	Кислоту повільно вливають у посудину й потім додають спирт	Промивання водою, пензлем

3.6. Неорганічні діелектрики

Неорганічні діелектрики — це скло, слюда, кераміка, неорганічні плівки (оксиди, нітриди, фториди), електроізоляційний бетон. Особливості неорганічних діелектриків: негорючість, зазвичай світло- й термостійкість, складна технологія виготовлення. «Старіння» неорганічних діелектриків із змінною напругою майже відсутнє; схильні до «старіння» з постійною напругою.

3.6.1. Електротехнічне скло

Скло — аморфна неорганічна речовина, яка утворюється при швидкому охолодженні силікатного розплаву. Сировиною для отримання скла є кварцовий пісок, борна кислота, бура, крейда, вапняк, мармур, доломіт, сода, поташ, з яких отримують основні склоутворювальні матеріали — оксиди SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , здатні самостійно утворювати скло, та оксиди лужноземельних металів, що утворюють скло тільки зі згаданими вище сполуками.

Як допоміжні матеріали для отримання скла використовують речовини, що висвітлюють, окиснюють, а також барвники та відновники. Скломасу варять у ваннах або спеціальних печах. Для надання склу високої міцності його загартовують: нагрівають до температур $+520$ – 620 °C і швидко обдувають стиснутим повітрям.

За вмістом модифікаторів скло буває лужним (містить оксиди N_2O , K_2O), малолужним, нелужним і кварцовим. У середньому його густина

дорівнює $2,3 \text{ т/м}^3$. Теплопровідність скла дуже мала, її коефіцієнт становить $0,7\text{--}15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, коефіцієнт лінійного розширення $5,6 \times 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ (кварцове скло). Скло здатне взаємодіяти з різними речовинами, нанесеними на його поверхню. Волога, розчини лугів, соди, фосфатів і кислот активно руйнують скло.

Електропровідність скла дуже мала, тому воно належить до діелектриків. Кварцове та боросилікатне скло є хорошим ізолятором. Його застосовують у виготовленні ізоляторів ліній електропередачі, герметичних ввідів і роз'ємів, конденсаторів.

Скляну тканину та склопластики використовують для ізоляції деталей електричних машин і пристроїв. У тонкій скляній ізоляції випускають мікродріт.

Залежно від призначення можна виокремити такі основні види електротехнічного скла:

- *конденсаторне скло* є діелектриком конденсаторів, які застосовують у високовольтних фільтрах, імпульсних генераторах, коливальних контурах високочастотних пристроїв;

- *настановне скло* — для виготовлення настановних деталей, ізоляторів;

- *лампове скло* застосовують для балонів і «ніжок» освітлювальних ламп, різних електронних приладів.

У відповідальних ізоляторах використовують *кварцове скло*, однак воно дороге. Тому застосовують *нелужне й малолужне алюмосилікатне скло*, яке має високий електроопір, вологостійке, електрично й термічно міцне. Найбільш поширене *загартоване скло*. Його використовують у приладобудуванні та в хімічній промисловості.

Електровакуумне скло — основний конструкційний матеріал в електровакуумному приладобудуванні й виробництві джерел світла. З нього виготовляють електронні лампи, електронно-променеві й рентгенівські трубки, фотопомножувачі, лічильники частинок, лампи розжарювання, газорозрядні лампи, галогенні лампи, імпульсні джерела світла тощо. З електровакуумного скла роблять оболонки, тримачі й ізолятори електродів («ніжки») ламп, а також герметичні виводи електровакуумних і напівпровідникових приладів із металевими корпусами.

Електровакуумне скло має високі діелектричні характеристики: уникнення розтріскування спаїв, погоджений із металами (або склом) коефіцієнт теплового розширення (КТР).

Як електровакуумне використовують бромсилікатне, алюмосилікатне, лужне й нелужне скло, що містить оксиди лужноземельних металів, свинцю тощо. Для виготовлення потужних джерел світла застосовують кварцове та висококремнеземне (кварцоїдне $94\text{--}96 \text{ \% SiO}_2$) скло.

Конденсаторне скло використовують як діелектрик конденсаторів, застосовують у високочастотних фільтрах, імпульсних генераторах, коливальних контурах високочастотних пристроїв. Використовують для ізоляції ввідів конденсаторів, терморезисторів, у напівпровіднико-

вому виробництві для виготовлення ізоляторів кремнієвих і германієвих транзисторів у металевих корпусах.

Склоемалі — це покриття, які наносять на поверхню виробів для захисту від корозії. Їх застосовують для утворення електричної ізоляції трубчастих резисторів, у яких на зовнішню поверхню керамічної трубки нанесено дровову обмотку з ніхрому чи константану, поверх якої наплавляють шар емалі, що ізолює окремі витки й захищає обмотку від вологи, а також як діелектрик у деяких типах конденсаторів. Використовують в електроапаратобудуванні для отримання міцного й нагрівостійкого електроізоляційного покриття на металі, а також для пристроїв вводу в металеві вакуумні прилади.

Скляні плівки завтовшки 1–50 мкм використовують в мікроелектроніці для міжшарової ізоляції та захисту безкорпусних інтегральних схем. Для отримання тонких плівок застосовують легкоплавке нелужне скло з боратів і боросилікатів. Зі скла виготовляють також деякі типи корпусів інтегральних схем.

Піноскло застосовують для ізоляції машин, установок, споруд. Його виготовляють із промислового скла, у яке додають від 0,2 до 3 % газоутворювачів (вапняк, крейда, вугілля, кокс або сажка). Скляний порошок, змішаний із газоутворювачами, спікають за температур $+700$ – 900 °С. Піноскло не гниє, не горить, витримує нагрівання до $+1000$ °С, легше за воду. Тому його використовують як плавучий матеріал.

Скляне волокно — тонкі (діаметром 4–7 мкм) скляні волокна, які мають таку високу гнучкість, що можуть оброблятися прийомами текстильної технології. Його виробляють із розплавленого скла протягуванням крізь спеціальні фільтри та наступним обробленням скломаси потоками стисненого повітря, перегрітої пари або розжарених газів. Зі скляного волокна виготовляють електроізоляційні тканини, склотканину, фільтри, звукоізоляційні та світлотехнічні тканини, тканини для протикорозійних покриттів та для виготовлення шаруватих пластиків (склотекстоліту).

3.6.2. Ситали

Ситали — це склокристалічні матеріали, отримані зі скляних розплавів шляхом їхньої повної або часткової кристалізації. За структурою ситали є композиційними матеріалами зі склоподібної аморфної безперервної фазоматриці, наповненої дрібними кристалами скла. Середній розмір кристалів — 1–2 мкм, а товщина прошарків склофази не перевищує десятих часток мікрона. Об'єм кристалічної фази в ситалях досягає 90–95 %.

Сировиною для виробництва ситалів є ті самі природні матеріали, що й для скла, але до чистоти сировини ставлять дуже високі вимоги. Крім того, до розплаву додають домішки, що прискорюють кристалізацію під

час наступного термооброблення. Як каталізатори кристалізації застосовують сполуки фторидів або фосфатів лужних і лужноземельних металів.

Технологія виробництва виробів із ситалів не відрізняється від технології виробництва виробів зі скла, потрібно лише додаткове термічне оброблення скла в кристалізаторі. Маючи полікристалічну будову, ситали зберігають позитивні властивості скла, але позбавлені його недоліків: крихкості, малої міцності при вигині, низької теплостійкості. За фізико-технічними властивостями ситали можна порівняти з металами. Їхня твердість наближається до показників загартованої сталі. Термостійкість виробів із ситалів досягає $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і забезпечується дуже малими (від 7×10^{-7} до 3×10^{-7}), а іноді й від'ємними значеннями коефіцієнта термічного розширення. Ситали мають високу стійкість до впливу сильних кислот (крім плавикової) і лугів. Окремі види ситалів вирізняються жаростійкістю, можуть мати паяні з'єднання зі сталлю. Міцність ситалів при стисканні — до 500 МПа.

Оптичне кварцове скло може бути замінене прозорими ситалами, які менш чутливі до теплових ударів. Світлочутливе скло та фотоситали широко застосовують у мікроелектроніці, ракетній техніці, космічній галузі, оптиці, поліграфії та побутових приладах. Так, з фоточутливого скла отримують матриці для газорозрядних приладів, фотокераміку для виготовлення друкованих плат, з фотоситалу виготовляють перфоровані диски, які використовують у катодно-променевих трубках, оболонках вакуумних електронних приладів тощо. Ситали застосовують як жаростійкі покриття для захисту металів від дії високих температур. З них можуть бути виготовлені лопаті повітряних компресорів, сопла реактивних двигунів. Використовують у виробництві абразивів для шліфування, фільтрів — для витягання синтетичних волокон.

3.6.3. Слюда та слюдопласти

Слюда — це мінерал із кристалічною структурою, який легко розшаровується на пластинки завтовшки до 5 мкм. Завдяки її цінним якостям — високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності — слюду застосовують як відповідальну ізоляцію в електричних машинах високої напруги й потужності (зокрема, у великих турбогенераторах і гідрогенераторах, тягових електродвигунах тощо), як діелектрик — у деяких конструкціях конденсаторів. Використовують як штамповані фасонні вироби для кріплення та електричної ізоляції, як тепловий захист цоколів потужних електричних ламп розжарювання. Слюда належить до електроізоляційних матеріалів вищого класу нагрівостійкості (*табл. 3.6, с. 134*).

Для електричної ізоляції застосовують тільки два види слюди: *мусковіт* ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) і *флогопіт* ($\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Тонкі пелюстки слюди склеюють смолами або лаками (лужними, олійно-бітумними тощо) й отримують тверду або гнучку слюдяну ізоляцію.

Електричні та фізичні параметри слюди

Параметр	Мусковіт	Флогопіт
Питома вага, г/см ³	2,76–3,0	2,78–2,85
Максимальна температура, °С	500–600	900–1000
Діелектрична проникність, ϵ	6–7	5–6
Діелектричні втрати при $f = 1$ МГц	$(0,1-0,3)^{-10}$	$(1-5)^{-10}$
Питомий опір, Ом·м	$10^{11}-10^{12}$	$10^{11}-10^{12}$

Міканіт — це листовий або рулонний матеріал завтовшки 0,5–5 мм, який отримують шляхом склеювання пелюсток слюди ізоляційним лаком. Для збільшення міцності шари слюди склеюють із паперовою або склотканинною основою. Застосовують для ізоляції пластин колекторів електричних машин, виготовлення ізоляційних деталей у формі трубок, конусів і шайб. У нагрівальних приладах використовують спеціальний термотривкий міканіт.

Маркування міканіту: перша літера маркування: К — колекторний, П — прокладковий, Ф — формувальний, Г — гнучкий, М — мікафолій, Л — мікастрічка; друга літера маркування — тип слюди для виготовлення міканіту: М — мусковіт, Ф — флогопіт, С — суміш мусковіту та флогопіту; третя та наступні літери й цифри — вид речовини для склеювання і додаткові характеристики матеріалу.

Унаслідок високого вмісту слюди (не менше 50 %) міканіти нагрівоустійкі й належать до класу ізоляції В. Під час використання неорганічних основ (зі склотканини) нагрівоустійкість зростає від +130 °С (клас В) до понад +180 °С (клас С).

Колекторний і прокладковий міканіти належать до групи твердих міканітів, які після клеєння слюди піддають пресуванню при підвищених питомих тисках і нагріванні. Ці міканіти мають меншу усадку за товщиною і більшу щільність. Формувальний і гнучкий міканіти мають більш пухку структуру й меншу щільність.

Колекторний міканіт — це листовий матеріал, виготовлений із листочків слюди, склеєних за допомогою лужних або гліфталевих смол або лаків на основі цих смол. Його застосовують як штамповані заготовки, які прокладають між мідними пластинами колекторів електричних машин постійного струму. Завдяки високому тиску під час пресування міканіт має хороші механічні властивості, що забезпечує міцність колектору під час роботи машини.

Прокладковий міканіт — твердий листовий матеріал. Виготовляють із мусковіту, флогопіту та їхньої суміші. У ньому 75–95 % слюди та 25–5 % речовини для склеювання. Після склеювання листи прокладкового міканіту піддають пресуванню. Застосовують для виготовлення електроізоляційних прокладок і шайб.

Нагрівостійкий (термотривкий) міканіт завтовшки 0,2–1,0 мм, не містить органічних речовин. Застосовують для ізоляції електронагрівальних приладів і в інших випадках, де температура сягає кількесот градусів Цельсія.

Гнучкий міканіт призначений для ізоляції різноманітних частин електричних машин (обмотування секцій, пазова ізоляція). Виготовляють із мусковіту чи флогопіту з просоченням олійно-бітумним лаком.

Різновид гнучкого міканіту — **мікастрічка** — шар пластинок слюди, наклеєний одним або обома боками на паперову або тканинну основу. Мікастрічка на паперовій основі — мікафолій, на шовку — мікашовк, на тканині — мікаполотно. Як речовини для склеювання використовують олійно-бітумні, олійно-гліфталеві, кремнійорганічні лаки та розчини каучуків. Товщина мікастрічок — 0,08–0,21 мм. Їх застосовують для виткової та корпусної ізоляції електричних машин, де потрібна велика гнучкість ізоляційного матеріалу. При пересиханні мікастрічок їх потрібно витримати в парі розчинника.

Мікафолій — рулонний або листовий електроізоляційний матеріал, який формують у нагрітому стані. Він складається з одного або кількох, частіше двох-трьох, шарів листочків слюди, склеєних між собою і з полотном паперу завтовшки 0,05 мм, або зі склотканиною, або зі склосіткою. Як матеріали для склеювання застосовують лужний, гліфталевий, поліестерний або кремнійорганічний лаки.

Мікашовк — рулонний електроізоляційний матеріал, що гнеться за кімнатної температури. Має підвищену механічну міцність на розрив. Складається з одного шару листочків щипаної слюди, склеєних між собою та обклеєних з одного боку полотном із натурального шовку, а з іншого — папером. Як матеріали для склеювання використовують олійно-гліфталеві або олійно-бітумні лаки, що утворюють гнучкі плівки.

Мікаполотно — рулонний або листовий електроізоляційний матеріал, що гнеться за кімнатної температури. Складається з кількох шарів щипаної слюди, склеєних між собою й обклеєних з обох боків бавовняною тканиною (перкаль) або папером з одного боку й тканиною — з іншого.

Мікалекс — твердий матеріал, що отримують шляхом гарячого пресування суміші порошкоподібної слюди (мусковіту) та легкоплавкого скла. Пресування здійснюють за температури орієнтовно +600 °С і тиску 60 МПа. Мікалекс має високу нагрівостійкість, дугостійкість, механічну міцність, придатний для всіх видів механічного оброблення. Мікалекс випускають як листи й стрижні, а також як електроізоляційні вироби: каркаси індуктивних котушок, плати перемикачів, різноманітні деталі вакуумних приладів, повітряні конденсатори тощо.

Під час розроблення природної слюди та виготовлення електроізоляційних матеріалів на основі щипаної слюди залишається чимало відходів. Їхня утилізація дає змогу отримати нові електроізоляційні матеріали.

ли — *слюдиніти*. Їх виготовляють зі слюдинітового паперу. Шляхом спеціального оброблення його перетворюють на пульпу, з якої папероутворювальна машина виготовляє папір, який використовують як напівфабрикат. Далі шляхом гарячого пресування отримують тверді або гнучкі слюдинітові електроізоляційні матеріали. Вони більш монолітні й однорідні за товщиною, мають вищу електричну міцність і робочу температуру. Сфери застосування слюдинітових матеріалів ті самі, що й міканіту (колектори, прокладки, стрічки, фасонні вироби).

3.6.4. Керамічні діелектричні матеріали

Кераміка — твердий неорганічний матеріал, який отримують спіканням формувальної маси заданого хімічного складу з мінералами й оксидами металів. Її властивості залежать від хімічного та фазового складів, макро- і мікроструктури та від технологічних прийомів виготовлення. Переваги кераміки перед іншими електроізоляційними матеріалами в тому, що з неї можна виготовляти ізолятори складної конфігурації, крім того, вона має широкий інтервал спікання. Сировинні матеріали недефіцитні, технологія виготовлення виробів відносно проста.

Багато керамічних електроізоляційних матеріалів мають високу механічну міцність, дуже малий кут діелектричних втрат, значну нагрівостійкість та інші цінні властивості. Порівняно з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка, як правило, стійкіша до електричного й теплового «старіння», не дає залишкових деформацій у разі тривалого механічного навантаження.

Електрофарфор — основний керамічний матеріал, який використовують у виробництві низьковольтних і високовольтних ізоляторів та інших ізоляційних елементів із робочою напругою до 1150 кВ змінного й до 1500 кВ постійного струму. Електрофарфор має досить високі електроізоляційні, механічні, термічні властивості в розрізі робочих температур; він витримує поверхневі розряди, слабко схильний до «старіння», стійкий до впливу атмосферних опадів, багатьох хімічних речовин, сонячних променів і радіаційного випромінювання.

У зв'язку з передачею енергії високої й надвисокої напруги на далеку відстань різко зросли вимоги до якості високовольтних ізоляторів, переважно — до механічної міцності. Останнім часом випускають надійні високоміцні ізолятори оптимізованої конструкції з високоякісного електрофарфору.

Технологія виготовлення фарфорових виробів:

- подрібнення сировини, змішування та отримання однорідної ущільненої пластичної маси;
- отримання з фарфорової маси одним зі способів: обточуванням, пресуванням, відливанням у гіпсові форми, вичавлюванням через отвір потрібної конфігурації.

З електрофарфору виготовляють електричні лінійні підвісні ізолятори для високої напруги, штирьові й опорні ізолятори, вводи, різні фасонні апаратні вироби для трансформаторів, вмикачів тощо. У деяких випадках вироби з електрофарфору покривають глазур'ю, що зменшує можливість забруднення, поліпшує електричні й механічні властивості, а також зовнішній вигляд виробу.

Порцеляна (один із видів фарфору) — це матеріал, що складається здебільшого із SiO_2 , Al_2O_3 і K_2O . Як сировину використовують білу глину (каолін), кварцовий пісок і польовий шпат. Порцеляну отримують високотемпературним термічним обробленням цієї суміші. Порцеляна має зовсім невелику пористість, через що вона непроникна для газів і води, має доволі високу механічну міцність, термостійкість, хороші електроізоляційні властивості.

Для вироблення високочастотних високовольтних ізоляторів застосовують **стеатитову кераміку**, оскільки фарфор має залежність електричних характеристик від температури через наявність великої кількості скла й польового шпату з підвищеною електропровідністю. Стеатитову кераміку виготовляють на основі мінералів тальку, основою кристалічної фази якого є метасилікат магнію $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. Стеатитові матеріали характеризуються високими значеннями питомого опору, зокрема за високих температур, малим кутом діелектричних втрат. Стеатитова кераміка має високі механічні властивості, стабільні параметри в разі впливу різних зовнішніх факторів (вологи, температури, високої напруги тощо). Завдяки високим електромеханічним властивостям стеатитові матеріали застосовують для виготовлення високочастотних настановних деталей, високовольтних і низьковольтних конденсаторів тощо.

Конденсаторна кераміка відрізняється великими значеннями діелектричної проникності. Використовують для виготовлення конденсаторів. Основним її компонентом є титан(IV) оксид (TiO_2); використовують також сполуки оксидів титану з оксидами кальцію, магнію, цинку з невеликими домішками глинистих речовин.

Серед керамічних матеріалів особливе місце займає **барій титанат** (BaTiO_3) (сполука оксидів барію й титану), що є сегнетоелектриком. Відрізняється дуже великою діелектричною проникністю, величина якої залежить від напруженості електричного поля та від температури. Крім того, барій титанат має п'єзоелектр. Перелічені властивості дають змогу широко використовувати сегнетокераміку в електронній апаратурі.

В електричній та радіоелектронній промисловості керамічну технологію широко застосовують для виготовлення діелектричних, магнітних, напівпровідникових, п'єзоелектричних, металокерамічних та інших виробів. Наразі з електроізоляційної кераміки виготовляють десятки тисяч найменувань виробів масою від десятих часток грама до сотень кілограмів і розмірами від кількох міліметрів до кількох метрів.

Найбільш перспективним є *корундовий фарфор* — ультрафарфор (радіофарфор). Він має підвищену механічну міцність і теплопровідність, менший тангенс кута діелектричних втрат. Використовують для виготовлення деталей складної конфігурації, високовольтних конденсаторів, вакуумних спаїв із металами, радіотехнічних плат.

3.7. Активні діелектрики

Кристалічні діелектрики, у яких йони різного знака розташовані в певному порядку, можуть поляризуватися й за відсутності зовнішнього електричного поля. У звичайних діелектриках така поляризація не відбувається, тому що електричне поле, що створюється всередині них, компенсується полем вільних зарядів, що натікають на поверхню зразка ззовні та зсередини. Порухення такої компенсації, що приводить до тимчасової появи електричного поля в кристалі, відбувається в п'єзоелектриках (під час певних деформацій) і в піроелектриках (під час зміни температури кристалу). Різновидом піроелектриків є сегнетоелектрики, поляризація яких може істотно змінюватися під впливом зовнішніх чинників. Наведена в зовнішньому полі поляризація може довго зберігатися в діелектриках (наприклад, у полімерах і кераміці) після зняття поляризуючого поля (так звані електрети).

Сегнетоелектрики — це матеріали, які мають спонтанну (мимовільну) поляризацію в певному інтервалі температур, напрямок якої може бути змінено зовнішніми впливами, наприклад електричним полем.

Спонтанна поляризація — це поляризація, яка виникає в діелектрику під впливом внутрішніх процесів, без зовнішніх впливів. Це явище пов'язане з особливостями сегнетоелектриків.

Об'єм сегнетоелектрика розділений на домени — макроскопічні області з різним напрямком векторів спонтанної поляризованості P_c (рис. 3.35). Під час відсутності зовнішнього електричного поля сумарна поляризованість зразка в цілому дорівнює нулю. При впливі зовнішнього електричного поля вектори спонтанної поляризації диполів орієнтуються переважно в напрямку поля, що викликає ефект дуже сильної поляризації, наслідком чого є надвисоке значення діелектричної про-

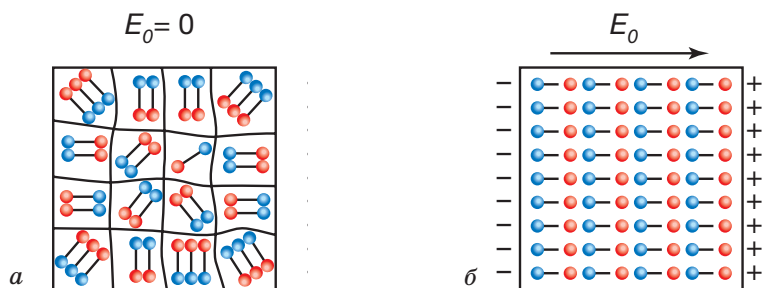
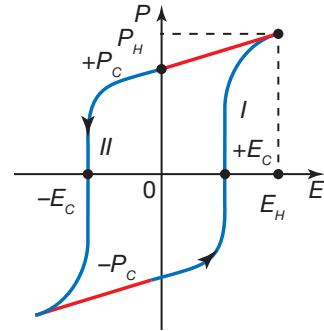


Рис. 3.35. Схема доменної структури сегнетоелектрика:
а) за відсутності електричного поля; б) у сильному електричному полі

никності ϵ . Залежність поляризованості P від напруженості зовнішнього електричного поля E в сегнетоелектриках нелінійна й під час циклічної зміни напруженості поля має вигляд характерної замкнутої кривої, яку називають *петлею гістерезису* (рис. 3.36).

Рис. 3.36. Петля діелектричного гістерезису ідеального сегнетоелектрика: P_C — поляризованість сегнетоелектрика; E_C — напруженість зовнішнього електричного поля; P_H — поляризованість початку ділянки насичення; E_H — напруженість початку ділянки насичення



При напруженості поля $E = 0$ поляризованість зразка, що складається з одного домену, дорівнює $+P_C$ або $-P_C$. Зі збільшенням напруженості поля, прикладеного в напрямку P_C , поляризованість зростає лінійно завдяки звичайним механізмам поляризації (електронній, йонній, дипольній). Якщо прикладати електричне поле протилежного знака, то при деякому значенні напруженості поля E_C відбувається переполяризація, тобто зміна напрямку вектора P_C на протилежний. Напруженість поля, під час якої відбувається зміна напрямку спонтанної поляризованості, називають *коерцитивною силою* H_C .

Сегнетоелектрична точка Кюрі — температура, за якої виникає (під час охолодження) або зникає (під час нагрівання) спонтанна поляризація. Діелектрична проникність ϵ речовини за температури точки Кюрі T_K максимальна. Після досягнення точки Кюрі відбувається фазовий перехід із сегнетоелектричного стану в параелектричний, коли $P_C = 0$. Діелектрична проникність ϵ і тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ дуже залежать від частоти, особливо в ділянці високих частот.

Розглянуті особливості поляризації було вперше відкрито в кристалах сегнетової солі, тому й діелектрики з такими властивостями отримали назву *сегнетоелектриків*.

Нелінійна сегнетокераміка має різко виражену нелінійну залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля. Нелінійні діелектричні конденсатори, ємність яких залежить від прикладеної напруги, називають *варикондами*. Конструктивно вариконди виготовляють у вигляді дискових або плівкових плоских керамічних конденсаторів на основі сегнетоелектриків (титанатів барію, стронцію, кальцію тощо). Для них характерні високі значення відносної діелектричної проникності та її велика залежність від напруженості електричного поля й температури. Вариконди застосовують як елементи налаштування коливальних контурів. Якщо вариконд уключити в ланцюг

резонансного LC-контуру й змінювати постійну напругу, що підводиться до нього від джерела живлення, яке має високий внутрішній опір (він потрібен, щоб джерело не погіршувало добротність коливального контуру), то можна змінювати резонансну частоту цього контуру.

Залежно від галузі застосування у варикондах використовують два види діелектричної нелінійності — ефективну й реверсивну.

Ефективна нелінійність — це зміна ємності залежно від амплітуди прикладеної напруги (синусоїдальної, імпульсної або будь-якої іншої форми). Вона існує лише на низьких частотах. На високих частотах ємність вариконда не залежить від напруженості електричного поля. Ефективну нелінійність використовують у стабілізаторах змінної напруги, пристроях іскрогасіння.

Реверсивна нелінійність — це зміна ємності в змінному полі іншим, керуючим, електричним полем. Керуючу напругу прикладають до вариконда одночасно зі змінною. Керуюче поле може бути постійним або повільно мінливим. Частота напруги керуючого поля менша за частоту напруги змінного поля, а амплітуда керуючої напруги вища за амплітуду змінної напруги. Реверсивну нелінійність сегнетоелектриків використовують у діелектричних підсилювачах, стабілізаторах напруги, пристроях автоматики.

Терморезистивна сегнетокераміка використовує ефект, який полягає в різкому зростанні питомого електричного опору ρ при підвищенні температури поблизу точки Кюрі.

Сегнетоелектрики з прямокутною петлею гістерезису застосовують у запам'ятовувальних пристроях (ЗП) для електронно-обчислювальних машин (ЕОМ). При відсутності зовнішнього електричного поля поляризований сегнетоелектрик має два стабільних стани з поляризованими $+P_c$ і $-P_c$. Один із цих станів в осередках пам'яті ЕОМ відповідає зберіганню одиниці, а другий — нуля. Змінюючи напругу запису, сегнетоелектрик можна переводити з одного стану в інший.

П'єзоелектрики — кристалічні речовини, у яких під час стиснення та розтягування в певних напрямках виникає електрична поляризація (прямий п'єзоэффект). Зворотний п'єзоэффект — поява механічної деформації в кристалі під дією прикладеного електричного поля. Функціональний зв'язок між механічними й електричними параметрами в обох випадках лінійний.

П'єзоэффект спостерігають тільки в кристалах, які не мають центру симетрії. Наявність інших елементів симетрії (осі або площини симетрії) може заважати появі поляризації в деяких кристалографічних напрямках, тобто також обмежує кількість кристалів-п'єзоелектриків.

П'єзоелектричні властивості залежать від температури. Існують кристали, у яких при деяких температурних значеннях кристалічна ґратка перебудовується так, що утворюється центр симетрії, отже, за такої температури зникають п'єзоелектричні властивості речовини.

Так, наприклад, у кварцу за температури $+2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ п'єзоелектричні властивості змінюються неістотно, а за температури $+5760\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище — повільно слабшають, перебудовується кристалічна структура кварцу, і п'єзоелектричні властивості речовини зникають. Якщо температуру почати знижувати від $+5760\text{ }^{\circ}\text{C}$ — процес відбувається у зворотному напрямку.

Прямий п'єзоелектричний ефект мають кристали кварцу й усі сегнетоелектрики. Щоб його спостерігати, з кристала вирізають прямокутний паралелепіпед, грані якого мають бути орієнтовані певним чином щодо кристала. Дві протилежні грані покривають металевими пластинами з відводами для підключення до електричного кола. Під час здавлювання паралелепіпеда одна його грань заряджається позитивно, а друга — негативно. Якщо стискання замінити розтягуванням паралелепіпеда, то знаки на його гранях зміняться на протилежні.

Прямий п'єзоелектричний ефект можна пояснити так. Усі п'єзокристали не мають центру симетрії і складаються з позитивних і негативних йонів, які утворюють ніби дві самостійні підґратки, уставлені одна в одну. Коли п'єзокристал стискають (розтягують), ці підґратки зсуваються одна щодо іншої, й одна поверхня кристала заряджається позитивно, а друга — негативно.

П'єзоелектричні властивості можуть мати тільки йонні кристали. Такий ефект може виникати тільки в тому разі, якщо під дією зовнішніх сил кристалічна підґратка з позитивних йонів деформується інакше, ніж підґратка з негативних йонів. Тобто в результаті деформації відбувається відносне зрушення позитивних і негативних йонів, яке приводить до виникнення поляризації кристала й поверхневих зарядів.

Поляризованість P , що при цьому виникає, пропорційна до деформації — прикладеному механічному напруженню σ :

$$P = d \cdot \sigma,$$

де d — коефіцієнт пропорційності, який називають *п'єзомодулем*. П'єзомодуль визначає поляризацію кристала під час заданого прикладеного механічного напруження.

Прямий п'єзоэффект використовують у п'єзоелектричних датчиках (п'єзоелектричний манометр) для вимірювання швидкозмінних тисків. Існують п'єзоелектричні мікрофони, звукознімачі, п'єзоелектричні датчики в автоматиці й телемеханіці. П'єзоелектрична кварцова пластинка, яку вирізають певним чином, може розміщуватися всередині досліджуваного газу. Тиск газу спостерігають за величиною п'єзоелектричних зарядів, які виникають на пластинці. Існують такі п'єзоелектричні перетворювачі: п'єзоелектричні стабілізатори, фільтри, віброметри, гідрофони в акустиці.

У п'єзокристалів спостерігають і зворотне явище — деформацію поляризованого кристала.

Зворотний п'єзоелектричний ефект — деформація кристала внаслідок його поляризації в зовнішньому електричному полі. Якщо пластинку, вирізану з п'єзокристала, помістити в електричне поле, яке постійно змінюється, то вона пульсуватиме в такт змінам поля. Цей ефект використовують для добування ультразвуку в радіотехнічних пристроях.

П'єзоелектричні монокристали — природні п'єзоелектричні матеріали, дуже високовартісні. У зв'язку із цим потреби електроніки задовольняються синтетичними п'єзоелектричними монокристалом, які вирощують у спеціальних установках. П'єзоелектричних властивостей таких кристалів із досить високою повторюваністю можна досягати шляхом композицій, які входять до їхнього складу. Вирощені кристали певним чином ріжуть на пластини, деякі (сегнетоелектрики) поляризують, і з них шляхом шліфування та нанесення електродів виготовляють п'єзоелектричні елементи.

П'єзоелектрична кераміка (п'єзокераміка) — за фізичними властивостями це полікристалічний сегнетоелектрик, який має хімічну сполучку або твердий розчин (порошок) зернин (кристалітів). За хімічним складом це складний оксид, що включає йони двовалентного свинцю або барію, а також йони чотиривалентного титану або цирконію. Шляхом зміни основного співвідношення вихідних матеріалів і введення домішок синтезують різні склади п'єзокераміки, які мають певні електрофізичні й п'єзоелектричні характеристики.

Найбільш поширена група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконат-титанату свинцю). Водночас використовують кераміку на основі титанату барію (ТБ) і титанату свинцю (ТС). В останні роки розробляють нові п'єзокерамічні матеріали з властивостями, що дають змогу в деяких випадках використовувати їх замість більш дорогих п'єзоелектричних кристалів. Зокрема, розроблено групу матеріалів на основі ніобату свинцю, яку вже практично застосовують завдяки можливості її використання в діапазоні частот до 30 МГц і більше. Проводять дослідження зі створення п'єзокерамічних композитних матеріалів, а також багатошарової кераміки.

Електрети — це тверді діелектрики, які зберігають поляризований стан упродовж тривалого часу після припинення електризації. Подібні властивості мають органічні (парафін, бджолиний віск, найлон, ебоніт тощо) й неорганічні (сірка, борне скло й т. ін.) речовини.

Електрети складаються з полярних молекул, наприклад суміші воску й смоли. Якщо розплавити таку суміш і помістити її в дуже сильне електричне поле, а потім дати затверднути в такому стані, поляризація зберігатиметься протягом кількох днів. Із часом повільні процеси релаксації призведуть до хаотичної орієнтації полярних молекул, й електричний момент поволі зникне. Така властивість електретів зумовлена тим, що виникає залишкова поляризація, оскільки на процеси поляризації та

деполяризації потрібний різний час. Прискорити процес деполяризації можна шляхом підвищення температури діелектрика.

Розрізняють:

- *термоелектрети* (здатні зберігати електричне поле в навколишньому середовищі протягом багатьох місяців і навіть років);
- *фотоелектрети* (довго зберігають заряди в темноті та швидко розряджаються при освітленні);
- *радіоелектрети* (використовують радіоактивне випромінювання) тощо.

Електрети як джерела постійного електричного поля застосовують у деяких мікрофонах, фільтрах повітря, вібродатчиках, детекторах йонізуючого випромінювання, в електрографії тощо.

3.8. Рідкі кристали

Рідкі кристали (які називають також *мезофазами* — речовинами в мезоморфному стані або анізотропною рідиною) — це речовини, що перебувають у стані, проміжному між твердим кристалічним та ізотропним рідким. Зберігаючи основні властивості рідини, насамперед плинність, вони виявляють характерну для твердих кристалів анізотропію: за відсутності зовнішніх впливів у рідких кристалах з'являються анізотропні діелектрична проникність, діамагнітна сприйнятливність, електропровідність і теплопровідність.

Структура рідких кристалів утворена молекулами подовженої або дископодібної форми. У результаті міжмолекулярної взаємодії вони шикуються в певному порядку. Тепловий рух перешкоджає цьому, і за підвищених температур рідкі кристали перетворюються на звичайну рідину. Інтервал існування рідких кристалів обмежений температурою плавлення твердих кристалів і так званою *температурою провітлення*, під час якої рідкокристалічні каламутні зразки стають прозорими внаслідок плавлення і зникнення мезофази.

Розрізняють термотропні та ліотропні рідкі кристали. *Термотропні рідкі кристали* утворюються під час розплавлення твердих кристалів або охолодженні ізотропної рідини й існують у вузькому інтервалі температур. *Ліотропні рідкі кристали* виникають під час розчинення твердих органічних речовин у воді або інших розчинниках. І ті, й інші зазвичай містять кілька рідкокристалічних фаз, температурний інтервал існування яких може перебувати як за низьких (до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$), так і за високих (до $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур.

Для опису подальшого орієнтованого порядку в рідких кристалах використовують вектор n , названий *директором*, який указує напрямок, уздовж якого орієнтовані осі молекул.

Фазу з густиною $\rho = \text{const}$ і $n = \text{const}$ названо *нематичним рідким кристалом*. Довгі осі його молекул мають фіксовану орієнтацію, а центри їхньої ваги розподілені хаотично (рис. 3.37, а, с. 144). Завдяки силь-

Розділ 3. Діелектричні матеріали

ному розсіюванню світла через теплові флуктуації, що порушують орієнтацію молекул, нематичний рідкий кристал виглядає як каламутна непрозора рідина. Під поляризаційним мікроскопом у ньому видно тонкі нитки, які зумовили назву цього кристала (з грецьк. *nema* — нитка). Вони утворюють лінії, названі *дисклінаціями*, на яких напрямок (n) орієнтації молекул не визначений.

У *сметичних рідких кристалів* (з грецьк. *smegta* — мило) $n = \text{const}$, густина $\rho(r)$, де r — просторова координата, що змінюється періодично вздовж осі Z й постійна в площині X – Y (рис. 3.37, б). Молекули розташовані шарами, які легко ковзають один щодо одного. Але під час навантаження вздовж осі Z сметичні рідкі кристали подібні до твердого тіла.

Густина *холестеричних рідких кристалів* $\rho(r) = \text{const}$. Їхня шарувата структура характеризується тим, що вектор n у кожному шарі повернутий щодо напрямку вектора в сусідньому шарі на певний кут, утворюючи спіраль (рис. 3.37, в). У площині X – Y холестеричні рідкі кристали мають таку ж плинність, як і нематичні, а вздовж осі Z їхні механічні властивості подібні до властивостей сметичних рідких кристалів.

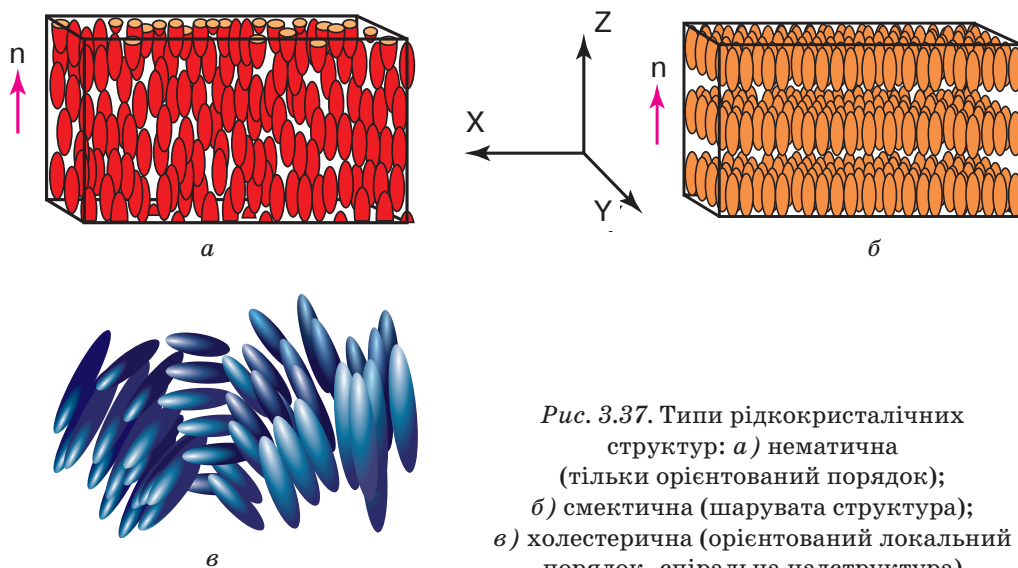


Рис. 3.37. Типи рідкокристалічних структур: а) нематична (тільки орієнтований порядок); б) сметична (шарувата структура); в) холестерична (орієнтований локальний порядок, спіральна надструктура)

Практичне застосування рідких кристалів ґрунтується переважно на виявленні ними електрооптичних ефектів. Зміна орієнтації директора n у нематичних рідких кристалах відбувається в зовнішньому електричному полі при напрузі 1 В і потужності близько 1 мкВт. Тому рідкі кристали широко використовують для створення індикаторів і табло, що відображають літерну, цифрову й аналогову інформацію в електронних годинниках, калькуляторах, вимірювальних приладах.

У комбінації з фоточутливими напівпровідниковими приладами рідкі кристали є засобом посилення й перетворення зображень, а також для оптичного оброблення інформації. Залежність кроку спіралі холестеричних рідких кристалів від температури зумовила використання плівок цих речовин як індикаторів розподілу температури на поверхні тіл (рідкокристалічна термографія).

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Охарактеризуйте діелектрики. В яких агрегатних станах можуть бути діелектричні матеріали? Наведіть приклади.
2. Які матеріали називають активними, а які — пасивними діелектриками?
3. Назвіть класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів.
4. Які речовини належать до газоподібних діелектриків?
5. Розкажіть про галузі застосування нафтового масла.
6. Розкажіть про синтетичні рідкі діелектрики.
7. Які полімери називають термопластичними, а які – термореактивними? Наведіть приклади.
8. Які компоненти входять до складу пластмас?
9. Що таке волокнисті діелектрики?
10. Яка сфера застосування фібри в електротехніці?
11. Які властивості має гума як електротехнічний матеріал?
12. Які бувають електроізоляційні лаки за призначенням?
13. Яке призначення флюсів?
14. Розкажіть про міканіти.
15. Що таке слюдинітові матеріали?
16. *Виконайте тестові завдання.*
 - Електричний пробій діелектрика настає при
 - А** хімічній зміні матеріалу під дією електричного поля
 - Б** деякому критичному значенні напруженості електричного поля
 - В** втраті матеріалом електроізоляційних властивостей при надмірному зростанні кризної електропровідності
 - Г** механічному руйнуванню й утворенню мікротріщин під дією електричного поля та механічної дії електродів
 - Залежно від складу і виду наповнювача пластмаси поділяють на
 - А** термо- і реактопласти
 - Б** шаруваті, волокнисті, газоповітряні
 - В** тверді, рідкі, газоподібні
 - Г** прості та складні
 - Пластмаси — це
 - А** синтетичні матеріали на основі мономерів
 - Б** штучні матеріали, отримані на основі органічних високомолекулярних речовин полімерів
 - В** штучні матеріали отримані реакцією полімеризації
 - Г** штучні матеріали, отримані реакцією поліконденсації

Розділ 4

НАПІВПРОВІДНИКИ

4.1. Напівпровідникові матеріали та їхні властивості

До провідників належать матеріали з питомим електричним опором: $\rho = 10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м, до діелектриків — матеріали з $\rho = 10^8 - 10^{18}$ Ом·м. Групи матеріалів, що розглянуті в цьому розділі, займають проміжне місце між провідниками та діелектриками й мають величину питомого опору, яка знаходиться в межах $10^{-6} - 10^8$ Ом·м (за кімнатної температури), що й спричинило появу терміна «напівпровідники».

Напівпровідники — це речовини, які за своєю електропровідністю займають проміжне місце між провідниками та діелектриками, питомий опір яких змінюється під дією певних зовнішніх впливів. Напівпровідникові властивості має велика кількість найрізноманітніших матеріалів: природних і синтетичних, органічних і неорганічних, простих і складних за хімічним складом (рис. 4.1). **Напівпровідникові матеріали** можуть бути поділені на:

– **прості** — власне хімічні елементи: кремній (Si), германій (Ge), селен (Se), телур (Te), сірка (S), фосфор (P), арсен (As), бор (B), йод (I), стибій (Sb), вуглець (C) тощо. Самостійно широко застосовують германій, кремній і селен. Решта елементів найчастіше використовують як легувальні домішки або як компоненти складних напівпровідникових матеріалів;

– **складні**, до яких належать хімічні сполуки з напівпровідниковими властивостями, що поєднують у собі два, три й більше хімічних елементів. Найчастіше застосовують складні напівпровідникові матеріали, що складаються з двох елементів. Їх називають **бінарними**, наприклад: силіцій карбід (SiC), галій арсенід (GaAs), кадмій сульфід (CdS), цинк селенід (ZnSe) і т. ін.

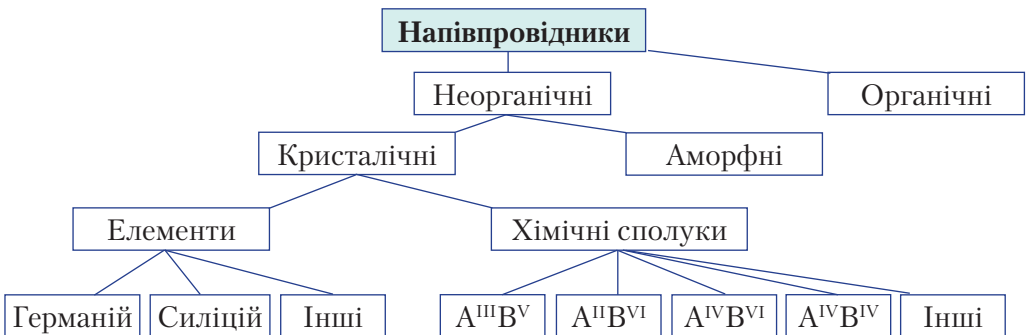
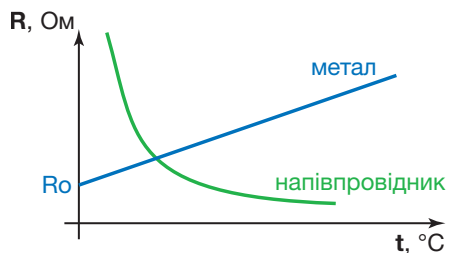


Рис. 4.1. Класифікація напівпровідникових матеріалів

4.1. Напівпровідникові матеріали та їхні властивості

Електропровідність напівпровідників дуже чутлива до зміни температури, а також до інших зовнішніх енергетичних факторів — освітлення, опромінення ядрними частинками, тиску, деформації, зовнішніх електричних і магнітних полів тощо. За низьких температур електропровідність напівпровідників мала (опір великий), а за температури, наближеної до абсолютного нуля, напівпровідники мають властивості ізоляторів. Але під впливом тепла електропровідність напівпровідників зростає, опір зменшується (на відміну від провідників) (рис. 4.2).

Рис. 4.2. Залежність опору напівпровідників і металів від температури



Зменшення опору напівпровідників під час нагрівання свідчить про те, що підвищення температури приводить до збільшення кількості вільних зарядів у напівпровіднику. У металах таке не відбувається, а отже, напівпровідники мають інший механізм електропровідності, ніж метали. І причина цього — різна природа хімічного зв'язку між атомами металів і напівпровідників. Металічний зв'язок, як ви вже знаєте, забезпечується газом вільних електронів, який утримує позитивні йони у вузлах кристалічної ґратки. Напівпровідники влаштовані інакше — їхні атоми скріплює ковалентний зв'язок.

Електрони, що знаходяться на зовнішньому електронному рівні (валентні), слабше пов'язані з атомом, ніж інші електрони, які розташовані ближче до ядра. У процесі утворення ковалентного зв'язку два атоми вносять «у спільну справу» по одному своєму валентному електрону. Ці два електрони тепер належать обом атомам, тому їх називають *спільною електронною парою* (рис. 4.3). Спільна пара електронів утримує атоми напівпровідника один біля одного за допомогою сил електричного тяжіння.

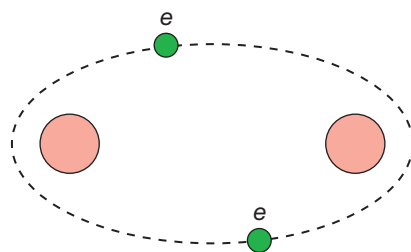


Рис. 4.3. Ковалентний зв'язок

Ковалентний зв'язок — це зв'язок, який існує між атомами за рахунок спільних електронних пар.

Крім того, електропровідність напівпровідників може дуже сильно змінюватися при додаванні навіть мізерної кількості домішок. Наприклад, якщо в хімічно чистий германій додати 0,001 % арсену, його питомою електропровідність зросте в 10 000 разів.

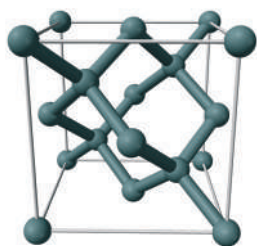


Рис. 4.4. Кристалічна структура кремнію

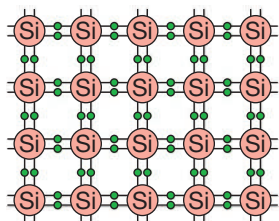


Рис. 4.5. Кристалічна ґратка кремнію

Щоб з'ясувати внутрішній склад напівпровідників, розглянемо найпоширеніший у природі напівпровідник кремній. Просторову структуру кремнію показано на *рисунку 4.4*. Кульками зображено атоми кремнію, а трубки, що їх з'єднують, — це канали ковалентного зв'язку між атомами.

Ви бачите, що кожний атом кремнію скріплений із чотирма сусідніми атомами. Чому так відбувається? Справа в тому, що кремній чотиривалентний — на зовнішній електронній оболонці атома кремнію розташовані чотири валентні електрони. Кожний із цих чотирьох електронів готовий утворити спільну електронну пару з валентним електроном іншого атома. У результаті атом кремнію оточують чотири атоми, які «пристикувалися» до нього й кожний з яких вносить по одному валентному електрону. Відповідно, навколо кожного атома кремнію розташовується по вісім електронів (чотири своїх і чотири чужих). Більш детально ви бачите це на плоскій схемі кристалічної ґратки кремнію (*рис. 4.5*).

Ковалентні зв'язки зображено парами ліній, що з'єднують атоми; на цих лініях знаходяться спільні електронні пари. Кожний валентний електрон, розташований на такій лінії, більшість часу проводить у просторі між двома сусідніми атомами. Однак валентні електрони аж ніяк не «прив'язані намертво» до відповідних пар атомів. Відбувається перекриття електронних оболонок усіх сусідніх атомів, так що будь-який валентний електрон є спільним надбанням усіх атомів-сусідів. Від деякого атома такий електрон може перейти до сусіднього з ним атома, потім — до наступного й так далі. Валентні електрони можуть переміщатися по всьому простору кристала — вони належать усьому кристалу, а не якійсь одній атомній парі.

Проте валентні електрони кремнію не є вільними (як у металах). У напівпровіднику зв'язок валентних електронів з атомами набагато міцніший, ніж у металі. Енергії електронів виявляється недостатньо для того, щоб під дією зовнішнього електричного поля почати впорядкований рух від меншого потенціалу до більшого. Тому за досить низьких температур напівпровідники близькі до діелектриків — вони не проводять електричний струм.

4.2. Утворення енергетичних зон

За умови, що атоми в матеріалі розміщені на великих відстанях один від одного, взаємодією між ними можна знехтувати. Потенціальна енергія взаємодії електрона з ядром $E(r)$ має вигляд енергетичної ями. Електрон у такій ямі має від'ємну енергію і може знаходитися на одно-

4.2. Утворення енергетичних зон

му з рівнів: $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. Рівні, які розміщені вище від рівня E_n , — вільні. При цьому потенційні бар'єри перешкоджають вільному переходу електронів від одного атома до другого.

При наближенні атомів потенціальні криві, які відділяють сусідні атоми, частково перекриваються й утворюють потенціальну криву, яка проходить нижче від нульового рівня 0–0 (рис. 4.6). Це означає, що зближення атомів приводить до зменшення не тільки ширини, а й висоти бар'єра. Оскільки ця висота нижча від початкового положення енергетичного рівня валентних електронів E_n , то останні отримують змогу практично без перешкод переходити від одного атома до другого.

При наближенні атомів один до одного, як схематично показано на рисунку 4.7, дискретні енергетичні рівні, властиві окремому атому, розщеплюються на окремі підрівні, у результаті чого тверде тіло характеризується певною зонною діаграмою, у якій *дозволені* енергетичні зони чергуються із *забороненими*. Кожна зона складається з множини дискретних енергетичних підрівнів, відстань між якими така мала, що зони можна вважати практично безперервними.

Енергетичні зонні діаграми матеріалів зображено на рисунку 4.8. Верхню дозволену зону називають *вільною*, або *зоною провідності*, а розміщену під нею дозволену зону — *валентною зоною*. У напівпровідниках і діелектриках між валентною зоною і зоною провідності існує проміжна зона — *заборонена*. Особливість цієї зони — повна відсутність дозволених рівнів. Ширина забороненої зони дорівнює величині енергії, яку необхідно надати електрону, щоб перевести його зі зв'язаного стану у валентній зоні в

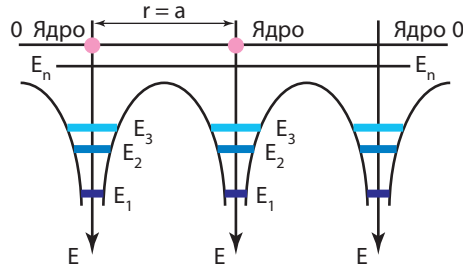


Рис. 4.6. Енергетичні схеми атомів, наближених на відстань $r = a$

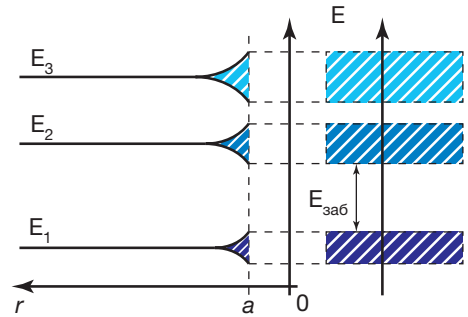


Рис. 4.7. Утворення енергетичних зон із дискретних рівнів при наближенні атомів, де a — параметр ґратки; r — відстань між атомами

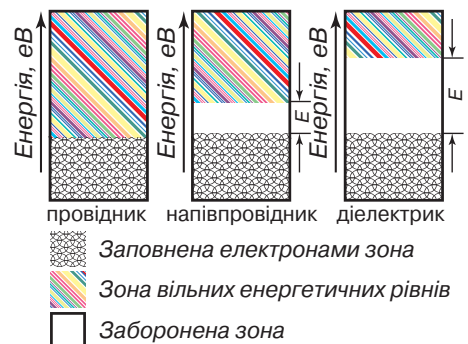


Рис. 4.8. Енергетичні зонні діаграми провідників, напівпровідників і діелектриків

Розділ 4. Напівпровідники

зону провідності. Ширина забороненої зони в напівпровідниках становить до 3 еВ (електрон-вольт), у діелектриках — перевищує 3 еВ, у провідниках забороненої зони немає.

За температури, близької до абсолютного нуля, валентна зона в напівпровідниках завжди повністю заповнена електронами, а зона провідності може бути порожньою. Щоб «звільнити» електрони й викликати електричний струм, необхідно ззовні надати їм енергію (наприклад, нагріти кристал). Завдяки цьому електрони будуть переведені на вищі енергетичні рівні й становитимуть зону провідності (зону вільних електронів).

Значення ширини забороненої зони елементарних напівпровідників ілюструє *таблиця 4.1*, у якій зазначено, що напівпровідникові властивості мають деякі модифікації олова та вуглецю. Останній існує у двох алотропних формах — алмаз і графіт. Графіт за своїми електричними властивостями подібний до провідників ($\Delta E < 0,1$ еВ), а чисті алмази є діелектриками ($\Delta E = 5,6$ еВ). Однак штучні алмази за рахунок уведених домішок набувають властивостей напівпровідників. Олово за нормальних умов є хорошим провідником, але за температури нижче $+13,2$ °C воно переходить в α -модифікацію (сіре олово).

Таблиця 4.1

Ширина забороненої зони (ΔE) елементарних напівпровідників за температури 300 К ($+26,85$ °C)

Елемент	ΔE , еВ	Елемент	ΔE , еВ
Бор	1,1	Арсен	1,2
Вуглець (алмаз)	5,6	Стибій	0,12
Кремній	1,12	Сульфур	2,5
Германій	0,665	Селен	1,8
Олово (α -Sn)	0,8	Телур	0,36
Фосфор	1,5	Йод	1,25

4.3. Електропровідність напівпровідників та її види

Якщо напівпровідниковий елемент включити в електричний ланцюг і почати його нагрівати, то сила струму в ланцюзі зростає. Отже, опір напівпровідника зменшується зі зростанням температури. Чому це відбувається? За підвищеної температури теплові коливання атомів стають інтенсивнішими, й енергія валентних електронів зростає. У деяких електронів енергія досягає значень, достатніх для розриву ковалентних зв'язків. Такі електрони залишають свої атоми й стають *вільними* (або *електронами провідності*) — так само, як у металах. У зовнішньому електричному полі вільні електрони починають упорядкований рух, утворюючи електричний струм.

Розрив ковалентних зв'язків і появу вільних електронів подано на *рисунок 4.9*. На місці розірваного ковалентного зв'язку, там, де був елек-

4.3. Електропровідність напівпровідників та її види

трон, утворюється порожнє місце, яке отримало умовну назву «дірка», — незаповнений зв'язок із зарядом, що дорівнює заряду електрона, але з протилежним знаком. Тобто «дірка» має позитивний заряд, оскільки з відходом негативно зарядженого електрона залишається некомпенсований позитивний заряд ядра атома кремнію.

«Дірки» також не залишаються на місці — вони можуть «блукати» по кристалу. Справа в тому, що один із сусідніх валентних електронів, «подорожуючи» між атомами, може «перескочити» на вакантне місце, що утворилося, заповнивши «дірку»; тоді «дірка» в цьому місці зникне, але з'явиться нова «дірка» в тому місці, звідки цей електрон прийшов.

За відсутності зовнішнього електричного поля переміщення «дірок» має випадковий характер, бо валентні електрони також «блукать» між атомами хаотично. Однак в електричному полі починається спрямований рух і електронів, і «дірок».

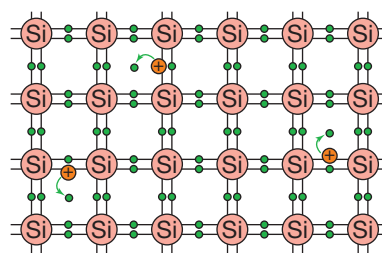


Рис. 4.9. Утворення вільних електронів і «дірок»

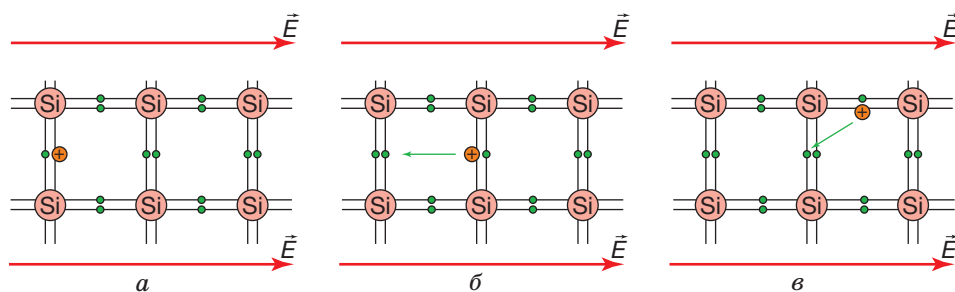


Рис. 4.10. Рух «дірки» в електричному полі

На *рисунку 4.10* зображено напівпровідник, розміщений в електричному полі. *Рисунок 4.10, а* — початкове положення «дірки». Куди вона зміститься? Очевидно, що найбільш вірогідні «переходи» електрон–«дірка» в напрямку *проти* ліній поля. Один із таких перескоків показано на *рисунку 4.10, б*: електрон «стрибнув» уліво (зелена стрілка), заповнивши вакансію, а «дірка», відповідно, змістилася вправо. Наступний можливий стрибок електрона, викликаний електричним полем, зображено на *рисунку 4.10, в*. У результаті цього «стрибка» «дірка» зайняла нове місце, розташоване ще правіше.

Ми бачимо, що «дірка» в цілому переміщується *в напрямку ліній поля* — тобто туди, куди й має рухатися позитивний заряд. «Перескоки» валентних електронів від атома до атома відбуваються переважно в напрямку *проти ліній поля*.

Отже, у кристалі кремнію є два типи носіїв заряду: *вільні електрони* та «*дірки*». При накладанні зовнішнього електричного поля з'являється електричний струм, викликаний їх упорядкованим зустрічним рухом:

вільні електрони переміщуються протилежно до вектора напруженості електричного поля E , а «дірки» — у напрямку вектора E .

Виникнення струму за рахунок руху *вільних електронів* називають *електронною провідністю*, або *провідністю n-типу*. Процес упорядкованого *переміщення «дірок»* називають *«дірковою» провідністю*, або *провідністю p-типу* (від перших літер латинських слів *negativus* — негативний і *positivus* — позитивний). Обидві провідності в чистому напівпровіднику — електронну та «діркову» — разом називають *власною провідністю* напівпровідника.

У чистому напівпровіднику число електронів, які вивільнюються в кожний момент часу, дорівнює числу «дірок», що утворюються при цьому. Загальна ж їхня кількість за кімнатної температури відносно невелика. Тому електропровідність такого напівпровідника мала, і він здійснює досить великий опір електричному струму.

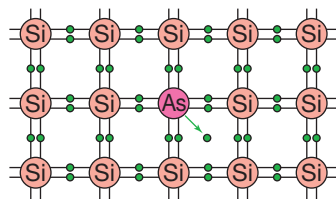


Рис. 4.11. Напівпровідник n-типу

Найважливішою особливістю напівпровідників є те, що їхній питомий електричний опір може бути змінений на кілька порядків у результаті додавання домішок. У такому випадку, крім власної провідності, у напівпровіднику виникає домінуюча *домішкова провідність* того чи іншого типу. Наприклад, у розплав чотиривалентного кремнію (Si) додано трохи п'ятивалентного арсену (As). Після

кристалізації розплаву виявляється, що атоми арсену займають місця в деяких вузлах кристалічної ґратки кремнію. На зовнішньому електронному рівні атома арсену п'ять електронів. Чотири з них утворюють ковалентні зв'язки з найближчими сусідами — атомами кремнію (рис. 4.11). Яка ж доля п'ятого електрона арсену, що не брав участі у створенні ковалентних зв'язків? А п'ятий електрон стає вільним! Справа в тому, що енергія зв'язку цього «зайвого» електрона з атомом арсену, розташованим у кристалі кремнію, набагато менша від енергії зв'язку валентних електронів з атомами кремнію. Тому вже за кімнатної температури майже всі атоми арсену в результаті теплового руху залишаються без п'ятого електрона, перетворюючись на позитивні йони. Кристал кремнію, відповідно, наповнюється вільними електронами, які відчепилися від атомів арсену. Але в такому разі поява вільного електрона, який «пішов» з атома арсену, не супроводжується появою рухомої «дірки».

Отже, проникнення атомів п'ятивалентного арсену в кристалічну ґратку кремнію створює електронну провідність, але не приводить до симетричної появи «діркової» провідності. Головна роль у створенні струму тепер належить вільним електронам, які в такому випадку називають *основними носіями заряду*.

Механізм власної провідності продовжує працювати й за наявності домішок: ковалентні зв'язки, як і раніше, рвуться за рахунок теплового

4.3. Електропровідність напівпровідників та її види

руху, породжуючи вільні електрони й «дірки». Але тепер «дірок» виявляється набагато менше, ніж вільних електронів, у великій кількості наданих атомами арсену. Тому «дірки» в цьому випадку будуть *неосновними носіями заряду*.

Домішки, атоми яких віддають вільні електрони без появи однакової кількості рухливих «дірок», називаються *донорними*. Тому напівпровідники з донорними домішками називають *електронними напівпровідниками*, або *напівпровідниками n-типу*.

Можна, навпаки, створити напівпровідник з переважно «дірковою» провідністю. Так вийде, якщо в кристал чотиривалентного кремнію (Si) додати тривалентну домішку, наприклад індій (In). Результат такого проникнення показано на *рисунок 4.12*. Що відбувається в такому випадку? На зовнішньому електронному рівні атома індію розташовані три електрони, які формують ковалентні зв'язки з трьома атомами кремнію, які їх оточують. Для четвертого сусіднього атома кремнію в атома індію вже не вистачає електрона, і в цьому місці виникає «дірка». І «дірка» ця не проста, а особлива — з досить великою енергією зв'язку. Коли в неї потрапить електрон із сусіднього атома кремнію, він у ній «застрягне назавжди», бо тяжіння електрона до атома індію дуже велике — більше, ніж до атомів кремнію. Атом індію перетвориться на негативний йон, а в тому місці, звідки електрон «прийшов», виникне «дірка» — але тепер уже звичайна рухлива «дірка» у вигляді розірваного ковалентного зв'язку в кристалічній ґратці кремнію. Ця «дірка» почне «блукати» по кристалу за рахунок «естафетного» передання валентних електронів від одного атома кремнію до іншого.

Отже, кожний домішковий атом індію породжує «дірку», але не приводить до симетричної появи вільного електрона. Домішки, атоми яких створюють у кристалі рухливі «дірки», називають *акцепторними*.

Тривалентний індій (In) — приклад акцепторної домішки для чотиривалентного кремнію (Si). Якщо до кристалу чистого кремнію додати акцепторну домішку, то кількість «дірок», породжених домішкою, буде набагато більшою від кількості вільних електронів, що виникли за рахунок розриву ковалентних зв'язків між атомами кремнію. Напівпровідник з акцепторною домішкою — це *«дірковий» напівпровідник*, або *напівпровідник p-типу*.

«Дірки» відіграють головну роль під час створення струму в напівпровіднику p-типу. У цьому випадку «дірки» — *основні носії заряду*; вільні електрони — *неосновні носії заряду*. Рух вільних електронів у напівпровіднику p-типу не має істотного впливу: електричний струм забезпечується насамперед «дірковою» провідністю.

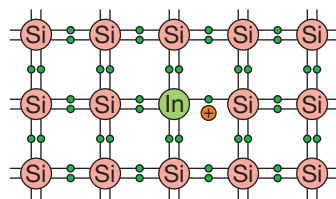


Рис. 4.12. Напівпровідник p-типу

Отже, електропровідність напівпровідників:

- забезпечується вільними електронами та «дірками»;
- залишається постійною в межах області температур, специфічної для кожного виду напівпровідників, і збільшується з підвищенням температури;
- залежить від домішок;
- збільшується під дією світла (так звана фотопровідність), а також під час зростання напруженості електричного поля, тиску й інших факторів.

4.4. Електронно-«дірковий» перехід (*p-n*-перехід)

Робота переважної більшості напівпровідникових приладів ґрунтується на явищах, які виникають при контакті двох монокристалічних напівпровідників із різними типами провідності. Такий контакт *p*- і *n*-напівпровідників називають *p-n*-переходом, або електронно-«дірковим». Він має цінні властивості, використання яких і обумовлює широкий спектр можливостей напівпровідникових приладів.

Щоб отримати *p-n*-перехід, потрібно в кристалі напівпровідника утворити дві контактуючі ділянки з різними типами провідності.

Найпростіше це можна зробити так званим методом сплавлення (рис. 4.13).

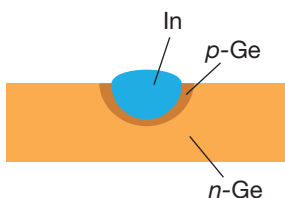


Рис. 4.13. Утворення *p-n*-переходу

Як основу беруть пластинку з монокристалу германію (*n-Ge*), який має провідність *n*-типу. Зверху кладуть шматочок тривалентної домішки, наприклад, індію (In), і нагрівають до +450–+500 °С. Германій та індій сплавляються і після охолодження утворюється *p-n*-перехід: прикордонний шар германію збагачується індієм, унаслідок чого утворюється тонкий шар напівпровідника *p*-типу (*p-Ge*).

Цей шар у місці контакту з германієм *n*-типу й утворює електронно-«дірковий» перехід.

Розглянемо процеси в напівпровідниковому елементі, який складається з двох частин, одна з яких має провідність *p*-типу, а інша — *n*-типу. На рисунку 4.14 зображено контакт таких ділянок; кольорові кружечки — це «дірки» та вільні електрони, які є основними (або неосновними) носіями заряду у відповідних ділянках.

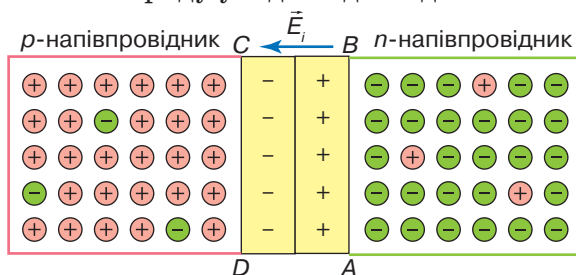


Рис. 4.14. Замикаючий шар *p-n*-переходу

4.4. Електронно-«дірковий» перехід (р-п-перехід)

У напівпровіднику p -типу, який отримують за допомогою акцепторної домішки, концентрація «дірок» набагато перевищує концентрацію електронів. У напівпровіднику n -типу, який отримують за допомогою донорної домішки, концентрація електронів набагато перевищує концентрацію «дірок». Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне *дифузний струм* — основні носії заряду (електрони й «дірки») будуть хаотично перетікати з тієї ділянки, де їх більше, у ту ділянку, де їх менше, і рекомбінувати один з одним. Як наслідок, поблизу межі між ділянками практично не буде вільних (рухомих) основних носіїв заряду, але залишаться йони домішок із некомпенсованими зарядами. Ділянка в напівпровіднику p -типу, яка прилягає до межі, отримує при цьому негативний заряд, принесений електронами, а прикордонна ділянка в напівпровіднику n -типу отримує позитивний заряд, принесений «дірками» (точніше, утрачає негативний заряд, що його відносять електрони).

У результаті в напівпровіднику n -типу біля межі контакту залишається некомпенсований заряд позитивних (+) йонів донорної домішки, а в напівпровіднику p -типу (також поблизу межі) виникає некомпенсований негативний (-) заряд йонів акцепторної домішки. Ці некомпенсовані об'ємні заряди утворюють так званий *замикальний шар*, внутрішнє електричне поле якого перешкоджає подальшій дифузії вільних електронів і «дірок» через межу контакту. У ділянці p - n -переходу виникає цікаве й дуже важливе явище — *однобічна провідність*.

Тепер підключимо до нашого напівпровідникового елемента джерело живлення так, щоб «плюс» джерела — до n -напівпровідника, а «мінус» — до p -напівпровідника (рис. 4.15). Ви бачите, що зовнішнє електричне поле веде основні носії заряду далі від межі контакту. Ширина замикального шару збільшується, його електричне поле зростає. Опір замикального шару великий, й основні носії не в змозі подолати p - n -перехід. Електричне поле дає змогу переходити межу лише неосновним носіям, однак, з огляду на дуже малу концентрацію неосновних носіїв, струм, який вони створюють, дуже малий. Подану нижче схему називають *уключенням p - n -переходу у зворотному напрямку*.

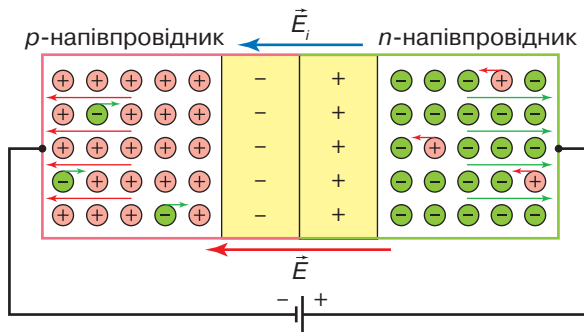


Рис. 4.15. Уключення p - n -переходу у зворотному напрямку: струму немає

Електричного струму основних носіїв немає; є лише мізерно малий струм неосновних носіїв. У цьому випадку *p-n*-перехід виявляється *закритим*.

Поміняємо полярність підключення джерела живлення й подамо «плюс» на *p*-напівпровідник, а «мінус» — на *n*-напівпровідник (рис. 4.16). У такому разі зовнішнє електричне поле спрямоване проти замикального поля і відкриває шлях для руху основних носіїв через *p-n*-перехід. Замикальний шар стає тоншим, його опір зменшується. Відбувається масове переміщення вільних електронів із *n*-ділянки в *p*-ділянку, а «дірки» так само спрямовуються з *p*-ділянки до *n*-ділянки. У ланцюгу виникає струм, викликаний рухом основних носіїв заряду.

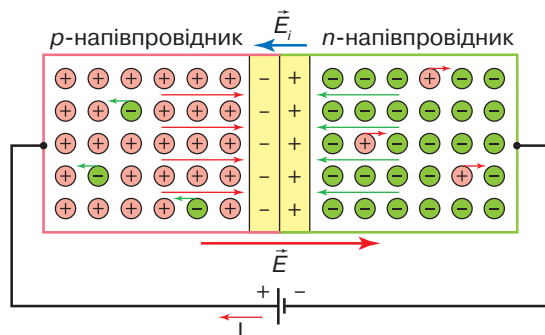


Рис. 4.16. Уключення *p-n*-переходу в прямому напрямку: струм іде

Цю схему називають *уключенням p-n-переходу в прямому напрямку*. Тепер електричне поле перешкоджає перетіканню неосновних носіїв, але цей незначний фактор помітно не впливає на загальну провідність.

4.5. Вольт-амперна характеристика напівпровідників

З'ясуємо, як сила струму в напівпровіднику залежить від прикладеної напруги.

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) матеріалу чи пристрою називають залежність сили струму в ньому від величини прикладеної напруги. ВАХ зазвичай зображують як графік, у якому напруга прикладається вздовж осі абсцис, а струм — уздовж осі ординат (рис. 4.17).

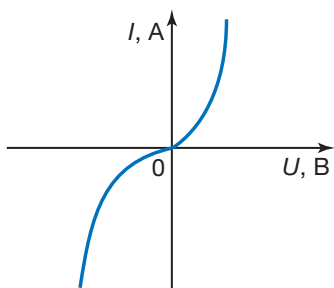


Рис. 4.17. Вольт-амперна характеристика чистого напівпровідника

У напівпровідниках прямої залежності сили струму від напруги немає. Струм при збільшенні напруги зростає значно швидше за саму напругу. Якщо змінити напругу на зворотну, то зміна струму в напівпровіднику відбуватиметься за таким само законом. Тобто вольт-амперна характеристика чистого напівпровідника симетрична.

4.5. Вольт-амперна характеристика напівпровідників

Якщо взяти два напівпровідники з різними типами провідності й розташувати їх у тісному контакті (створити p - n -перехід), то вольт-амперна характеристика такого пристрою стане несиметричною. Звідси випливає: якщо струм йде в одному напрямку, ця система матиме малий опір, а в іншому напрямку — великий. Отже, і струм у різних напрямках (прямий і зворотний) матиме різну величину (рис. 4.18). Однобічна провідність p - n -переходу використовується в напівпровідниковому **діоді** — електронному приладі з одним p - n -переходом і з двома електродами (анод і катод), що пропускає електричний струм лише в одному напрямку; у протилежному напрямку струм через діод не проходить (діод, як кажуть, «закритий») (рис. 4.19). Діоди застосовують у радіотехніці, електроніці, енергетиці переважно для випрямлення змінного електричного струму.

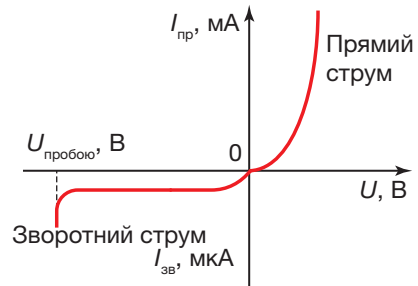


Рис. 4.18. Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

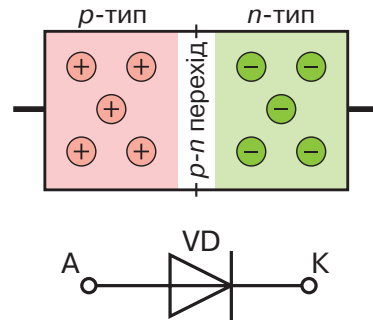


Рис. 4.19. Напівпровідниковий діод: схематичне зображення будови й умовне графічне позначення на схемах

Напівпровідникові p - n -переходи використовують не тільки для випрямлення змінного струму, а й для підсилення електричних сигналів. Якщо в електричну схему з двох увімкнених послідовно між собою p - n -переходів увести зворотний зв'язок, то її можна використовувати й для генерації електричних коливань. Напівпровідникові прилади, призначені для розв'язання цих завдань, називають **напівпровідниковими тріодами**, або **транзисторами** — це напівпровідниковий прилад, який застосовують для підсилення або генерації електричних сигналів.

Напівпровідникові тріоди, на відміну від діодів, мають два електронно-«діркових» переходи, увімкнених послідовно між собою назустріч один одному (n - p - n або p - n - p -переходи). Умовне позначення транзисторів на схемах зображено на *рисунку 4.20* (с. 158). Їхніми робочими електродами є **база Б**, **емітер Е** та **колектор К**.

Розділ 4. Напівпровідники

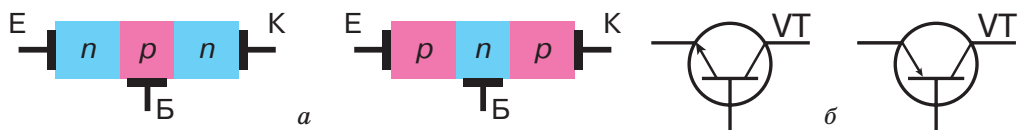


Рис. 4.20. Напівпровідниковий транзистор: а) схематичне зображення будови транзисторів типів $n-p-n$ і $p-n-p$; б) умовне графічне позначення транзисторів на схемах

Для виготовлення транзисторів використовують переважно германій і кремній, оскільки вони характеризуються значною механічною міцністю, хімічною стійкістю та великою рухливістю носіїв струму.

Напівпровідникові транзистори мають суттєві переваги перед вакуумними тріодними лампами: малі габаритні розміри, високі ККД і термін експлуатації. Якщо для роботи підсилювальної лампи потрібна висока напруга, то для живлення напівпровідникового транзистора вистачає низьковольтного гальванічного елемента. Транзистори електрично більш економічні, ніж лампові тріоди, оскільки в них відсутній нагрівний електрод (катод).

4.6. Прості напівпровідники

Основу сучасної електроніки становлять неорганічні кристалічні напівпровідники. Напівпровідникові властивості виявляють 12 хімічних елементів, що знаходяться в середній частині Періодичної системи хімічних елементів (рис. 4.21). Розгляньмо деякі з них.

Період	Група				
	IIВ	IIIА	IVА	VА	VIА
2		5 В	6 С	7 N	
3		13 Al	14 Si	15 P	16 S
4	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
5	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
6	80 Hg				

Рис. 4.21. Періодична система хімічних елементів (фрагмент)

Кремній (силіцій) (Si) за поширеністю в земній корі (29,5 %) посідає друге місце після кисню. Численні сполуки кремнію входять до складу більшості гірських порід і мінералів. Пісок і глина, що утворюють мінеральну частину ґрунту, також є його сполуками. Найбільш поширеною сполукою цього елемента є силіцій(IV) оксид (SiO_2). Ця сполука трапляється переважно як мінерал кварц. У деяких родовищах чистота кварцового піску досягає 99,9 %. У вільному стані в природі простої речовини кремній немає.

Вихідною сировиною для отримання кремнію є природний двооксид (кремнезем), з якого кремній відновлюють вуглецевмісним матеріалом

лом в електричних дугових печах. Піч завантажують кварцитом і вуглицем як вугілля й кокс. Температура реакції: $+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. У печі відбуваються реакції, які подано формулою:



Технічний кремній-сирець — це дрібнокристалічний матеріал, який містить близько 1 % домішок. Його не можна використовувати для вирощування легованих монокристалів і виготовлення будь-яких напівпровідникових приладів. Очищення кремнію від домішок у твердій фазі є дуже складним завданням. Технологія отримання кремнію напівпровідникової чистоти проходить у кілька етапів і складається з таких операцій:

- 1) перетворення технічного кремнію на летку сполуку, яка після очищення може бути легко відновлена;
- 2) очищення сполуки фізичними й хімічними методами;
- 3) відновлення сполуки з виділенням чистого кремнію;
- 4) остаточне кристалізаційне очищення та вирощування монокристалів.

Розгляньмо наступне очищення кремнію методом вертикального безтигельного зонного плавлення (рис. 4.22). За такого методу в матеріалі створюється зона розплаву, що повільно пересувається від одного кінця зразка матеріалу до іншого, залишаючи за собою шар очищеної речовини. Ідея методу полягає в тому, що домішки в розплавленні мають розчинність, що відрізняється від розчинності у твердому тілі. Кремнієвий стрижень 1 поміщають усередину кварцової труби 3, де створюється вакуум або атмосфера інертного газу. Зразок кремнію закріплюють між двома штоками 2 і 4, які обертаються для контролю розплавленої зони 6. Рух розплавленої зони забезпечується переміщенням індуктора 5 зовні кварцової труби.

Вирощування монокристалів кремнію здійснюється витягуванням кристалів із розплаву (рис. 4.23, с. 160) за методом, запропонованим польським ученим Дж. Чохральським у 1918 р. Сутність методу полягає в тому, що вихідний полікристалічний матеріал завантажують у тигель, потім розплавляють його в герметичній камері у вакуумі або інертній атмосфері. За допомогою штока до розплаву додають затравку. Затравкою є монокристал із високим ступенем структурної досконалості, який вирізають у чітко визначених

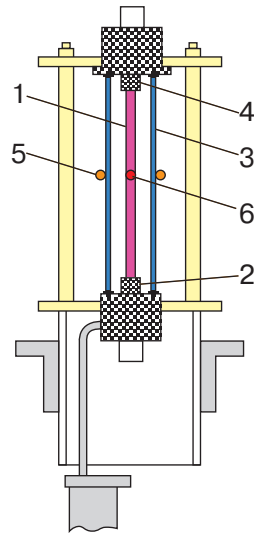


Рис. 4.22. Схема установки для безтигельного зонного плавлення кремнію:

- 1 — кремнієвий стрижень;
- 2, 4 — штоки;
- 3 — кварцова труба;
- 5 — індуктор;
- 6 — розплавлена зона

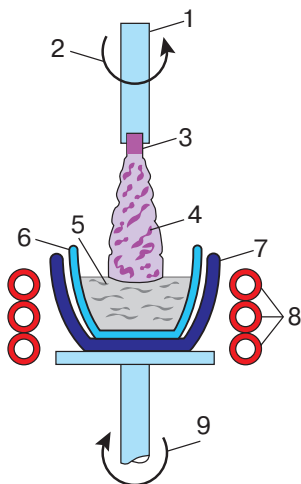


Рис. 4.23. Схема установки для вирощування монокристалів напівпровідників із розплаву за методом Чохральського: 1 — штук; 2 — напрям витягування і кручення; 3 — затравка; 4 — зростаючий монокристал; 5 — розплав; 6 — тигель із кварцу; 7 — графітова оболонка; 8 — високочастотний нагрівач; 9 — крутильний столик

кристалографічних напрямках. Після оплавлення затравку повільно піднімають, одночасно обертаючи її, що сприяє перемішуванню розплаву й вирівнюванню температури в ньому. При перемішуванні затравка тягне за собою стовпчик розплаву, який утримується силами поверхневого натягу. Піднімаючись, стовпчик розплаву охолоджується й кристалізується за орієнтацією затравки. Далі кристал повільно охолоджують, помалу піднімаючи його над розплавом і повільно знижуючи температуру нагрівача. Так вирощують монокристалічні зливки діаметром до 150 мм.

За методом Чохральського можна вирощувати не тільки вузькі й довгі, а й дископодібні кристали. Вирощуванням кристалу, який знаходиться в неперервному контакті з поверхнею розплаву, з допоміжним нагрівом зовнішнього краю диска отримували диски діаметром від 150 мм і масою від 450 до 1800 г. Для прискорення охолодження кристали обдувають аргоном.

Кристалічний чистий кремній (рис. 4.24) — тверда речовина сірого кольору з металічним блиском, тепло- й електропровідний. Напівпровідникові властивості обумовлені будовою кристала, яка аналогічна алмазу. Проте зв'язки в кристалі значно слабші, ніж в алмазі, і за нормальних умов частина з них розірвана, а тому в кристалі є вільні електрони, наявність яких і зумовлює незначну тепло- й електропровідність. При нагріванні розривається більше зв'язків, тому тепло- й електропровідність зростає.

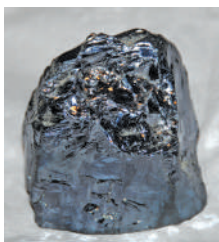


Рис. 4.24. Кристалічний чистий кремній

У хімічному відношенні кристалічний кремній за кімнатної температури є відносно інертною речовиною. Він нерозчинний у воді, не реагує з багатьма кислотами в будь-якій концентрації. Добре розчиняється лише в суміші нітратної та плавикової

кислот і в киплячих лугах. Кремній стійкий на повітрі під час нагрівання за температури $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо ця температура вища, він починає інтенсивно окиснюватися, й утворюється силіцій(IV) оксид (SiO_2). Під час нагрівання кремній легко взаємодіє з галогенами, а за температур $+1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ здатний безпосередньо з'єднуватися з азотом з утворенням силіцій нітриду (Si_3N_4). Кремній добре розчинний у багатьох розплавлених металах (Al, Ga, Sn, Au, Ag та ін.). З металами (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg та ін.) він утворює стійкі хімічні сполуки — силіциди. У результаті реакції кремнію з вуглецем утворюється силіцій карбід (SiC) — дуже стійка хімічна сполука з напівпровідниковими властивостями.

Кремній має порівняно високу температуру плавлення й у розплавленому стані вирізняється високою хімічною активністю (див. табл. 4.2, с. 166). Тому під час вирощування монокристалів виникають труднощі з підбором тигельного матеріалу. Найбільш термостійкі матеріали (кварц і графіт), з яких зазвичай виготовляють човники й тиглі, за високих температур взаємодіють із кремнієм.

Перевага кремнію перед германієм полягає в більшій ширині забороненої зони. Тому кремнієві прилади можуть працювати за вищих температур. Якщо робоча температура германієвих приладів не перевищує $+60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, то кремнієві діоди можуть працювати до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім того, кремній — матеріал, найбільш придатний для виготовлення фотоелементів, призначених для безпосереднього перетворення сонячної енергії на електричну. ККД фотоелементів досягає $15\text{--}20\%$.

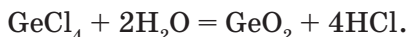
Кремній є базовим матеріалом для виготовлення низькочастотних і високочастотних, потужних і малопотужних біполярних транзисторів, польових транзисторів та інтегральних мікросхем для приймально-підсилювальної апаратури й обчислювальної техніки. З кремнію виготовляють випрямні, імпульсні та НВЧ-діоди, тиристори й більшість стабілітронів, що витримують напругу стабілізації від 3 до 400 В. Кремнієві випрямні площинні діоди можуть витримувати зворотні напруги до 1500 В і пропускати струм у прямому напрямку до 1500 А, істотно перевершуючи за цими параметрами германієві діоди.

У техніці широко застосовують кремнієві fotocутливі прилади, особливо фотодіоди, що вирізняються високою швидкістю. Спектр fotocутливості кремнієвих фотодетекторів добре узгоджується зі спектром випромінювання багатьох напівпровідникових джерел світла. Кремнієві фотоелементи, які використовують для перетворення сонячної енергії на електричну, отримали назву *сонячні батареї*. Їх використовують у системах енергопостачання космічних апаратів. Їхній ККД в більшості випадків становить $10\text{--}12\%$. Зі здешевленням виробництва кремнію сонячні батареї стали перспективними для наземного використання. Також кремній використовують для виготовлення детекторів ядерного випромінювання.

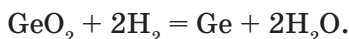
Сплав заліза з кремнієм (феросиліцій) використовують у виготовленні деталей заводської жаростійкої та хімічно стійкої апаратури. Високотвердий сплав кремнію з графітом (карборунд) із кристалічною ґраткою алмазу застосовують для виготовлення наждачного паперу й гострильних кругів.

Існування та основні властивості *германію (Ge)* у 1870 р. передбачив Д. Менделєєв, назвавши його *екасиліцієм*. У 1886 р. німецький хімік К. Вінклер знайшов у мінеральній сировині новий елемент, який назвав *германієм* (на честь своєї батьківщини). Германій виявився тотожним екасиліцію.

Германій часто трапляється в природі, його вміст у земній корі приблизно дорівнює природним запасам таких поширених металів, як олово й свинець. Але він є в різних мінералах у дуже невеликих кількостях, тому отримання германію в елементарному вигляді викликає великі труднощі. Мінерали з великою концентрацією германію трапляються дуже рідко й не можуть бути сировиною для виробництва напівпровідника. Основними джерелами промислового отримання германію є побічні продукти цинкового виробництва, коксування вугілля, а також германієві концентрати, які отримують із мідно-свинцево-цинкових руд. У результаті хімічного перероблення вихідної сировини утворюється германій тетрахлорид — рідина з невисокою (+83 °С) температурою кипіння. Рідину піддають глибокому очищенню, а після того очищений тетрахлорид шляхом гідролізу переводять у германій(IV) оксид (GeO₂):



Елементарний германій отримують відновленням його оксиду:



Процес водневого відновлення здійснюють в електричних печах за температури +650–700 °С. Заключна стадія процесу суміщується з плавленням утвореного порошку германію і направленою кристалізацією розплаву.

Матеріали, що пройшли хімічне очищення, не завжди задовольняють вимоги напівпровідникового приладобудування. Для отримання кристалів особливої чистоти з мінімальною кількістю залишкових домішок використовують різні методи кристалізаційного очищення. Серед них найбільш ефективний *метод зонного плавлення* (рис. 4.25).

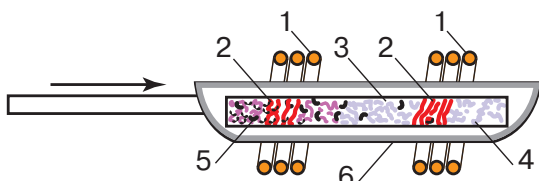


Рис. 4.25. Схема пристрою для зонного плавлення германію:

- 1 — індукційні котушки;
- 2 — розплавлені зони; 3 — очищений германій; 4 — надчистий германій;
- 5 — германій із підвищеним вмістом домішок; 6 — графітовий човник

Процес зонного очищення германію здійснюється в атмосфері водню, інертних газів або суміші водню та інертних газів. Зливоч, який піддають очищенню, ставлять у графітовий човник 6, який має високу температуру плавлення, не розчиняється в германії і не реагує з ним. Човник укладають у кварцову трубу, по якій безперервно проходить захисний газ. Зразок германію з одного кінця розплавляється, потім розплавлена зона починає рухатися уздовж злитка. Довжина розплавленої зони залежить від довжини злитка й становить кілька сантиметрів. Речовина плавиться індукційними струмами обмоток 1. Швидкість руху становить від кількох міліметрів до кількох сантиметрів на годину. Рух може здійснюватися або за рахунок переміщення човника, або зміщенням зони нагріву. Для прискорення процесу очищення по довжині злитка створюють не одну, а відразу кілька розплавлених зон 2. У такому разі один прохід нагрівача еквівалентний відразу кільком циклам очищення.

Потрібного ступеня чистоти досягають після 5–8 послідовних проходів розплавленої зони в одному напрямку. При більшій кількості проходів поліпшення очищення не відбувається, тому що ефект відтискування домішок перекривається надходженням їх у розплав із човника та навколишнього газового середовища в кількостях, що зростають пропорційно до часу контакту.

Метод має недоліки. Основний із них — неможливість масштабування, оскільки швидкість процесу визначається швидкістю дифузії домішки. Тому метод застосовують переважно на кінцевій стадії очищення зразків для отримання особливо чистих речовин.

Чистий германій (рис. 4.26) має яскраво-сріблястий колір і металічний блиск, характеризується відносно високою твердістю, але дуже крихкий. Подібно до кремнію він кристалізується у вигляді кубічних ґраток алмазного типу, елементарна комірка яких містить вісім атомів.

Кристалічний германій хімічно стійкий на повітрі за кімнатної температури: він не розчиняється у воді, хлоридній і розведеної сульфатній кислотах.

Активними розчинниками германію в нормальних умовах є суміш нітратної і плавикової кислот, розчин перекису водню. Під час нагрівання на повітрі до температури понад $+650^{\circ}\text{C}$ він окиснюється, утворюючи германій(IV) оксид (GeO_2). Під час нагрівання германій також інтенсивно взаємодіє з галогенами, сіркою та сірчистими сполуками.

Германій має відносно невисоку температуру плавлення і надзвичайно малий тиск насиченої пари за цієї температури. Навіть у розплавленому стані германій майже не взаємодіє з графітом і кварцовим склом, що дає змогу використовувати ці матеріали як тиглі й човники під час оброблення та здійснення металургійних процесів. Рідкий германій має здатність інтенсивно поглинати водень, причому водень є електрично нейтральною домішкою.



Рис. 4.26. Чистий германій

За нормальних умов чистий германій прозорий для електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі понад 1,8 мкм. За кімнатної температури рухливість електронів приблизно вдвічі перевищує рухливість «дірок». Однак при зміні температури це співвідношення змінюється.

Для виготовлення напівпровідникових приладів застосовують германій із певними добавками електрично активних домішок. Як донори й акцептори найчастіше функціонують відповідно елементи V і III груп Періодичної системи хімічних елементів. Вплив домішок мало позначається на електричній провідності германію. Водночас, попри низьку розчинність, домішки можуть відігравати важливу роль у процесах рекомбінації та фотопровідності. Температура, за якої починає виявлятися власна електропровідність, залежить від концентрації легувальної домішки. Так, при вмісті дрібних донорів $8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ власна електропровідність виникає за температури $+50 \text{ }^\circ\text{C}$, а якщо концентрація донорів дорівнює $7 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, то для появи власної електропровідності германій потрібно нагріти вище $+200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Германій використовують у радіоелектроніці й електротехніці як напівпровідник для виготовлення випрямлячів змінного струму різної потужності, транзисторів різних типів. З нього виготовляють перетворювачі Холла й інші прилади, які застосовують для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності. Робочий діапазон температури германієвих приладів від -60 до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Оптичні властивості германію дають змогу використовувати його для виготовлення фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла й коротких радіохвиль. Германій використовують також для виготовлення лічильників ядерних частинок. Германієві прилади мають бути захищені від дії вологості повітря.

Селен (Se) відкрив у 1817 р. шведський хімік Й. Я. Берцеліус у відходах під час виготовлення на заводі сульфатної кислоти. Селен — рідкісний елемент, його вміст у земній корі дорівнює 0,00006 %. Власних руд мінерали селену не утворюють. Він міститься в невеликих кількостях (разом із телуром) у саморідній сірці та сульфідних рудах. Селен отримують із відходів (шламів) мідних або нікелевих електролітичних виробництв. У хімічному відношенні селен — майже повний аналог сірки (сульфуру). Його сполуки часто отруйні.

На повітрі селен стійкий, дуже чутливий до світла. Взаємодіє з фтором і хлором, а під час нагрівання — з металами, киснем повітря та воднем. Не розчиняється в хлоридній кислоті (HCl) і в розбавленій сульфатній кислоті (H₂SO₄); розчиняється в концентрованій нітратній кислоті (HNO₃) і в лугах з утворенням солей. Селен має дві алотропні модифікації.

Сірий (металевий) селен (рис. 4.27,б) — речовина сірого кольору зі слабким блиском. Стійка модифікація. Не розчиняється в сірковуглеці (CS₂). Електричний опір цієї модифікації різко (у 1000 разів) знижу-

ється на світлі (порівняно з електричним опором у темряві). Сірий селен переходить у червоний при розчинення в гарячій концентрованій сульфатній кислоті й виливання отриманого зеленого розчину у великий об'єм води.

Червоний селен (рис. 4.27, а) — неметалічна речовина червоного кольору, розчинна в сірководнеці (CS_2) з утворенням жовтого розчину. Термодинамічно нестійка модифікація. На повітрі згортає блакитним полум'ям, поширюючи характерний запах гнилих овочів.



Рис. 4.27.
Червоний (а),
сірий (б) селен

Щороку у світі отримують приблизно 1000 т селену. Він краще проводить електричний струм під час освітлення, тому його широко використовують для виготовлення фотоелементів, приладів інфрачервоного діапазону, у вимірювальній апаратурі, для сигналізації. У металургії селен застосовують у складі легувальних домішок до різних сталей і сплавів кольорових металів; як барвник — у склоробній промисловості. У сучасних напівпровідникових технологіях використовують селеніди багатьох елементів: олова, свинцю, бісмуту, стибію, селеніди лантаноїдів. Стабільний ізотоп селен-74 застосовують під час створення плазмового лазера з унікальним підсиленням (приблизно в 109 разів). Радіоактивний ізотоп селен-75 використовують у дефектоскопії як потужне джерело гамма-випромінювання.

Телур (Te) (рис. 4.28) — сріблясто-біла речовина з металевим блиском. Незважаючи на зовнішню подібність телуру з металами, він крихкий і легко розтирається на порошок. У тонких шарах порошку телур на просвіт має колір від сірого до коричневого, у парах — золотисто-жовтий. Електрична провідність телуру мала, але під час освітлення збільшується, що характерно для напівпровідників. За хімічними властивостями близький до селену. Уступає в сполуки з киснем, воднем, сіркою, фосфором. Розчиняється в сульфатній і нітратній кислотах, лугах. Його сполуки отруйні. За запасами телуру найбільш значні магматичні мідно-нікелеві, гідротермальні мідно-молібденові, мідно-колчеданні й інфільтраційні селен-уран-ванадієві родовища, у яких добувають майже весь телур при вмісті в рудах 0,04–0,004 %.

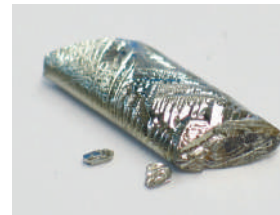


Рис. 4.28. Телур

Основне джерело отримання телуру — шлами електролітичного рафінування міді та свинцю. Відходи випалюють, телур залишається в золі, яку промивають хлоридною кислотою. З отриманого розчину телур виділяють, пропускаючи через нього сульфур(IV) оксид (SO_2).

Сполуки телуру з металами — телуриди. У техніці їх застосовують для виготовлення термоелектричних генераторів. Такими генераторами, що перетворюють теплову енергію на електричну, оснащені штучні супутники, радіометеорологічні станції та інші автономні установки.

Розділ 4. Напівпровідники

Напівпровідникову сполуку кадмій телурид (CdTe) в монокристалічній формі використовують для створення детекторів гамма-променів і жорсткого рентгенівського випромінювання як ІЧ-фільтри. Тонкі плівки CdTe застосовують в електронній промисловості для виготовлення сонячних батарей, які є другими за популярністю у сфері сонячної енергетики. ККД таких батарей перевищує 20 %. За останні роки цей напрям дуже розвинувся, а тому й частка телуру, який використовують для потреб сонячної енергетики, також зростає.

Таблиця 4.2

Основні властивості деяких простих напівпровідників

Властивості	Кремній Si	Германій Ge	Селен Se	Телур Te
Щільність за 20 °С, г/см ³	2,33	5,32	4,82	6,25
Температура плавлення, °С	1414	936	220	450
Температура кипіння, °С	2477	2700	685	500
Діелектрична проникність ϵ	12,5	16	5,3	–
Власний питомий опір за температури +20 °С, Ом·м	2×10^3	0,68	10^{10}	$2,9 \times 10^{-3}$
Рухливість електронів при 300 К, м ² /(В·с)	0,14	0,39	–	18
Рухливість дірок при 300 К, м ² /(В·с)	0,05	0,19	$0,2 \times 10^{-4}$	0,12
Ширина забороненої зони за кімнатної температури, еВ	1,12	0,7	1,9	0,35

4.7. Напівпровідникові хімічні сполуки

Серед таких сполук найбільший науковий і практичний інтерес становлять *бінарні сполуки* ($A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ та ін.), які є найважливішими матеріалами напівпровідникової електроніки й оптоелектронних пристроїв. Сучасні технології напівпровідників використовують також потрійні та більш складні хімічні сполуки. Треба також зазначити, що більшість алмазоподібних напівпровідників, що мають подібні властивості, утворюють між собою ізовалентні *тверді розчини*. У них шляхом зміни складу сполуки можна плавно й у досить широких межах керувати найважливішими властивостями напівпровідників, зокрема шириною забороненої зони та рухливістю носіїв заряду. Це відкриває додаткові можливості для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів, дає змогу досягти кращого узгодження фізичних характеристик різних компонентів електронної апаратури.

4.7.1. Складні напівпровідники типу $A^{III}B^V$

Насамперед це приблизно 30 кристалів сполук металів III групи Періодичної системи хімічних елементів (бор, індій, галій, алюміній тощо) з елементами V групи (нітроген (азот), фосфор, арсен, стибій

тощо). Це найважливіші сполуки серед бінарних напівпровідників. Вони є найближчими електронними аналогами кремнію та германію. Напівпровідники групи $A^{III}B^V$ зазвичай класифікують за металоїдним елементом. Розрізняють *нітриди*, *фосфіди*, *арсеніди* й *антимоніди*.

Крім нітридів, усі сполуки $A^{III}B^V$ кристалізуються в ґратці цинкової обманки кубічного типу сфалериту (для нітридів характерна структура гексагонального типу вюрциту) (рис. 4.29). У ґратках цих типів кожний атом елемента III групи знаходиться в тетраедричному оточенні чотирьох атомів елемента V групи й навпаки. Структура сфалериту, на відміну від структури алмаза, не має центра симетрії. Ця особливість приводить до різниці в фізичних властивостях поверхонь, що теоретично цілком складені з однотипних атомів або III, або V групи. Різне поведіння граней виявляється під час травлення, окиснення та вирощування кристалів.

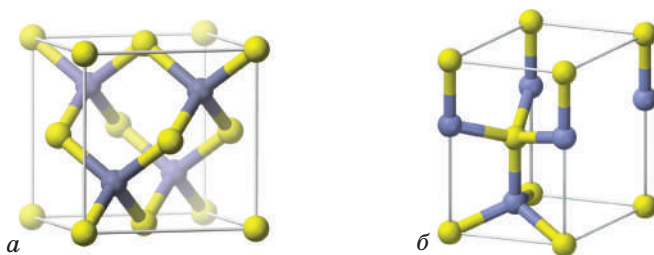


Рис. 4.29. Структура кристалічної ґратки: а) типу сфалериту, б) типу вюрциту

Сполуки $A^{III}B^V$ мають ковалентно-йонний характер хімічного зв'язку (частка йонної складової досягає 15–20 %). Іноді хімічний зв'язок у цих сполуках трактується як особливий тип хімічного зв'язку, названого донорно-акцепторним зв'язком. Така назва зумовлена тим, що із чотирьох ковалентних зв'язків, якими кожний атом вбудовується в ґратку, три утворюються усупільненням валентних електронів атомів A^{III} і B^V , а четвертий зв'язок здійснюється неподіленою парою валентних електронів атомів B^V . Утворення зв'язку такого типу відповідає енергетично вигідному переходу електронів від атома B^V в енергетичний стан, спільний для донора (атома B^V) та акцептора (атома A^{III}).

Галій арсенід ($GaAs$) — один із найперспективніших напівпровідникових матеріалів. Величина його забороненої зони: $\Delta E = 1,424$ еВ, під час збереження високої рухливості електронів $0,95$ м²/(В·с), майже вдвічі більша, ніж у Ge. Через це GaAs застосовують у виробництві напівпровідникових діодів і транзисторів, які працюють при високих частотах і робочих температурах (+400 °С).

GaAs — темно-сіра речовина з фіолетовим відтінком, щільність: $D = 5,4$ г/см³, $t_{пл} = 1238$ °С. Він стійкий на повітрі щодо водяної пари та кисню. Під час нагрівання вище 873 К речовина починає окиснюватися. У вакуумі за температури 1073 К відбувається термічна дисоціація GaAs на компоненти.

Вплив домішок на властивості GaAs детально досліджено. Донорна й акцепторна дія домішок підпадає під загальну закономірність: Zn, Cd діють як акцептори; S, Se, Te — як донори. Краще за інші речовини в GaAs розчиняються Zn і Se з утворенням твердих розчинів заміщення. Вони дають максимальну концентрацію носіїв заряду, відповідно, $n = 1020 \text{ см}^{-3}$ і $n = 1019 \text{ см}^{-3}$. Додавання більшої кількості цих елементів не збільшує концентрацію носіїв, що вказує на досягнення граничної розчинності.

З GaAs виготовляють площинні випрямлячі й тунельні діоди. Фотоелементи з GaAs мають ККД $\cong 7\%$.

Індій арсенід (InAs) належить до цікавих напівпровідникових сполук завдяки високій рухливості носіїв струму. Основний спосіб отримання InAs — синтез із простих речовин у відкачених і запаєних кварцових ампулах. У точці плавлення спостерігається термічна дисоціація InAs, пружність парів становить 0,33 атм. Тому синтез, очищення зонним плавленням і вирощування монокристалів InAs за методом Чохральського здійснюють за таких умов, що й для GaAs.

InAs — темно-сіра речовина з металічним блиском, $t_{\text{пл}} = 942^\circ\text{C}$, щільність: $D = 5,68 \text{ г/см}^3$. За нормальних умов він стійкий на повітрі, окиснення починається вище за температури 723 К. Його монокристали мають електронну провідність, що обумовлено домішками S і Se у вихідному арсеніді. Як і в інших сполуках $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, в InAs елементи II групи функціонують як акцептори, VI — як донори. Елементи IV групи в InAs діють як донори. Домішки дуже впливають на властивості InAs навіть за низьких температур. За температури 300 К рухливість електронів — $3,3 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість «дірок» — $0,046 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, ширина забороненої зони: $\Delta E = 0,36 \text{ еВ}$.

На основі InAs було отримано *p-n*-переходи, які дають значні за величиною значення фотоЕРС. InAs застосовують для виготовлення надвисокочастотних транзисторів, які можуть працювати за низьких температур. Крім того, індій арсенід є незамінним матеріалом для термоелектрогенераторів та ГЧ-детекторів.

Галій фосфід (GaP) отримати складно. Вдалося виростити кристали розміром $12 \times 1,5 \times 1,0 \text{ мм}$ із розчину Ga. GaP — помаранчеві прозорі кристали зі щільністю у твердому стані: $D = 4,14 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}} = 1467^\circ\text{C}$. Він має «діркову» провідність. Легування сіркою переводить GaP до *n*-типу провідності. Робоча температура *p-n*-переходу дорівнює $+500^\circ\text{C}$. Ширина забороненої зони: $\Delta E = 2,26 \text{ еВ}$ за температури 300 К; рухливість електронів — $0,019 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ і «дірок» — $0,012 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Унаслідок значної ширини забороненої зони випромінювальні переходи в GaP зосереджуються на видимій частині спектра, що визначає основну сферу використання — виробництво світлодіодів. Під час пропускання струму через GaP випромінюється помаранчеве світло. Інтенсивність світла експоненціально зростає з напругою. GaP, легований Zn, має темно-червоне світіння. Монокристали GaP викликають

електролюмінесценцію. Завдяки великій термостійкості це — перспективний матеріал для виготовлення високотемпературних випрямлячів і сонячних батарей.

Індій фосфід (InP) — темно-сіра речовина зі смолистим блиском, щільність у твердому стані: $D = 4,81 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}} = 1070 \text{ }^\circ\text{C}$. На повітрі стійкий, із часом не руйнується і не змінює свій зовнішній вигляд. Під час нагрівання на повітрі вище температури 823 K його кристали поступово втрачають блиск, темнішають і розсипаються. У воді InP не розчиняється, на нього не діє й концентрована нітратна кислота HNO_3 . Найкращим розчинником є хлоридна кислота HCl ; розчини лугів на нього не діють. Властивості: ширина забороненої зони за кімнатної температури: $\Delta E = 1,35 \text{ eV}$; рухливість електронів і «дірок», відповідно, — $0,46 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ і $0,015 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

InP — перспективний матеріал для квантових генераторів. Його ефективність як матеріалу для сонячних батарей вища за ефективність Si, AlSb, CdS. Застосовують для виготовлення поверхнево-дифузійних транзисторів і лазерів.

Індій антимонід (InSb) і **галій антимонід (GaSb)** кристалізуються за структурою сфалериту й мають параметр ґратки, відповідно, $0,64 \text{ Нм}$ і $0,61 \text{ Нм}$. Щільність цих сполук, відповідно, дорівнює $5,77 \text{ г/см}^3$ і $5,61 \text{ г/см}^3$. Індій антимонід плавиться за температури $+525 \text{ }^\circ\text{C}$, а галій антимонід — $+710 \text{ }^\circ\text{C}$. З водяною парою та киснем у звичайних умовах InP і GaSb не взаємодіють, легко реагують із кислотними розчинами з виділенням токсичного стибіну SbH_3 .

InSb синтезують спільним сплавом дуже чистих початкових компонентів у кварцовому реакторі (ампулі), в атмосфері високочистого водню за температур $+700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 5–6 год. Через малу ширину забороненої зони: $\Delta E = 0,18 \text{ eV}$ за температури, нижчої від кімнатної, InSb стає напівпровідником. Рухливість електронів за низьких температур (77 K) перевищує $11 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість «дірок» — $0,091 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Збільшується фотопровідність. Використовують для виготовлення датчиків Холла, оптичних фільтрів, термоелектричних генераторів, фоторезисторів.

Щодо властивостей GaSb: ширина забороненої зони за кімнатної температури: $\Delta E = 0,72 \text{ eV}$; рухливість електронів — $0,4 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; рухливість «дірок» — $0,14 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Галій антимонід дуже чутливий до механічних напружень. Під час дії тиску $4 \times 10^8 \text{ Па}$ його питомий електричний опір збільшується вдвічі. Цю чутливість GaSb до деформацій використовують для виготовлення тензометрів, мікрохвильових детекторів, тунельних діодів.

Багато напівпровідників типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ утворюють між собою неперервний ряд твердих розчинів — потрійних і більш складних сполук ($\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ і т. ін.), що важливо для сучасної електроніки.

4.7.2. Складні напівпровідники типу $A^{IV}B^{IV}$

Силіцій карбід (SiC) — єдина напівпровідникова сполука, утворена елементами-напівпровідниками IV групи Періодичної системи хімічних елементів. SiC має цікаві для напівпровідникової техніки властивості. Існує у двох модифікаціях: кубічній β - SiC , стійкій за температур до $+2100\text{ }^\circ\text{C}$, і гексагональній α - SiC , що утворюється за високих температур (понад $+1750\text{ }^\circ\text{C}$). Останню модифікацію застосовують у різних напівпровідникових приладах.

На практиці для отримання α - SiC користуються високотемпературними процесами кристалізації з парової фази, що проводять за температур вище $+2100\text{ }^\circ\text{C}$. Такі процеси застосовують як для вирощування пластинчастих монокристалів, так і плівок цієї сполуки. В останньому випадку синтез сполуки, як правило, об'єднується з процесом осадження плівки й може проводитися за нижчих температур. Під час отримання пластинчастих монокристалів синтез початкової сполуки у вигляді β - SiC найчастіше проводять окремо, що дає змогу знизити температуру процесу. Подальша високотемпературна сублимація підвищує чистоту утворюваних монокристалів α -модифікації, а також однорідність розподілу в них легувальних домішок.

Силіцій карбід має високу хімічну стійкість. Під час нагрівання на повітрі починає помітно окиснюватися за температур понад $+800\text{ }^\circ\text{C}$. Матеріал стійкий до більшості кислот, крім суміші нітратної, плавикової та ортофосфорної кислот. Проте добре розчиняється в розплавах лугів.

SiC — один із найбільш тугоплавких ($t_{пл} = 2730\text{ }^\circ\text{C}$) і широкозонних ($\Delta E = 2,4\text{--}3,3\text{ eV}$) серед напівпровідникових матеріалів, які широко використовують, що дає змогу створювати на його основі прилади з робочою температурою до $+700\text{ }^\circ\text{C}$, які контролюють високотемпературні процеси в доменних печах, реактивних турбінах тощо. Рухливість носіїв зарядів у SiC низька: для електронів — $0,03\text{--}0,1\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, для «дірок» — $0,006\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Важлива особливість: здатність до люмінесценції у видимій частині спектра. А завдяки високій твердості (не набагато поступається алмазу) SiC використовують для механічного оброблення різних матеріалів. Також рекомендований для серійного випуску випрямних і тунельних діодів, світлодіодів, варисторів (нелінійних опорів).

4.7.3. Складні напівпровідники типу $A^{II}B^{VI}$

Технологія напівпровідникових з'єднань II і VI груп Періодичної системи хімічних елементів не розроблена повністю. Групу цих напівпровідникових матеріалів становлять подвійні сполучення халькогенів із металами II групи (цинк, кадмій, ртуть). **Халькогени** — елементи VI групи головної підгрупи. Оскільки кисень розглядають окремо, то під назвою *халькогени* (у перекладі — речовини, які народжують ґрунт) мають на увазі елементи сульфур (сірка), селен і телур. Сполуки металів із цими елементами (сульфіди, селеніди, телуриди) називають *халькогенідами*.

Хімічний зв'язок халькогенів має змішаний ковалентно-йонний характер. Зі зростанням середньої атомної маси сполук зменшується ширина забороненої зони та знижується температура плавлення, одночасно підвищується рухливість носіїв заряду.

Легкі в технологічному плані сполуки цієї групи мають невисоку температуру плавлення і тиск пари за цієї температури. Їх отримують за допомогою методів, які застосовують під час отримання сполук $A^{III}B^V$. Великі труднощі виникають під час отримання монокристалів таких тугоплавких сполук, як цинк сульфід (ZnS) і кадмій сульфід (CdS). Їхня технологія складається з операцій синтезу початкової сполуки й вирощування монокристалів із парової фази або з розплаву.

Цинк сульфід (ZnS) — білий порошок зі щільністю $3,98\text{--}4,09\text{ г/см}^3$, шириною забороненої зони: $\Delta E = 3,7\text{ еВ}$, рухливістю електронів — $0,14\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, рухливістю дірок — $0,0005\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $t_{\text{пл}} = +1780\text{ }^\circ\text{С}$. При звичайному тиску не плавиться, під тиском 15 МПа (150 атм) плавиться за температури $+1830\text{ }^\circ\text{С}$. У воді не розчиняється, у кислотах розчиняється з утворенням відповідних солей і виділенням гідроген сульфід у H_2S . У присутності слідів міді, кадмію, срібла тощо набуває здатності до люмінесценції.

У природі ZnS трапляється як мінерали сфалериту (цинкова обманка) — основної сировини для отримання цинку та вюрцити, що відрізняється від сфалериту типом кристалічної ґратки. ZnS застосовують для створення люмінофорів багатьох приладів: кольорових кінескопів, рентгенівських трубок, табло, панелей.

Кадмій сульфід (CdS) за звичайних умов є твердою речовиною жовтого кольору, не горить і не розчиняється у воді. У разі нагрівання на повітрі може розкладатися. Щільність: $7,6\text{ г/см}^3$, ширина забороненої зони: $\Delta E = 2,1\text{ еВ}$, рухливістю електронів — $0,02\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, рухливістю «дірок» — $0,01\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $t_{\text{пл}} = +1750\text{ }^\circ\text{С}$.

CdS застосовують у фоторезисторах, при виготовленні люмінофорів для кінескопів, в оптоелектроніці, лазерах, світлодіодах, QD-LED дисплеях тощо.

4.7.4. Складні напівпровідники типу $A^{IV}B^{VI}$

Це халькогеніди елементів IV групи. Типові представники — плюмбум сульфід (PbS), плюмбум телурид (PbTe), плюмбум селенід (PbSe) тощо. Ці матеріали мають гранецентровану кубічну ґратку типу NaCl чи слабо змінені структури на її основі. У них вузька заборонена зона, і їх використовують як джерела та приймачі ІЧ-випромінювання. Власні точкові дефекти структури в напівпровідників типу $A^{IV}B^{VI}$ мають низьку енергію йонізації та проявляють електричну активність. Акцепторними домішками є метали I групи Періодичної системи (срібло, мідь, калій, натрій). Донорними домішками є елементи II групи. Халькогеніди свин-

Розділ 4. Напівпровідники

цю у воді не розчиняються, на повітрі окиснюються повільно (табл. 4.3). За низьких температур з'являється випромінювальна рекомбінація носіїв заряду, що дає змогу використовувати халькогеніди свинцю для створення лазерів інфрачервоного діапазону.

Таблиця 4.3

Основні властивості халькогенідів свинцю

Властивості	Плюмбум сульфід PbS	Плюмбум селенід PbSe	Плюмбум телурид PbTe
Щільність за 20 °С, г/м ³	7,5	8,15	8,16
Температура плавлення, °С	1114	1076	917
Температура кипіння, °С	1281	802	697
Ширина забороненої зони за кімнатної температури, eV	0,37	0,27	0,32
Рухливість електронів за 300 К, м ² /(В·с)	0,04	0,12	0,18
Рухливість дірок за 300 К, м ² /(В·с)	0,07	0,1	0,09

4.7.5. Оксидні напівпровідники

Оксидні напівпровідники — це бінарні хімічні сполуки, одним із компонентів яких є метал, а іншим — кисень (оксиген).

До цього класу напівпровідникових матеріалів належать такі речовини, як купрум(І) оксид (Cu_2O), цинк оксид (ZnO), титан(IV) оксид (TiO_2), нікель(IV) оксид (NiO_2), ферум(III) оксид (Fe_2O_3) тощо. Напівпровідникові властивості мають не всі оксиди перехідних металів, а тільки ті, у яких йон металу належить до елементів перехідного ряду Періодичної таблиці хімічних елементів (Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti). Електропровідність оксидних напівпровідників зумовлена наявністю в йонів того самого металу не менше двох різновалентних станів і пов'язана з обміном електронами між цими йонами. Величина питомого опору оксидних напівпровідників знаходиться в межах 10^5 – 10^9 Ом·м. Присутність домішок істотно впливає на їхні електричні властивості.

Технологія отримання оксидних напівпровідникових матеріалів відносно проста. Зазвичай ці матеріали застосовують як полікристали або виготовляють як спечені за керамічною технологією матеріали (табл. 4.4).

Купрум(І) оксид (Cu_2O) — типовий напівпровідниковий матеріал жовтого або червоного кольору з питомим опором до 10^7 Ом·м, величина якого залежить від термооброблення. Має «дірковий» тип провідності за рахунок надлишку кисню відносно стехіометричного складу.

Цинк(II) оксид (ZnO) застосовують у радіоелектроніці для виготовлення люмінофорів синьо-зеленого кольору світіння. На основі порошкоподібного ZnO отримують комплексні сполуки, які використовують для виготовлення варисторів.

4.7. Напівпровідникові хімічні сполуки

Титан(IV) оксид (TiO_2) — безбарвна кристалічна речовина, яка жовтіє під час нагрівання. У роздробленому стані — білий порошок. Майже не розчиняється у воді й мінеральних кислотах, крім плавикової та концентрованої сульфатної.

Ферум(III) оксид (Fe_2O_3) — оксид червоно-коричневого кольору з великою перевагою основних властивостей. Термічно стійкий до температур вище температури випаровування (+1987 °C). Утворюється під час згорання заліза на повітрі. Не реагує з водою. Повільно реагує з кислотами та лугами.

Нікель(IV) оксид (NiO_2) — неорганічна бінарна сполука, у звичайних умовах — зеленуваті кристали. У природі трапляється у вигляді мінералу бунзеніту. Оксид проявляє слабкі амфотерні властивості. Його використовують як каталізатор і зелений пігмент.

Таблиця 4.4

Деякі властивості оксидних напівпровідників

Властивості	Купрум(I) оксид Cu_2O	Цинк(II) оксид ZnO	Ферум(III) оксид Fe_2O_3	Титан(IV) оксид TiO_2	Нікель(IV) оксид NiO_2
Температура плавлення, °C	1230	1975	1500	1870	1700
Ширина забороненої зони за кімнатної температури, eВ	1,9	3,2	2,2	3,0	1,2

Практичне застосування отримали суміші оксидів, на основі яких виготовляють терморезистори, варистори, випрямлячі й інші прилади. Основними матеріалами, які використовують при виготовленні сенсорів (датчиків), є напівпровідникові оксиди металів (SnO_2 , ZnO , TiO_2 тощо). Полікристалічні напівпровідники — станум(IV) оксид (SnO_2), цинк(II) оксид (ZnO), індій(III) оксид (In_2O_3) — широко використовують як активні елементи газових сенсорів. Поліпшення сенсорних властивостей оксидних напівпровідників: чутливості, селективності та стабільності досягають шляхом легування їх різними металами чи оксидами металів або нанесенням на їхню поверхню частинок дорогоцінних металів. Поверхнєве легування платиною методом лазерної абляції істотно поліпшує чутливість щодо водню і є перспективним для створення високочутливих газових сенсорів резистивного типу. Напівпровідникові резистивні газові датчики привертають підвищену увагу через низьку вартість і простоту виробництва, широкий спектр детектованих газів, зручність використання і можливість роботи за високої температури.

4.7.6. Органічні напівпровідники

Органічні напівпровідники — тверді речовини, що мають (або набувають під впливом зовнішніх чинників) електронну або «діркову» про-

відність. Носії заряду в органічних напівпровідниках утворюються в результаті збудження електронів, делокалізованих за системою сполучених зв'язків. Щоб отримати підвищену провідність в органічних сполуках, тобто властивості напівпровідників, потрібно зменшити заборонену зону між орбіталями. Цього можна досягнути, наприклад, поєднанням гетероатомів із парою валентних електронів із протилежними спінами (наприклад, поліацетилену, поліаніліну або поліароматиків). Зменшена зона полегшує електронам переходи між зонами провідності та валентною зоною, що наближає речовину до властивостей напівпровідника.

До органічних напівпровідників належать органічні барвники (наприклад, метиленовий голубий, фталоціаніни), ароматичні сполуки (нафтаден, антрацен, віолантрен та ін.), полімери зі сполученими зв'язками, деякі природні пігменти (хлорофіл, β -каротин тощо), молекулярні комплекси з перенесенням заряду, а також йон-радикальні солі.

Органічні напівпровідники існують як монокристали, полікристалічні або аморфні порошки й півки. Величина питомого опору органічних напівпровідників за кімнатної температури лежить у діапазоні від 10^{18} Ом \cdot см (нафтаден, антрацен) до 10^{-2} Ом \cdot см (йон-радикальні солі). Зони провідності органічних напівпровідників вузькі ($\sim 0,1$ еВ), а тому рухливість носіїв заряду в них, як правило, мала ($\sim 0,0001$ м²/(В \cdot с)).

Найбільш електропровідними органічними напівпровідниками є йон-радикальні солі на основі аніон-радикала тетраціанхінодиметану. Вони виявляють електропровідність металічного характеру. В органічних напівпровідниках із низькою електропровідністю спостерігається явище фотопровідності — поглинання світла викликає електронне збудження молекул, які можуть мігрувати по кристалу у вигляді екситонів.

Разом із зонним механізмом електропровідності в органічних напівпровідниках здійснюється стрибковий механізм. У кристалах йон-радикальних солей міжмолекулярна взаємодія анізотропна, що призводить до високої анізотропії оптичних та електричних властивостей і дає змогу розглядати цей клас органічних напівпровідників як квазіодновимірні системи.

Органічні тверді напівпровідникові матеріали можна поділити на п'ять груп: молекулярні кристали, молекулярні комплекси, металоорганічні комплекси, полімерні напівпровідники й пігменти.

Молекулярні кристали — поліциклічні низькомолекулярні ароматичні сполуки, відмінними ознаками яких є їхня кристалічність і наявність ароматичних кілець із системою сполучених подвійних зв'язків. До таких матеріалів належать антрацен, нафтаден, фенатрен, перилен, коронен, віолантрен і фталоціаніни. Речовини цього класу мають переважно «діркову» провідність і характеризуються енергією активації порядку 1–3 еВ, низькою рухливістю носіїв заряду $0,5$ – 1 м²/(В \cdot с) і питомим опором від 7 до 10^{15} Ом \cdot см.

Молекулярні комплекси — поліциклічні низькомолекулярні сполуки, що характеризуються електронною взаємодією між молекулами речовини. Молекулярні комплекси мають, як правило, значно більшу електропровідність, ніж молекулярні кристали, і є сполуками донорно-акцепторного типу. Одна молекула такої речовини здатна приєднувати електрон, а друга — його віддавати. Тому такі сполуки називають *комплексами з передаванням заряду*.

Металоорганічні комплекси — низькомолекулярні речовини, у центрі молекули яких є атом металу. Прикладом може бути купрум фталоціанін. Такі матеріали мають енергію активації носіїв заряду понад 1 eВ і відрізняються їх високою рухливістю — $10 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Основними носіями є «дірки».

Полімерні напівпровідники — матеріали, відмінними ознаками яких є довгі ланцюги сполучення в макромолекулах і складніша фізико-хімічна будова порівняно з низькомолекулярними. З подовженням ланцюгового сполучення підвищується електропровідність і знижується енергія активації.

Пігменти — барвники, що мають напівпровідникові властивості, наприклад індиго, еозин, пінаціанол, радофлавін, радамін, трипафлавін, а також природні пігменти: хлорофіл, каротин тощо. Серед пігментів трапляються як електронні, так і «діркові» напівпровідники: катіонні пігменти мають провідність *n*-типу, аніонні — *p*-типу. Для пігментів характерна висока енергія забороненої зони й низька електропровідність.

Основним критерієм використання органічних напівпровідникових матеріалів є їхня чистота. Тому питання очищення цих матеріалів від домішок дуже важливе. Зазвичай для очищення органічних речовин використовують кристалізацію з розчину, сублімацію, хроматографію з розчину або пари та зонне очищення. Як вихідні матеріали для виготовлення різних приладів застосовують монокристалічні та полікристалічні зразки органічних напівпровідників.

Органічні напівпровідники застосовують в окремих сферах електроніки й радіотехніки. Використовують при виготовленні терморезисторів із високою температурною стабільністю, п'єзоелементів, резонансних контурів в інтегральних схемах, радіаційних дозиметрів, детекторів ГЧ-випромінювання, фоторезисторів, квантових генераторів, транзисторів і фотолюмінесцентних приладів. До переваг різних типів приладів та інтегральних схем, виготовлених на основі органічних напівпровідникових матеріалів, належить висока механічна й кліматична стійкість в умовах тропічного клімату та при підвищених вібраційних та ударних навантаженнях.

На основі органічних напівпровідників нині реалізовано такі перспективні прилади для відображення інформації, як гнучкі плоскі екрани, які, порівняно з традиційними кремнієвими пристроями, коштують

дешевше, багато процесів їхнього виготовлення виконують за кімнатних температур за більш простою технологією.

Органічні напівпровідники застосовують як світлочутливі матеріали (наприклад, для процесів запису інформації) у мікроелектроніці та для виготовлення різних датчиків. З органічними напівпровідниками, зокрема з йон-радикальними солями, пов'язана перспектива створення надпровідників із високою температурою переходів.

4.8. Оптичні й фотоелектричні явища в напівпровідниках

У сучасній електронній техніці широко використовують напівпровідникові прилади, дія яких ґрунтується на принципах фотоелектричного перетворення сигналів. В основі одного із цих принципів є зміна електрофізичних властивостей речовини в результаті поглинання світлової енергії (квантів світла). При цьому змінюється провідність або виникає ЕРС, у результаті змінюється струм у колі, у яке включено фоточутливий елемент. Другий принцип пов'язаний із генерацією випромінювання в речовині, коли прикладають напругу й через світловипромінювальний елемент тече струм. Зазначені принципи є науковою основою *оптоелектроніки* — нового науково-технічного напрямку, у якому для передавання, оброблення та збереження інформації використовують як електричні, так і оптичні засоби й методи.

Явищем фотопровідності називають збільшення електропровідності напівпровідника при поглинанні електромагнітного випромінювання — видимого, інфрачервоного, ультрафіолетового або рентгенівського.

Під час освітлення напівпровідника в ньому відбувається генерація електронно-«діркових» пар за рахунок переходу електронів із валентної зони в зону провідності. Унаслідок цього провідність напівпровідника зростає.

Під час освітлення *p-n*-переходу та ділянок напівпровідників, що прилягають до нього, між ними виникає електрорушійна сила (фотоЕРС). Цей ефект називають *фотогальванічним*.

Розглянемо *p-n*-структуру (рис. 4.30), у якій *p-n*-перехід і частини *p*-області та *n*-області, які безпосередньо прилягають до нього, піддають дії світла. Потік фотонів, що падає на напівпровідник, створює в ньому певну кількість рухливих носіїв зарядів — електронів і «дірок». Частина з них, дифундуючи до переходу, досягає його межі, не встигнувши рекомбінувати. На межі переходу електронно-«діркові» пари розділяються електричним полем переходу. Прискорювальне поле *p-n*-переходу викидає неосновних носіїв за перехід: «дірки» в *p*-область, а електрони — у *n*-область. Основних носіїв зарядів поле переходу затримує у своїй області. У результаті відбувається нагромадження некомпенсованих зарядів, і на *p-n*-переході створюється додаткова різниця потенціалів, названа *фотоелектрорушійною силою* (фотоЕРС). Величина фотоЕРС залежить від інтенсивності світлового потоку й зазвичай становить

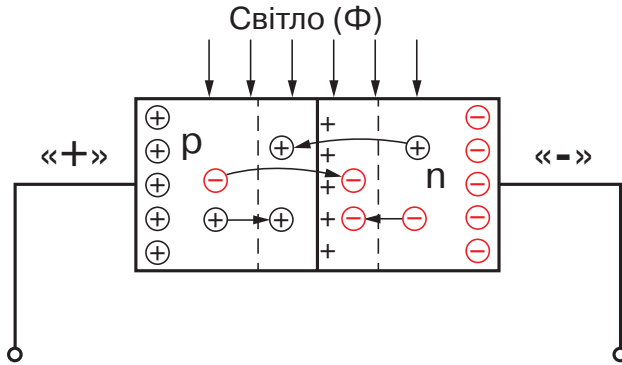


Рис. 4.30. Електронно-«дірковий» перехід під дією світла

десяті частини вольтя. Якщо коло p - n -структури при цьому замкнути, то в ньому під дією фотоЕРС виникає електричний струм, сила якого залежить від величини світлового потоку й опору підключеного навантаження. Фотогальванічний ефект використовують у вентилях фотоелементах, фотодіодах і фототранзисторах, виготовлених на основі селену, германію, кремнію.

Фоторезистори — це напівпровідникові прилади, електричний опір яких різко змінюється під дією світлового випромінювання, яке падає на них. Фоторезистор (рис. 4.31) — це скляна пластинка 1, на яку нанесено тонкий шар напівпровідника 2, покрита прозорим лаком для захисту від механічних пошкоджень і вологи. По краях пластинки виведено два металеві електроди 3. Фоторезистор поміщають у пластмасовий корпус із двома стрижнями, до яких приєднують електроди.

Якщо на фоторезистор діяти потоком оптичних випромінювань, то опір його різко зменшується, що пояснюється внутрішнім фотоелектричним ефектом — перерозподілом електронів у напівпровіднику при поглинанні випромінювань. Зміна опору зумовлює зміну струму в колі фоторезистора при поданні напруги від зовнішнього джерела.

Промисловість випускає фоторезистори для вимірювання видимих, інфрачервоних, рентгенівських і гамма-випромінювань. Найширше

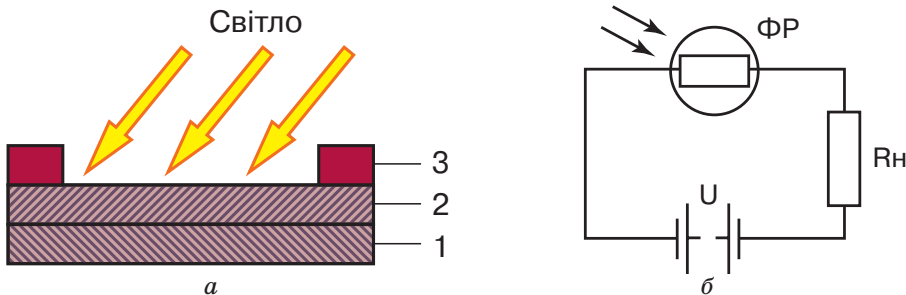


Рис. 4.31. Фоторезистор: а) принцип будови; б) схема включення; 1 — скляна пластинка; 2 — шар напівпровідника; 3 — металеві електроди

фоторезистори застосовують в автоматиці для видимих випромінювань, а також у схемах фотореле, пристроях контролю рівня, контролю полум'я теплогенераторів, газоаналізаторах тощо. Для реєстрації ІЧ-випромінювання використовують Ge (чистий або легований домішками Au, Cu, Zn), а також Si, PbS, PbSe, PbTe, InSb, InAs, які часто охолоджують до низьких температур.

Нові типи фоторезисторів позначають літерами СФ. Наприклад, **СФ2-8** означає: опір fotocутливий на базі кадмію сульфідату (цифра 2), 8-го заводського розроблення. Цифра 3 після літер СФ означає, що як вихідний матеріал було використано кадмій селенід, цифра 4 — плюмбум селенід.

Фотодіод — фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, fotocутливий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода. Фотодіод має переваги напівпровідникових приладів (малі маса та розміри, великий термін використання, низька напруга живлення, економічність) із вищою чутливістю порівняно з електровакуумними фотоелементами й фоторезисторами. Будова фотодіода аналогічна будові звичайного напівпровідникового діода. Конструкцію типового фотодіода зображено на *рисунку 4.32, а*. Фотодіод виконано так, що його *p-n*-перехід одним боком повернений до скляного віконця, через яке надходить світло, і захищений від впливу світла з інших боків.

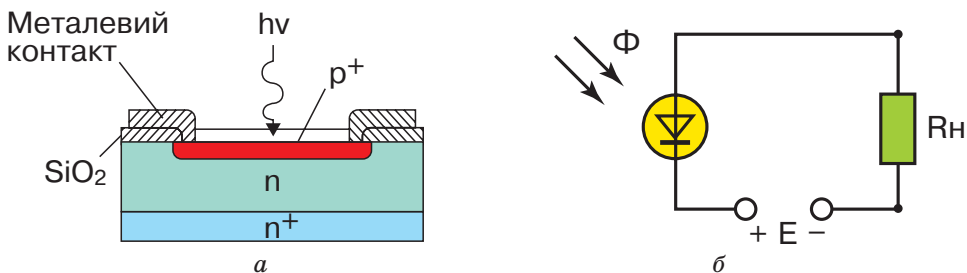


Рис. 4.32. Фотодіод: а) принцип будови; б) схема включення

Напруга джерела живлення прикладена до фотодіода в зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлений, у колі проходить зворотний струм малої величини. При освітленні фотодіода з'являється додаткова кількість електронів і «дірок», унаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв заряду: електронів із *p*-області в *n*-область і «дірок» — у зворотному напрямку. Це приводить до збільшення струму в колі. При правильно підбраному опорі навантаження R_n і напрузі джерела живлення E цей струм залежатиме тільки від освітленості приладу, а зниження напруги на опорі можна розглядати як корисний сигнал, що впливає на інші елементи схеми.

Фотодіоди, як і приймачі променистої енергії інших типів, використовують у фотометрії, фотокolorиметрії, для контролю джерел світла, вимірювання інтенсивності висвітлення, прозорості середовища, реєстра-

ції ядерних частинок, автоматичного регулювання та контролю температури й інших параметрів, зміна яких супроводжується зміною оптичних властивостей чи речовини середовища. Фотодіоди широко застосовують також у пристроях сучасних ЕОМ, в оптоелектронних схемах.

Фотодіод, який працює в генераторному режимі, називають **фотоелементом**. Перші вентильні елементи з оксиду міді було розроблено в 1926 р. Пізніше значного поширення набули селенові фотоелементи. Нині превалюють кремнієві фотоелементи, кожний з яких може забезпечити фотоЕРС у 0,4–0,5 В. Такі фотоелементи з'єднують послідовно й паралельно в сонячні батареї, які працюють із ККД до 20 %.

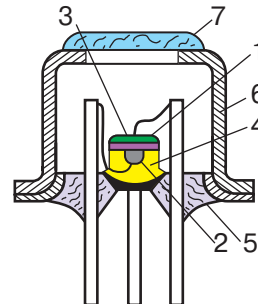
Сонячні батареї — це сукупність електрично з'єднаних фотодіодів для перетворення частини електромагнітної енергії сонячних променів на постійний електричний струм. Виробництво сонячних батарей розвивається швидкими темпами. Вони бувають різних розмірів і технологій виготовлення: від гігантських галявин на електростанціях до маленьких, які вбудовані в калькулятори. Сонячні кремнієві батареї — це основні джерела живлення космічних супутників і станцій, автоматичних метеостанцій та інших пристроїв і систем, що працюють в автономному режимі. За останні роки застосування сонячних батарей стало загальним: на електростанціях, для електропостачання окремих житлових будівель, заряджання акумуляторів різної побутової техніки, мобільних телефонів, ноутбуків.

Фототранзистор — оптоелектронний напівпровідниковий прилад, варіант біполярного транзистора. Відрізняється від класичного варіанта тим, що область бази доступна для світлового опромінення, за рахунок чого з'являється можливість управляти посиленням електричного струму за допомогою оптичного випромінювання.

Конструкцію одного з типових фототранзисторів (типу ФТ-1) подано на *рисунок 4.33*. Прилад складається з *n*-Ge пластини 1, у яку по обидва боки впаяно стрижні індію, що утворюють емітер 2 і колектор 3. Емітер і колектор за допомогою тонких виводів з'єднані з провідниками-ніжками, ізольованими від корпусу скляними ізоляторами 5. Пластина германію припаяна олов'яним кільцем до кристалотримача 4, який, будучи базовим виводом, також припаяний до ніжки. Увесь фототранзистор розміщений у герметичному корпусі 6, у якому є круглий отвір, закритий скляною лінзою 7.

Рис. 4.33. Будова фототранзистора:

- 1 — *n*-Ge пластина; 2 — емітер;
- 3 — колектор;
- 4 — кристалотримач;
- 5 — скляний ізолятор;
- 6 — герметичний корпус;
- 7 — скляна лінза



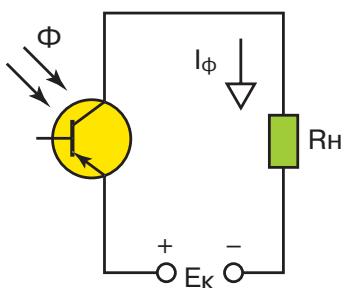


Рис. 4.34. Схема двополюсного включення фототранзистора

Двополюсну схему включення фототранзистора показано на рисунку 4.34. При такому включенні вивід бази фототранзистора залишається вільним, тобто струм бази $I_б = 0$. При освітленні базової області в ній з'являються вільні електрони й «дірки». Навіть при невеликому світловому потоці, що падає на базу, струм колектора виявляється досить великим, що свідчить про високу чутливість фототранзистора. Фототранзистори використовують як чутливі елементи в різноманітних автоматичних пристроях, кінофотоапаратурі, у пристроях вводу й виводу інформації в обчислювальній техніці, для реєстрації УФ- й ІФ-випромінювання. Крім того, їх успішно застосовують в оптоелектроніці.

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. За які характерні властивості матеріали назвали напівпровідниками?
2. Назвіть діапазон питомого опору напівпровідників.
3. Що означають поняття прості та складні напівпровідники? Наведіть приклади.
4. Які види носіїв заряду є в напівпровідниках?
5. Що таке провідність напівпровідників *n*-типу? *p*-типу?
6. Охарактеризуйте відмінність між власною та домішковою провідністю напівпровідників.
7. Розкажіть про утворення *p-n*-переходу в напівпровідниках.
8. Накресліть вольт-амперну характеристику для *p-n*-переходу.
9. Які органічні напівпровідники вам відомі?
10. Опишіть явище фотопровідності.
11. Що вам відомо про будову фоторезистора?
12. Виконайте тестове завдання. Оберіть графік залежності опору напівпровідників від температури
А зростає повільно **В** зменшується
Б зростає стрибкоподібно **Г** не змінюється
13. Установіть відповідність:

Метал або сплав

Застосування

- | | |
|---|--|
| 1 Власна провідність напівпровідників — | А спрямований рух електронів та «дірок» |
| 2 Донорна домішка дає змогу отримувати | Б електронно-«діркова» |
| 3 Акцепторна домішка дає змогу отримувати | В напівпровідники <i>p</i> -типу |
| 4 Електричний струм у напівпровідниках — це | Г напівпровідники <i>n</i> -типу |
14. Розв'яжіть задачу.

За даними параметрами діода: питомий опір $\rho = 0,9$ Ом·см; площа поперечного перерізу $S = 0,012$ см²; довжина бази $l = 0,15$ см — знайдіть спад напруги на квазі-нейтральному об'ємі бази при проходженні струму величиною 10 мА.

Розділ 5

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

5.1. Основні характеристики магнітних матеріалів

Магнітними називають матеріали, які здатні накопичувати, зберігати й трансформувати магнітну енергію; їх застосовують в електротехніці з урахуванням їхніх магнітних властивостей. Такі властивості, як відомо, мають метали: залізо, нікель, кобальт, а також їхні сплави.

Кожна речовина, розміщена в магнітному полі, тією чи іншою мірою набуває магнітного моменту. У магнітній речовині магнітні моменти окремих атомів упорядковані; спонтанний магнітний момент відмінний від нуля. Намагнічування речовини описують такі характеристики: магнітна індукція B , напруженість магнітного поля H , магнітна проникність μ тощо.

Вектор магнітної індукції B характеризує інтенсивність і напрямок магнітного поля; кількісно дорівнює силі, з якою магнітне поле взаємодіє з одиничним елементом струму, розташованим перпендикулярно до вектора індукції; вимірюється в теслах (Тл); залежить від властивостей середовища.

При дослідженні магнітних полів і розрахунку магнітних пристроїв користуються розрахунковою величиною — *напруженістю магнітного поля H* , що кількісно дорівнює індукції магнітного поля у вакуумі; вимірюється в амперах на метр (А/м); не залежить від магнітних властивостей середовища.

Відношення магнітної індукції до напруженості магнітного поля ($B/H = \mu_{\text{абс}}$) називають *абсолютною магнітною проникністю середовища*. Через магнітну постійну проникність здійснюється зв'язок між відносною та абсолютною магнітною проникністю. Відносна магнітна проникність дорівнює:

$$\mu = \frac{\mu_{\text{абс}}}{\mu_0},$$

де μ_0 — магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м).

Розгляньмо процес намагнічування магнітного матеріалу під дією зовнішнього магнітного поля. Криву, що виражає залежність між H і B , називають *початковою кривою намагнічування*. Вона є важливою характеристикою магнітних матеріалів (рис. 5.1, с. 182).

В області дуже слабких магнітних полів (початок кривих) магнітна індукція зростає лінійно зі зростанням напруженості поля, магнітна проникність залишається постійною; це так звана *початкова магнітна проникність μ_n* , яка характеризує можливість використання матеріалу в слабких магнітних полях у техніці слабких струмів.

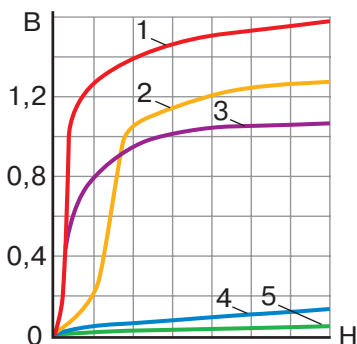


Рис. 5.1. Залежність магнітної індукції від напруженості зовнішнього магнітного поля: 1 — залізо особливо чисте; 2 — залізо чисте (99,98 % Fe); 3 — пермалой (78 % Ni); 4 — нікель, 5 — сплав залізо-нікель (26 % Ni)

В області середніх полів магнітна проникність різко зростає і проходить максимум. **Максимальна магнітна проникність μ_{max}** визначає верхню межу використання матеріалу.

В області сильних полів зростання магнітної індукції відбувається дуже сповільнено по пологій прямій — настає насичення.

Розгляньмо хід залежності намагнічування від напруженості зовнішнього магнітного поля. Припустимо, що у вихідному стані зразок матеріалу повністю розмагнічений, тоді його робоча точка знаходиться на початку координат площини $H-B$. За зростання напруженості магнітного поля H спостерігається зростання індукції B . Після певного моменту індукція зростає слабко, оскільки можливості намагнічування матеріалу вичерпані. При певному значенні напруженості магнітного поля намагніченість зразка досягає максимального значення — магнітного насичення $B_{нас}$ (червона крива на графіку) (рис. 5.2).

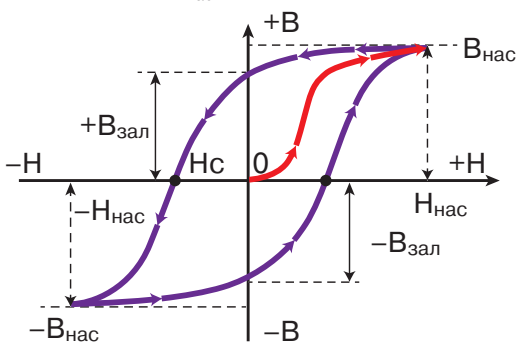


Рис. 5.2. Графік намагнічування й розмагнічування речовини

Лінію, по якій переміщується робоча точка намагніченого матеріалу після зняття зовнішнього поля, називають **кривою повернення** (ліва синя крива на графіку). Траєкторії кривих намагнічування (червона) і розмагнічування (синя) не збігаються. Це явище називають **гістерезисом** (запізненням, відставанням зміни магнітної індукції B від зміни напруженості поля H). У місцях перетину синьої кривої з осями координат визначають характерну точку зі значенням індукції $B_{зал}$ — **залишкова індукція**. Це намагніченість (індукція), яку має зразок після зняття зовнішнього магнітного поля. Щоб зняти цей залишковий магнітний

5.1. Основні характеристики магнітних матеріалів

момент, необхідно докласти поле з протилежним знаком ($-H$). Величину напруженості магнітного поля, яка необхідна для повного розмагнічування матеріалу, тобто для зміни магнітної індукції від залишкової до нуля, називають *коерцитивною силою* H_c .

Під час подальшого збільшення магнітного поля відбудеться перемагнічування зразка в протилежному напрямку. При певному значенні напруженості поля настає насичення матеріалу, але вже протилежного знака.

Під час зміни напруженості магнітного поля від $-H_{\text{нас}}$ до $+H_{\text{нас}}$ залежність індукції B від напруженості поля H зображено ще однією синьою кривою (праворуч). Сині криві утворюють *петлю гістерезису* — це замкнена крива зміни магнітного моменту зразка під дією періодичної зміни напруженості магнітного поля.

Під час розмагнічування частина магнітної енергії виводиться з матеріалу. Різниця цих енергій визначає незворотні втрати енергії на перемагнічування (на гістерезис). За площею петлі гістерезису можна визначати магнітні втрати, тобто втрати енергії зовнішнього магнітного поля, які виявляються в нагріванні магнітного матеріалу в процесі перемагнічування. Що більша площа петлі гістерезису, то більші магнітні втрати.

Причинами виникнення і складовими втрат є:

- втрати на гістерезис P_r ;
- втрати на вихрові струми P_v ;
- додаткові втрати P_d .

Найістотнішими видами втрат є втрати на гістерезис і вихрові струми. Під час перемагнічування відбувається зсув між доменів та обертання магнітних моментів, для чого потрібні витрати енергії зовнішнього поля. Це і є втрати на гістерезис, величина яких пропорційна до частоти зовнішнього магнітного поля. Втрати на вихрові струми, що виникають у провідникових матеріалах, поміщених у змінне магнітне поле, пов'язані з нагріванням матеріалу відповідно до закону Джоуля–Ленца. Величина втрат на вихрові струми пропорційна до квадрата частоти зовнішнього магнітного поля.

Повні втрати визначають сумою всіх втрат у магнітному матеріалі, тобто:

$$P_{\Sigma} = P_r + P_v + P_d.$$

Ще одна властивість, притаманна магнітним матеріалам, — *магнітострикція* (від латин. *strictio* — стиск, натягування) — явище, яке полягає в тому, що при зміні стану намагніченості тіла його об'єм і лінійні розміри змінюються. Ефект (відкритий Джоулем у 1842 р.) викликаний зміною взаємозв'язків між атомами в кристалічній ґратці. Зміна форми тіла може виявлятися, наприклад, у розтягненні, стисканні, зміні об'єму, що залежить як від діючого магнітного поля, так і від кристалічної структури тіла. Найбільші зміни розмірів зазвичай спостерігають у сильномагнітних матеріалів.

За магнітними властивостями електротехнічні матеріали поділяють на дві групи:

- слабомагнітні — діамагнетики й парамагнетики;
- сильномагнітні — феромагнетики та феримагнетики.

Діамагнетики — речовини, що намагнічуються в зовнішньому магнітному полі в напрямку, *протилежному* напрямку вектора магнітної індукції поля, послаблюючи його. За відсутності зовнішнього магнітного поля діамагнетики немагнітні. До діамагнетиків належать інертні гази, молекулярні водень та азот, бісмут, цинк, мідь, золото, срібло, германій, вода в рідкому стані, ацетон, гліцерин, полум'я свічки, нафтаген і багато інших речовин із магнітною проникністю $\mu < 1$, значення якої не залежить як від напруженості зовнішнього магнітного поля, так і від температури.

Парамагнетики — також слабомагнітні речовини, що намагнічуються в зовнішньому магнітному полі в напрямку вектора магнітної індукції поля, відповідно частково підсилюючи його. До парамагнетиків належать багато лужних металів, солі заліза, кобальту, нікелю, оксиди азоту, мангану, хлорид заліза тощо, а також розчини різних солей. Це речовини з магнітною проникністю $\mu > 1$, яка також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Феромагнетики — особлива група речовин, що намагнічуються. До них належать залізо, нікель, кобальт та їхні сплави, сплави хрому й мангану тощо. Під дією магнітного поля вони намагнічуються так, що підсилюють зовнішнє магнітне поле й надають йому потрібної конфігурації. Ці речовини мають магнітну проникність $\mu \gg 1$, яка залежить від напруженості магнітного поля. Вони намагнічуються дуже сильно й зберігають власне магнітне поле після припинення дії зовнішнього поля. Це явище називають *залишковим намагнічуванням*, що взято за основу утворення штучних магнітів (наприклад, магнітних стрілок компасів). Магнітна проникність феромагнітних матеріалів змінюється з температурою, набуваючи максимальних значень за температур, близьких до температури (точки) Кюрі. Для чистого заліза температура Кюрі становить $+768\text{ }^\circ\text{C}$, для нікелю — $+358\text{ }^\circ\text{C}$, кобальту — $+1131\text{ }^\circ\text{C}$.

Якщо феромагнетики перемагнічувати змінним магнітним полем, спостерігаються втрати енергії на тепло. Петля гістерезису розширюється (збільшує свою площу) порівняно зі статичною за рахунок втрат не лише на гістерезис, а й на вихрові струми й додаткові втрати. Таку петлю називають *динамічною*, а відповідні втрати — *сумарними*.

Для **феримагнетиків** характерна наявність кількох магнітних підґраток, магнітні моменти яких відрізняються й не компенсують один одного, тому результуючий момент не дорівнює нулю. Властивості феримагнетиків тісно пов'язані з їхньою кристалічною структурою. У не дуже сильних магнітних полях вони поведуться подібно до феромагнетиків. За відсутності зовнішнього поля феримагнетики розбива-

ються на домени, мають характерну криву намагнічення з насиченням і гістерезисом. Для них характерна значно менша, порівняно з феромагнетиками, величина намагніченості насичення, а також температурна залежність.

Незвична поведінка феримагнетиків у сильних магнітних полях — найпростіша колінеарна магнітна структура в деякому інтервалі магнітних полів і температур може стати неколінеарною внаслідок конкуренції негативної обмінної взаємодії між магнітними підґратками та взаємодії магнітних моментів із зовнішнім полем напруженістю H ; магнітні моменти підґраток становитимуть різні кути з напрямком зовнішнього магнітного поля.

Більшість феримагнетиків належить до діелектриків і напівпровідників і характеризується високим питомим опором. Із цим пов'язані можливості їхнього широкого застосування у ВЧ і НВЧ-пристроях, оскільки в них дуже малі втрати на вихрові струми в змінних електромагнітних полях навіть дуже високих частот. Властивості феримагнетиків мають деякі впорядковані металеві сплави, але переважно — різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес становлять ферити.

Немагнітні матеріали. У різних приладах та апаратах, застосовуваних в електротехніці, потрібні матеріали, які не мають магнітних властивостей. Для таких цілей придатні пластмаса й кольорові метали (алюміній, латунь, бронза). Однак ці матеріали мають малу механічну міцність, а деякі з них дефіцитні. У зв'язку із цим їх замінюють немагнітною сталлю і немагнітним чавуном.

Магнітні матеріали, які застосовують в електротехніці, поділяють на:

- магнітом'які матеріали;
- магнітотверді матеріали;
- матеріали спеціалізованого призначення.

5.2. Магнітом'які матеріали

Ці матеріали характеризують здатністю легко намагнічуватися до насичення та розмагнічуватися у відносно слабких магнітних полях напруженістю H у межах 0,80–800 А/м. Вони мають високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу та малі втрати на гістерезис. Призначені передусім для роботи в змінному магнітному полі або в динамічних режимах. Частотний діапазон застосування різних груп магнітом'яких матеріалів значною мірою визначають величиною їхнього питомого електричного опору: матеріали з більшим опором можна використовувати на високих частотах. У разі малих значень опору з підвищенням частоти можуть значно зрости вихрові струми та, відповідно, втрати на перемагнічування. У постійних і низькочастотних полях (до сотень герц та одиниць кілогерц) використовують металеві магнітом'які матеріали. На підвищених і високих частотах застосовують матеріали з питомим опором, що відповідає напівпровідникам і діелектрикам.

Бажано, щоб матеріали були технологічними, недорогими й недефіцитними, а їхні властивості не дуже залежали від механічних напружень. В окремих випадках важливі температурна та часова стабільність властивостей, лінійність кривої намагнічення (на певній ділянці) тощо.

Розгляньмо найважливіші матеріали цієї групи.

Технічно чисте залізо містить невелику кількість домішок вуглецю, сірки, мангану, кремнію тощо (до 0,1 %), які погіршують його магнітні властивості. Через порівняно низький електричний опір використовують переважно для магнітопроводів постійного магнітного потоку. Магнітні властивості заліза значною мірою залежать як від його чистоти (кількості домішок), так і від структури (розміру зернин, на межі яких виникає викривлення кристалічної ґратки) та способу оброблення. Технічно чисте залізо застосовують для отримання майже всіх феромагнітних сплавів.

Електролітичне залізо отримують шляхом електролізу розчину хлориду або сульфату заліза. Воно відрізняється високим ступенем чистоти й високою магнітною індукцією. Осаджене на катоді залізо після ретельного промивання подрібнюють на порошок у кульових млинах, після чого його піддають вакуумному відпалу або переплавляють у вакуумі. Магнітні властивості такого заліза низькі через велике насичення воднем. Електролітичне залізо може становити інтерес лише у двох випадках: під час отримання дуже чистого заліза й отримання залізного порошку для магнітодіелектриків.

Карбонільне залізо — це високочисте залізо, яке отримують термічним розкладанням пентакарбоніла заліза згідно з $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Карбонільне залізо має вигляд тонкого сірого порошку, що дає змогу виготовляти осердя шляхом пресування. У карбонільному залізі відсутні кремній, фосфор і сірка, але є вуглець, кисень та азот. У результаті термічного оброблення у водні залізо набуває високих магнітних властивостей.

В електроніці карбонільне залізо застосовують для виготовлення магнітопроводів для високочастотних котушок і виробництва деяких феритів. Також карбонільне залізо використовують як феромагнітну фазу в магнітодіелектриках. Порошкові магнітопроводи з карбонільного заліза мають високу стабільність параметрів у широкому діапазоні температур і рівнів магнітного потоку з відмінною добротністю в діапазоні від 50 кГц до 200 МГц.

Низьковуглецева електротехнічна сталь — різновид технічно чистого заліза з вмістом вуглецю не більше 0,04 % та інших домішок — не більше 0,6 %. Випускають тонколистову та сортову, застосовують для виготовлення магнітопроводів усіх типів, деталей реле, осердь і полюсних наконечників електромагнітів, елементів вимірювальних приладів, магнітопроводів двигунів постійного та змінного струму малої та середньої потужності тощо.

Електротехнічна сталь із вмістом вуглецю менше 0,05 % і кремнію 0,8–4,8 % — основний магнітом'який матеріал найширшого застосування. Домішки кремнію істотно збільшують питомий електричний опір сталі, початкову й максимальну магнітні проникності, зменшують коерцитивну силу та втрати на гістерезис, однак знижують індукцію насичення. Кремній несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшуючи його крихкість та ускладнюючи прокатування в листи. Якщо вміст кремнію становить понад 5 %, сталь стає дуже крихкою.

Сталь із вмістом кремнію до 1,8 % використовують для виготовлення деталей електричних машин, які працюють у постійному полі; сталь із вмістом кремнію 1,8–2,8 % застосовують в електричних машинах змінного струму; сталь із вмістом кремнію 2,8–4,8 % використовують переважно для виготовлення магнітопроводів трансформаторів.

Пермалой — група сплавів заліза з нікелем (іноді ще з кобальтом), легованих додатково іншими елементами. Містять 35–80 % нікелю. Класичний пермалой має у своєму складі 78,5 % Ni та 21,5 % Fe. Для надання пермалоюм необхідних властивостей до їхнього складу вводять такі домішки: Mo, Cr, Si, Mn, Cu. Молібден і хром підвищують початкову магнітну проникність, але знижують індукцію насичення; домішка молібдену сприяє також зменшенню чутливості пермалоїв до деформування; хром робить постійною магнітну проникність у слабких полях, підвищує температурну стабільність і питомий опір; кремній і манган збільшують питомий опір і спрощують механізм оброблення пермалоїв; мідь надає термостабільності. Найкращі магнітні властивості в пермалою марки 79НМ (79 % Ni, 15 % Fe, 5 % Mo, 0,5 % Mn). Вартість пермалоїв визначають вмістом у їхньому складі нікелю. У марках пермалоїв літера Н означає нікель, К — кобальт, М — манган, Х — хром, С — кремній (силіцій), Д — мідь; додаткова літера У — сплав із поліпшеними властивостями, П — з прямокутною петлею гістерезису. Цифра в марці вказує відсотковий вміст нікелю.

Пермалої характеризуються високими значеннями магнітної проникності в слабких полях і малим значенням коерцитивної сили. За вмістом нікелю розрізняють сплави низьконікелеві (40–50 %) і високонікелеві (70–80 %). Низьконікелеві пермалої характеризуються вищою в півтора раза індукцією насичення, приблизно вдвічі вищим питомим електричним опором, простішим термообробленням, нижчою вартістю, слабшим впливом механічних напружень, чистоти та складу на магнітні властивості порівняно з високонікелевими пермалоюми. Магнітна проникність високонікелевих пермалоїв у кілька разів більша, а коерцитивна сила менша, ніж у низьконікелевих.

Низьконікелеві пермалої марок 45Н і 50Н застосовують для малогабаритних трансформаторів, дроселів, реле й деталей магнітопроводів, які працюють із підвищеними індукціями й на підвищених частотах, де потрібна висока концентрація магнітного потоку. Високонікелеві пер-

малої марок 79НМ, 80НХС, 76НХД застосовують для потужних і малогабаритних трансформаторів, реле, для виготовлення магнітних екранів; особливо тонкі стрічки (товщина 0,02 мм) використовують в імпульсних трансформаторах, магнітних підсилювачах, безконтактних реле. Недоліки цих сплавів — нижчі значення індукції насичення та вища вартість порівняно з електротехнічними сталями, чутливість до механічних напружень і потреба в складному термообробленні.

Пермалої з прямокутною петлею гістерезису можуть використовувати для виготовлення осердя магнітних підсилювачів, перемикальних пристроїв, випрямних установок і для елементів комп'ютерів.

Аморфні магнітні матеріали (АМ) відрізняються поєднанням високих магнітних і механічних властивостей, наявністю лише ближнього структурного порядку. Аморфний стан формується під час надшвидкого переходу з рідкого стану до твердого охолодженням розплаву. Швидкої тепловіддачі досягають лише для виготовлення дуже тонкого сортаменту (наприклад, стрічка завтовшки 0,05 мм).

АМ на 75–85 % складаються з одного або кількох перехідних металів (Fe, Co, Ni) і 15–25 % металоїду (склоутворювача) — бору, вуглецю, кремнію, фосфору. Додавання металоїду зменшує намагніченість насичення, знижує точку Кюрі, але при цьому збільшує питомий опір, підвищує твердість і міцність сплавів, їхню корозійну стійкість. Виробництво АМ дешевше, ніж традиційних кристалічних матеріалів. Для додаткового поліпшення АМ застосовують термічне або термомагнітне оброблення.

Високочастотні магнітом'які матеріали — це магнітні речовини, які мають виконувати функції магнетиків при частотах понад 102–103 Гц. Згідно із частотними властивостями їх поділяють на матеріали для звукових, ультразвукових частот, низьких радіочастот, високих і надвисоких радіочастот. У таких матеріалів має бути насамперед великий питомий опір, що зменшує втрати на вихрові струми. Їх поділяють на магнітом'які ферити та магнітодіелектрики.

Магнітом'які ферити — це магнітна кераміка, яку отримують спіканням оксиду заліза (Fe_2O_3 — ферум(III) оксид) та оксидів інших металів. Матеріали поєднують властивості феромагнетиків і напівпровідників або діелектриків. Зокрема, їхній питомий опір досягає значень 10^{16} Ом·м, що дає змогу використовувати їх на найвищих частотах (табл. 5.1).

Ферити виготовляють за технологією виробництва радіокераміки з недефіцитних матеріалів. Як початкову сировину використовують оксиди відповідних металів. Їх подрібнюють і перемішують, після чого брикетують і відпалюють на повітрі. Брикети знову подрібнюють на порошок, який пластифікують водним розчином полівінілового спирту й формують вироби способом пресування чи гарячого лиття. Відформовані вироби запікають.

Властивості деяких магнітом'яких матеріалів

Назва	Магнітна проникність		Коерцитивна сила, А/м	Індукція насичення, Тл	Питомий опір, мкОм•м
	початкова	максимальна			
Технічно чисте залізо	250–400	3500–4500	50–100	2,18	0,1
Електролітичне залізо	600	15 000	30	2,18	0,1
Карбонільне залізо	2000–3000	20 000–21 500	6,4	2,18	0,1
Електротехнічна сталь	200–600	3000–8000	10–65	1,95–2,02	0,25–0,6
Низьконікелевий пермалой	15 000–40 000	1500–60 000	5–32	1,0–1,6	0,45–0,9
Високонікелевий пермалой	7000–100 000	50 000–300 000	0,65–5,0	0,65–1,05	0,16–0,85

Перевага феритів у тому, що це матеріали відносно дешеві, до того ж, змінюючи їхні склад і структуру, можна отримувати матеріали з потрібними характеристиками. До недоліків магнітом'яких феритів належать низька магнітна індукція насичення — 0,15–0,5 Тл (унаслідок часткової компенсації магнітних моментів речовини), більша коерцитивна сила, низька температура точки Кюрі (у більшості феритів вона не перевищує +200–300 °С) порівняно з феромагнетиками. Феритам властиві також усі недоліки кераміки (твердість, крихкість, складне оброблення тощо).

Найбільш поширені дві групи магнітом'яких феритів — *манганово-цинкові* та *нікелево-цинкові*, що являють собою трикомпонентні системи $Mn-Zn-Fe_2O_3$ та $Ni-Zn-Fe_2O_3$. Перші використовують на частотах до кількох сотень кілогерц і в імпульсних режимах; другі — на частотах до 100 МГц. Індукція насичення розглянутих феритів сягає 0,1–0,4 Тл, що значно нижче, ніж у магнітом'яких сплавів. Магнітна проникність становить: $\mu_n = 20-20\,000$ і $\mu_{max} = 45-35\,000$.

Суттєві переваги манганово-цинкових феритів перед нікелево-цинковими: у кілька разів менші втрати на гістерезис, вища індукція, значно більша температура точки Кюрі та менше значення температурного коефіцієнта магнітної проникності ТК μ . За жорстких вимог до величини нелінійних спотворень манганово-цинкові ферити кращі за нікелево-цинкові, але останні мають переваги під час роботи в пристроях із підмагнічуванням.

Магнітом'які ферити застосовують під час виготовлення магнітопроводів імпульсних і високочастотних трансформаторів і котушок індуктивності, магнітних антен, магнітних запам'ятовувачів пристроїв. На основі магнітом'яких феритів реалізовано перспективний тип елементів — багатофункційні магнітні радіокомпоненти, які здійснюють водночас трансформацію, стабілізацію, модуляцію та інші види перетворення електричного сигналу.

Магнітодіелектрики — пресований матеріал, що складається з порошку магнітного матеріалу (феро- або феримагнетика) з малою величиною коерцитивної сили, причому частки магнітного матеріалу електрично ізольовані одна від одної діелектриком. За основу використовують карбонільне залізо, пермалой тощо. Ізолювальним зв'язувальним є фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло тощо. Основа повинна мати високі магнітні властивості, зв'язувальна речовина — здатність утворювати між зернами суцільну ізолювальну плівку. Шляхом подрібнення магнітного матеріалу на дрібні частинки, які не стикаються поміж собою, досягають малих втрат на гістерезис і вихрові струми. Оскільки в цьому матеріалі дрібні магнітні частинки ізольовані одна від одної прошарками діелектрика, йому притаманний також механізм електропровідності діелектрика. Питомий опір таких магнітних матеріалів сягає 10^{14} Ом · м. Магнітні властивості магнітодіелектриків значною мірою залежать від методів і технологічних режимів їхнього отримання.

Магнітодіелектрики — це також і високочастотні магнітні матеріали, характерною ознакою яких є вища стабільність магнітних властивостей, зокрема стабільність магнітної проникності під час зміни зовнішнього магнітного поля. Але за деякими важливими електромагнітними параметрами магнітодіелектрики поступаються феритам, через що сфера застосування магнітодіелектриків поступово скорочується.

Альсіфер — це потрійний сплав алюмінію (аль-), кремнію (-сі-) і заліза (-фер). Оптимальний склад альсіферу: 9,5 % Si, 5,5 % Al, решта — 85 % — Fe. Такий сплав вирізняється твердістю та крихкістю, тому його виготовляють у вигляді фасонних виливків.

Вимоги до точності підтримання складу сплаву невисокі, тому що властивості магнітодіелектрика мало залежать від властивостей вихідного магнітного матеріалу. Вони визначаються здебільшого розмірами, формою і взаємним розташуванням частинок цього матеріалу. Вироби з альсіферу — магнітні екрани, корпуси приладів тощо — виготовляють методами лиття з товщиною стінок не менше 2–3 мм через крихкість сплаву. Така особливість обмежує застосування цього матеріалу, хоча альсіфер дешевий і недефіцитний. Змінюючи вміст кремнію та алюмінію, можна регулювати величину температурного коефіцієнта магнітної проникності $T\mu$ і домогтися практично нульових його значень. Значення магнітної проникності магнітодіелектриків на основі альсіферу невелике ($\mu_n = 20\text{--}90$), діапазон робочих частот 0,01–0,1 МГц.

Магнітодіелектрики на основі залізонікелевих сплавів (пермалойв) вигідно відрізняються від альсіферів високими значеннями початкової магнітної проникності: $\mu_n = 200-250$ і зниженням значення температурного коефіцієнта магнітної проникності ТК μ . Вихідною сировиною в цьому разі є молібденовий пермалой 79НМ. Присадку сірки додають для надання пермалой крихкості, після чого його змелюють до частинок, розміром у кілька мікрометрів, що дає змогу зменшити втрати на гістерезис. Магнітодіелектрикам на основі пермалой властиве певне зниження магнітної проникності за підвищеної вологості, тому магнітопроводи із цього матеріалу потрібно застосовувати в герметизованій апаратурі.

Магнітодіелектрики на основі карбонільного заліза. Порошкоподібне карбонільне залізо можна отримувати з розміром частинок до 1–5 мкм і величиною початкової магнітної проникності $\mu_n \approx 3000$ за робочої частоти до 60 МГц. Промисловість випускає два класи карбонільних порошоків: для радіоапаратури — класу «Р» і для провідного зв'язку — класу «П». Потрібно пам'ятати, що за підвищеної вологості в умовах експлуатації цей матеріал поглинає вологу, тому магнітопроводи мають бути герметизовані.

Немагнітний чавун застосовують у тих випадках, коли конструкційний матеріал не потребує наявності магнітних властивостей. Немагнітні чавуни добре обробляють механічно. За температури до +400 °С вони зберігають свої парамагнітні властивості. Великий електричний опір немагнітного чавуну знижує втрати на вихрові струми порівняно з кольоровими сплавами. Магнітна проникність немагнітного чавуну: $\mu = 1,03$, питомий опір: $\rho = 1,4$ мкОм·м, межа міцності: 250–350 МПа. Зразковий склад немагнітного чавуну: 2,6–3,0 % вуглецю, 2,5 % кремнію, 5,6 % мангану, 9–12 % нікелю, решта — залізо. Немагнітний чавун використовують для виготовлення кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, обойм силових трансформаторів, кожухів зварювальних трансформаторів тощо.

Немагнітні сталі виготовляють шляхом додавання нікелю та мангану, що сприяє зниженню температури переходу γ -заліза в α -залізо до температури +20 °С і нижче. Зразковий склад немагнітної сталі: 0,25–0,35% вуглецю, 22–25% нікелю, 2–3% хрому, решта — залізо. Межа міцності такої сталі 700–800 МПа, магнітна проникність: $\mu = 1,05-1,2$. Немагнітну сталь застосовують для стягування і кріплення трансформаторів, дроселів, котушок індуктивності тощо.

5.3. Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали намагнічуються до насичення й перемагнічуються в порівняно сильних магнітних полях напруженістю в тисячі й десятки тисяч А/м (довго зберігають свої магнітні властивості). Ці матеріали характеризуються високими значеннями коерцитивної сили

$H_c > 4000$ А/м, залишкової індукції $B_{\text{зал}}$, магнітної енергії $(B \cdot H)_{\text{макс}}$. Магнітна проникність таких матеріалів нижча, ніж у магнітом'яких матеріалів, причому що вища коерцитивна сила, то менша магнітна проникність. Для магнітотвердих матеріалів характерна велика кількість різних дефектів, що утруднюють переміщення доменних границь. З магнітотвердих речовин виготовляють переважно постійні магніти.

За складом і способом отримання магнітотвердих матеріалів розрізняють леговану мартенситну сталь, литі магнітотверді сплави, магніти з порошків, магнітотверді ферити, магнітні стрічки.

Мартенситна сталь належить до найпростіших і найдоступніших матеріалів. Використовують лише леговану хромом (до 10 %), вольфрамом (до 6 %), кобальтом (до 16 %) сталь. Набуває потрібних магнітних властивостей після гартування з утворенням *мартенситу* — специфічної структурної складової. Через невисокі магнітні характеристики застосовують обмежено.

Найбільшу кількість постійних магнітів виготовляють із **литих сплавів** складу Fe–Al–Ni та Fe–Al–Ni–Co.

Сплави системи Fe–Al–Ni містять 20–30 % Ni, 11–13 % Al, легуються міддю, інколи титаном. Мають порівняно невисокі магнітні властивості.

Сплави систем Fe–Al–Ni–Co містять 12–26 % Ni, 2–40 % Co і 6–13 % Al з додаванням 2–8 % міді, до 9 % титану та до 3 % ніобію для поліпшення властивостей.

Мають відносно велику магнітну енергію. При додаванні кобальту магнітні властивості сплавів підвищуються. Недоліком сплавів є труднощі виготовлення з них виробів точних розмірів через крихкість і твердість сплавів, що допускають оброблення тільки шляхом шліфування. Коерцитивна сила досягає 14 кА/м.

Порошкові магнітні матеріали виготовляють способом пресування з наступним термообробленням. Їхнє застосування особливо важливе, коли є потреба у виготовленні дрібних виробів із суворим дотриманням розмірів. Матеріали (магніти) цієї групи поділяють на металокерамічні, металопластичні й оксидні.

Металокерамічні магніти отримують пресуванням без зв'язувальної речовини порошку з подрібненого магнітотвердого сплаву з наступним спіканням за високих температур. За магнітними властивостями вони майже не поступаються литим магнітам, але дорогі. За такої технології отримують дрібні деталі досить точних розмірів без потреби в додатковому обробленні. Металокерамічні магніти (ММК1–ММК11) зазвичай мають пористість 3–5 %, а магнітна енергія і залишкова індукція в них на 10–20 % нижчі, ніж у литих магнітів із відповідного сплаву, проте за механічною міцністю вони переважають литі магніти в 3–6 разів. Коерцитивна сила 24–128 кА/м.

Металопластичні магніти отримують пресуванням магнітного порошку зі зв'язувальною речовиною й нагріванням до невисокої температури, необхідної для полімеризації останньої. Ці магніти характеризуються простішою технологією виготовлення, вищим питомим опором, нижчою вартістю, але їхні магнітні властивості гірші, ніж у литих. Коерцитивна сила нижча на 10–15 %, залишкова індукція — на 35–50 %, а магнітна енергія — на 40–60 %, порівняно з литими магнітами. Зниження магнітних властивостей пояснюється великим вмістом (до 30 %) немагнітної зв'язувальної речовини. Металопластичні магніти мають високий електричний опір, тому їх застосовують в апаратурі з наявністю змінного магнітного поля підвищеної частоти.

Оксидні магніти — це магнітотверді ферити на основі барію та кобальту. Найчастіше використовують барієвий ферит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (фероксдюр), котрий не містить дефіцитних компонентів. Матеріал має високе значення коерцитивної сили (до 240 кА/м), питомий опір дорівнює 10^4 – 10^7 Ом · м, але має невелику залишкову індукцію (~0,38 Тл). На відміну від магнітом'яких феритів, барієвий ферит має не кубічну, а гексагональну кристалічну ґратку з одноосною анізотропією.

Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марки БІ (барієві ізотропні) і марки БА (барієві анізотропні). Технологія виробництва БІ подібна до технології магнітом'яких феритів; у технологічному процесі виробництва БА операція пресування здійснюється в магнітному полі певної орієнтації напруженістю 650–800 кА/м. Барієві магніти доцільно виготовляти у вигляді шайб і тонких дисків, вони відрізняються високою стабільністю до впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться трясіння й ударів. Магніти з барієвого фериту можна використовувати під час високих частот. Недоліки барієвих магнітів: низька механічна міцність, значна крихкість, сильна залежність магнітних властивостей від температури. Крім того, вони виявляють необоротну зміну магнітних властивостей після охолодження від кімнатної до низької температури (–60 °С) і нагрівання до початкової температури.

Кобальтовий ферит $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ характеризується більшою температурною стабільністю порівняно з барієвим. Вартість магнітів із кобальтових феритів вища, ніж барієвих. Також відрізняється технологія виготовлення, зокрема наявністю операції термомагнітного оброблення, яка складається з нагрівання спечених магнітів до температури +300–350 °С протягом 1,5 год та охолодження в магнітному полі протягом 2 год.

Інші магнітотверді матеріали

Матеріали для звукозапису. Для запису й відтворення інформації використовують суцільні *металеві стрічки з магнітотвердих сталей і сплавів* (переважно в спеціальній апаратурі) та стрічки на пластмасовій основі з покриттям із порошкоподібних феритів. Для виготов-

лення останніх застосовують дешеві доступні оксиди заліза — магнетит Fe_3O_4 (чорного кольору) й червоний залізняк Fe_2O_3 (червоно-коричневого кольору). Технічні характеристики стрічки залежать не лише від властивостей вихідних матеріалів, а й від ступеня подрібнення частинок, об'ємної щільності магнітного матеріалу в робочому шарі, орієнтації частинок; вони визначають якість запису — відтворення на малих швидкостях руху носія.

Матеріали з високою питомою енергією. До цієї групи належать сплави металів групи заліза (Fe, Co, Ni) із рідкісноземельними металами, що характеризуються рекордними значеннями всіх основних магнітних характеристик при задовільних характеристиках температурної та часової стабільності. Спочатку перевагу віддавали сплавам Sm–Co, які виявилися найбільш технологічними. У 1987 р. промисловість освоїла виробництво постійних магнітів на основі сплавів системи Nd–Fe–B, які загалом мають кращі характеристики (крім діапазону робочих температур). Їхнє світове виробництво швидко зростає.

Інтенсивно ведуть дослідження з метою отримання нових матеріалів із кращими властивостями, зниження їхньої вартості, розроблення нових технологічних прийомів виготовлення магнітів.

5.4. Матеріали спеціального призначення

Серед матеріалів спеціального призначення в радіoeлектроніці застосовують матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), ферити для пристроїв надвисокочастотного діапазону й магнітострикційні матеріали.

Ферити й металеві сплави з прямокутною петлею гістерезису (ППГ) (табл. 5.2) широко застосовують у пристроях автоматики, обчислювальної техніки, в апаратурі телеграфного зв'язку. До матеріалів і виробів цього типу існують специфічні вимоги, а для їхньої характеристики залучають деякі додаткові параметри. Основним із таких параметрів є коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису $K_{\text{пк}}$:

$$K_{\text{пк}} = \frac{B_{\text{зал}}}{B_{\text{max}}},$$

де $B_{\text{зал}}$ — залишкова магнітна індукція, яка відповідає максимальному значенню магнітної індукції B_{max} .

Для ідеальної ППГ: $K_{\text{пк}} = 1$; для матеріалів, які застосовують на практиці: $K_{\text{пк}} = 0,85\text{--}0,98$.

Крім того, матеріали з ППГ мають забезпечувати малий час перемагнічування, більшу температурну стабільність магнітних характеристик, а отже, мати високу температуру точки Кюрі й деякі інші властивості.

Магнітопроводи з матеріалу, у якого ідеальна ППГ, мають два стійких магнітних стани, які відповідають додатному ($+B_{\text{зал}}$) і від'ємному ($-B_{\text{зал}}$) значенням залишкової магнітної індукції, тому є магнітними

5.4. Матеріали спеціального призначення

елементами для збереження та оброблення двійкової інформації. Запис і зчитування інформації здійснюють перемиканням магнітопроводу з одного магнітного стану в інший за допомогою імпульсів струму, які створюють необхідну напруженість магнітного поля. Двійкові елементи на магнітних осердях із ППГ характеризуються високою надійністю, малими габаритами, низькою вартістю, відносною стабільністю характеристик. Вони мають майже необмежений термін використання, зберігають записану інформацію при відключених джерелах живлення.

Таблиця 5.2

Властивості осердь і матеріалів із прямокутною петлею гістерезису

Матеріали або осердя	H_c , А/м	$B_{зал}$, Тл	$K_{пк}$	t_k , °С	Примітка
Ферити різних марок	10–1200	0,15–0,25	0,9	100–630	Є понад 25 різних марок
Мікронні осердя з пермалоїв (товщина стрічки 2–10 мкм)	8–50	0,6–1,5	0,85–0,9	300–630	Сплави: 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ

Ферити з ППГ. Специфічна форма петлі гістерезису реалізується при виборі певного хімічного складу й умов спікання фериту, а не є результатом будь-якого спеціального оброблення матеріалу, що приводить до утворення текстури. Коли піднімається температура від -20 до $+60$ °С у феритів різних марок коерцитивна сила зменшується в 1,5–2 рази, залишкова індукція — на 15–30 %, коефіцієнт прямокутності — на 5–35 %. Технологія виготовлення осердь із феритів із ППГ проста й економічна. З феритів із ППГ найширше застосовують *магній-манганові* та *літієві*.

Залежно від особливостей пристроїв, у яких застосовують ферити з ППГ, вимоги до них можуть істотно різнитися. Так, ферити, призначені для комутаційних і логічних елементів схем автоматичного управління, повинні мати малу коерцитивну силу (10–20 А/м). І навпаки, матеріали, що використовують у пристроях зберігання дискретної інформації, — підвищене значення коерцитивної сили (100–300 А/м). У пристроях запам'ятовування ЕОМ застосовують або кільцеві феритові осердя малого розміру (із зовнішнім діаметром 0,3–0,4 мм), або багатотвірні феритові плати, у яких область навколо кожного отвору виконує функцію окремого осердя.

Стрічкові мікронні осердя з пермалоїв мають, порівняно з феритами, кращі магнітні властивості (див. табл. 5.2) та вищу температурну стабільність. У тому ж інтервалі температур (від -20 до $+60$ °С) їхні властивості майже не змінюються. У мікромініатюрних електронних приладах використовують магнітні плівки, нанесені на основи методом розпилення у вакуумі.

Ферити для пристроїв надвисоких частот (НВЧ). Діапазон НВЧ відповідає довжинам хвиль від 1 мм до 1 м. Електромагнітні хвилі можуть поширюватися в просторі, заповненому діелектриком, а від металів вони майже повністю відбиваються. Тому металеві поверхні використовують для спрямування хвиль, їхньої концентрації або розсіювання. Електромагнітна енергія НВЧ найчастіше передається по хвилеводах, що є порожніми або частково заповненими твердими металевими трубами. Як тверді матеріали для керування потоком енергії у хвилеводах використовують НВЧ-ферити, магнітними характеристиками яких можна управляти за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Ферити використовують у НВЧ-пристроях — антенних перемикачах і циркуляторах, що слугують для розподілу енергії між окремими хвилеводами, у фазообертачах, фільтрах, модуляторах, обмежувачах потужності тощо. НВЧ-ферити мають відповідати специфічним вимогам: досягненню вузької лінії резонансу; високій чутливості матеріалу до керуючого поля (можливості керування відносно слабким зовнішнім полем); високому питомому об'ємному опору (10^6 – 10^8 Ом·м) і, можливо, меншому тангенсу кута діелектричних втрат (10^{-3} – 10^{-4}), а також, можливо, меншим значенням магнітних втрат поза областю резонансу, що забезпечує слабе загасання у фериті; температурній стабільності властивостей і, можливо, вищому значенню точки Кюрі.

Більшість із цих вимог дотримуються під час використання *магній-манганових феритів* із великим умістом оксиду магнію. Для деяких цілей застосовують *літій-цинкові й нікель-цинкові ферити* та поліферити.

Монокристали ферогранату ітрію характеризуються досить низькими діелектричними й магнітними втратами, слабкою анізотропією, найвужчою резонансною кривою, коерцитивною силою $H_c = 10$ – 100 А/м. Вони найпоширеніші серед феритів, які застосовують у низькочастотній частині діапазону НВЧ.

Магнітострикційні матеріали — це матеріали, застосування яких засноване на явищі магнітострикції й магнітопружному ефекті, тобто зміні розмірів тіла в магнітному полі та зміні магнітних властивостей матеріалу під дією механічних впливів. Магнітострикційними матеріалами для високих частот є ферити. Магнітострикційні коливання невеликої амплітуди в намагніченому середовищі за своїм зовнішнім проявом аналогічні п'єзоелектричним. Тому їх іноді називають *п'єземагнітними*.

Сплав *платини із залізом Fe–Pt* має велику константу магнітострикції, однак він дуже дорогий, тому має досить обмежене застосування. Недоліком *залізокобальтових Fe–Co і залізоалюмінієвих Fe–Al сплавів* є крихкість, що ускладнює механічне оброблення, а також низька антикорозійна стійкість, що перешкоджає використанню таких перетворювачів у водному середовищі. Зазначені сплави застосовують як магнітопроводи генераторів акустичних коливань при звукових та ультразвукових частотах. Поздовжня магнітострикція

цих сплавів має позитивний знак, а відносна деформація коливається в межах $(40-120) \times 10^{-6}$. Найчастіше для цього використовують чистий **нікель**, що має значну магнітострикцію. Цінними властивостями нікелю є висока стійкість до корозії та малий температурний коефіцієнт модуля пружності.

У магнітострикційних пристроях широко застосовують **феритову кераміку**. Завдяки високому питомому опору в неї дуже малі втрати на вихрові струми, вона не піддається дії хімічно агресивних середовищ. За допомогою керамічної технології можна виготовити перетворювачі практично будь-яких форм і розмірів. За складом магнітострикційна кераміка є або чистим феритом нікелю, або твердим розчином на його основі.

Термомагнітні матеріали — сплави з різкою залежністю магнітної проникності від температури. Це сплави на основі Ni-Cu, Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, Fe-Ni-Co. Їх застосовують для компенсації температурної похибки в установках, зумовленої зміною індукції постійних магнітів або опору проводів у магнітоелектричних приладах порівняно з тим значенням, при якому виконувалося градування. Для отримання різкої температурної залежності магнітної проникності використовують властивість феромагнетиків знижувати індукцію з підняттям температури поблизу точки Кюрі. Для зазначених феромагнетиків точка Кюрі лежить між 0 і +100 °С залежно від добавок легувальних елементів. Сплав Ni-Cu з вмістом міді 30 % може компенсувати похибки в температурних межах від -20 до +80 °С, з вмістом міді 40 % — від -50 до +10 °С.

Сплави з особливо високою індукцією насичення — залізо-кобальтові сплави — мають індукцію насичення до 2,4 Тл. Електричний опір таких сплавів невеликий. Сплави, що містять 50–70 % кобальту, називають **пермендіурями**. Це магнітом'які сплави заліза (47–50 %) з кобальтом (48–50 %) і невеликим доданням ванадію (1,5–2 %) (рис. 5.3). Здешевлений варіант сплаву містить орієнтовно 24 % кобальту. За значеннями магнітної проникності в полях, напруженість яких $H > 4$ А/см, і за точкою Кюрі, що становить +950–980 °С, пермендіур значно перевищує електротехнічну сталь і залізо.

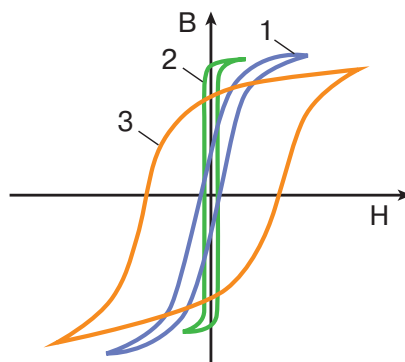


Рис. 5.3. Петлі гістерезису: 1 — магнітом'яких матеріалів; 2 — прямокутна петля магнітом'яких матеріалів; 3 — магнітотвердих матеріалів

Розділ 5. Магнітні матеріали

Через високу вартість пермендюри можуть застосовувати тільки в спеціальній апаратурі, зокрема в динамічних репродукторах, осцилографах, телефонних мембранах і виробачах, які працюють у постійних або слабких змінних магнітних полях із сильним підмагнічуванням постійним полем.

З магнітострикційних матеріалів виготовляють магнітопроводи електромеханічних випромінювачів і приймачів для електроакустики й ультразвукової техніки, магнітопроводи електромеханічних і магнітострикційних фільтрів і резонаторів, ліній затримки. Їх застосовують як чутливі елементи магнітопружних перетворювачів у пристроях автоматики.

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Які матеріали називають *магнітними*?
2. Якими параметрами характеризується магнітне поле речовини?
3. Опишіть явище гістерезису.
4. Від чого залежить величина втрат на перемагнічування матеріалу й на вихрові струми?
5. Як класифікують матеріали за їхніми магнітними властивостями?
6. Опишіть властивості діамагнетиків і парамагнетиків.
7. Опишіть феромагнетики та феримагнетики. Яка різниця в будові та властивостях цих матеріалів?
8. Як домішки кремнію впливають на властивості електротехнічної сталі?
9. У чому полягають особливості пермалю?
10. Розкажіть про магнітом'які ферити.
11. Чим відрізняються магнітні матеріали спеціального призначення?
12. Охарактеризуйте магнітострикцію як одну з властивостей магнітних матеріалів.
13. Які матеріали належать до магнітострикційних?
14. Охарактеризуйте термомагнітні матеріали.
15. *Виконайте тестове завдання.* Установіть відповідність між магнітним матеріалом та його застосуванням.

Магнітний матеріал

- 1 технічно чисте залізо
- 2 електролітичне залізо
- 3 карбонільне залізо
- 4 електротехнічна сталь
- 5 високонікелевий пермалой
- 6 альсіфер
- 7 феритова кераміка

Застосування в електротехніці

- А** в хімічно агресивних середовищах
- Б** як феромагнітна фаза в магнітодіелектриках
- В** в малогабаритних трансформаторах, реле
- Г** для отримання феромагнітних сплавів
- Д** для отримання залізного порошку для магнітодіелектриків
- Е** для виготовлення магнітопроводів трансформаторів
- Є** у виготовленні магнітних екранів, корпусів приладів

6.1. Матеріали для напівпровідникових інтегральних мікросхем

Інтегральною називають мікросхему з певним функціональним призначенням, виготовлену не складанням і розпаюванням окремих активних і пасивних елементів, а цілісно, у єдиному технологічному процесі, усі елементи та з'єднання якої неподільно пов'язані, а схему розглядають як одне ціле. За технологією виготовлення інтегральні мікросхеми (ІМС) поділяють на напівпровідникові, плівкові, гібридні.

Напівпровідниковою інтегральною мікросхемою називають схему, усі елементи й міжеlementні з'єднання якої виконано в об'ємі або на поверхні кристалу напівпровідника.

Для виготовлення напівпровідникових мікросхем використовують кремній, германій, рубін, гранат, галію фосфід та арсенід тощо. Основним матеріалом є кремній. Він дуже технологічний, має широкий діапазон питомого опору під час легування різними домішками. Для отримання кремнію з електронною (*n*-типу) провідністю застосовують такі легувальні домішки, як арсен, стибій або фосфор. Домішками *p*-типу до кремнію є алюміній або бор.

Кремній має вищі електричні й фізико-хімічні характеристики порівняно з іншими напівпровідниками, велику ширину забороненої зони, що забезпечує ширший (майже вдвічі) інтервал робочих температур (до +150 °С), зворотні струми *p-n*-переходів у тисячу разів менші, ніж у германію, і більша пробивна напруга. Пробій *p-n*-переходу настає за вищої температури. На кремнієвій пластині в процесі термічного оброблення легко отримати оксидну плівку, яка відіграє роль захисного покриття від впливів зовнішнього середовища під час проведення технологічних процесів.

Кремній отримують як монокристалічні стрижні, використовуючи, як правило, метод витягування кристалу з розчину (метод Чохральського) або метод зонного плавлення (див. розділ 4 «Напівпровідники»). Монокристал напівпровідникового матеріалу слугує основою майбутньої ІМС.

Монокристал — окремих однорідний кристал, що має неперервну й непорушну кристалічну структуру в усьому об'ємі. Для монокристалів характерна анізотропія фізичних властивостей. Електричні, магнітні, оптичні, акустичні, механічні й інші властивості монокристалів пов'язані між собою та обумовлені кристалічною структурою, силами зв'язку між атомами й енергетичним спектром електронів.

Стрижневі монокристали напівпровідників розрізають на пластини. Для створення сучасних ІМС потрібні пластини великих розмірів — діаметром до 300 мм і завтовшки від десятків до кількох сотень мікромет-

рів із шорсткістю обробленої поверхні не більше 0,04 мкм. Опір кремневої пластини буде різним у поздовжньому та поперечному напрямках. Тому пластини має бути вирізані з монокристалу так, щоб орієнтація кристалічної ґратки відносно поверхні була точно витримана в певному напрямку. Якість поверхні пластини визначається її мікрорельєфом (шорсткістю), кристалічною досконалістю поверхневих шарів і ступенем їхньої фізико-хімічної чистоти.

Отже, після калібрування циліндричної поверхні на монокристалі виконують базовий і додаткові (маркувальні) зрізи. Базовий зріз роблять для орієнтації і базування пластин на операціях фотолітографії. Додаткові зрізи призначені для позначення кристалографічної орієнтації пластин і типу провідності напівпровідникових матеріалів. Ширина базового й додаткових зрізів регламентована й залежить від діаметра монокристалу. Монокристали розрізають на пластини абразивними дисками з різальною кромкою, покритою алмазною крихтою. Застосовують плоскошліфувальні верстати, які досить небезпечні, бо пов'язані з диском, що швидко обертається. Для захисту від потрапляння рук робітника в небезпечну зону використовують захисні камери, які повністю закривають шпиндель із диском. Камера має бути забезпечена блокувальним пристроєм, який автоматично відключає верстат від електроживлення. Один або кілька монокристалів закріплюють у спеціальному пристосуванні, орієнтуючи необхідну кристалографічну площину паралельно до поверхні стола верстата. У зону оброблення подають мастильну охолоджувальну рідину (наприклад, воду).

Зрізи можна виконувати й на плоскодовідних верстатах із застосуванням абразивних суспензій на основі порошків силіцій карбіді або бор карбіді із розміром зернин 20–40 мкм. Оскільки на поверхні пластин під час нарізання залишаються подряпини, відколи, тріщини й інші дефекти, що порушують однорідність структури поверхневого шару, отримані пластини піддають шліфуванню та поліруванню.

Метою *шліфування* є вирівнювання поверхні відрізаних напівпровідникових пластин, зменшення розкиду їхньої товщини, формування однорідної поверхні. Для отримання задовільних результатів шліфування проводять у чистих, вільних від пилу приміщеннях і під захисними кожухами з надлишковим тиском повітря. Усі установки для проведення процесів шліфування розділені за видом оброблення й типом використовуваного абразиву, а всі матеріали (шліфувальники, абразивні порошки) розсортовані й зберігаються в окремих герметичних упаковках.

Для шліфування застосовують тверді довідні диски-шліфувальники й абразиви. Шліфувальники виготовляють із чавуну, скла, сталі, міді або латуні. Під час обертання шліфувальника його поверхня та поверхня напівпровідникової пластини щільно прилягають одна до одної. У зону шліфування подають абразивну суспензію, що створює певний тиск, який приводить до виколювання мікрочастинок напівпровідникового матеріалу.

6.1. Матеріали для напівпровідникових інтегральних мікросхем

Шліфувальним абразивним порошком може бути будь-який матеріал, зернини якого мають високу твердість, механічну й хімічну стійкість і твердіші за шліфований матеріал. Під час оброблення абразивом зернини дряпають поверхню деталі, знімаючи з неї матеріал у вигляді дуже дрібної стружки, у результаті чого підвищується чистота поверхні.

Застосовувані в електротехніці абразивні матеріали поділяють на природні та штучні. До *природних абразивних матеріалів* належать природний алмаз, корунд, а до *штучних* — електрокорунд, силіцій карбід і бор карбід. Перевагу віддають штучним абразивним матеріалам (як дешевшим).

Природний алмаз — мінерал, який складається з одного хімічного елемента — вуглецю (карбону). Трапляється у вигляді невеликих кристалів різної форми від 0,005 до кількох каратів (1 карат дорівнює 0,2 г). З усіх відомих речовин алмаз найтвердіший. Під час шліфування його застосовують у вигляді дрібного порошку. Висока твердість забезпечує алмазним зернинам досить високі різальні властивості, здатність руйнувати поверхневі шари дуже твердих матеріалів. Оскільки алмаз дефіцитний і дорогий, застосування його як абразиву обмежене.

Штучний (синтетичний) алмаз отримують із графіту під час високого тиску в температурі. Він має ті самі фізичні й хімічні властивості, що й природний алмаз.

Корунд застосовують частіше, ніж інші, він досить твердий. Складається з 90 % оксиду алюмінію та домішок інших речовин.

Електрокорунд — штучно синтезований матеріал. Його виготовляють сплавленням в електричних печах спеціальної шихти, до складу якої належать природний корунд і невелика кількість домішок різних мінералів. Твердість електрокорунду залежить від вмісту в ньому оксиду алюмінію, що знаходиться в природному корунді. Що більше в електрокорунді оксиду алюмінію, то вища його твердість. Найвищим сортом електрокорунду є білий електрокорунд марки ЕБ, який містить до 99 % оксиду алюмінію.

Промисловість випускає також:

- монокорунд, що містить 97–98 % Al_2O_3 ;
- електрокорунд нормальний, що містить у зернинах 92–96 % Al_2O_3 ;
- електрокорунди леговані, що містять елементи, які істотно змінюють їхні властивості, наприклад титан, хром тощо.

Електрокорунди мають щільність 3,93–4,01 г/см³, мікротвердість у межах $(1,8–2,6) \times 10^{10}$ Н/м², твердість за шкалою Мооса — 8,9–9,1.

Силіцій карбід (SiC) — один із найтвердіших штучних абразивів, який отримують в електропечах під час взаємодії кремнію й вуглецю за температури понад +2000 °С. Сировина — кварцовий пісок (≈99 %) і нафтовий кокс (≈1 %). Властивості силіцій карбиду: щільність — 3,16–3,39 г/см³; мікротвердість — $3,4 \times 10^{10}$ Н/м²; твердість за шкалою Мооса — 9,2. Залежно від вмісту домішок буває двох марок: зелений,

Розділ 6. Матеріали для електронного виробництва

що містить не менше 97 % SiC, і чорний, у якому 95–96 % SiC. Абразивна здатність зеленого SiC приблизно на 20 % вища, ніж чорного.

Бор карбід (B_4C) — неорганічна сполука чорного із сірим відтінком кольору, яку отримують сплавленням шихти, що складається з борної кислоти й нафтового коксу. Бор карбід надзвичайно твердий, тому його використовують у порошках і пастах для доведення виробів із твердих матеріалів.

Найчастіше застосовують мікропорошки з розміром зернин 14 мкм і менше. У таблиці 6.1 наведено марки та розміри зернин основної фракції мікропорошків, які використовують. Мікропорошки M14, M10, M7, M5 виготовляють із силіцій карбіду і бор карбіду, електрокорунду, мікропорошки марок АСМ — з алмазу.

Таблиця 6.1

Мікропорошки для шліфування пластин кремнію

Параметри	Марка								
	M14	M10	M7	M5	АСМ 7/5	АСМ 5/3	АСМ 3/2	АСМ 2/1	АСМ 1/0,5
Розмір зернин, мкм	14,10	10,7	7,5	5,3	7,5	5,3	3,2	2,1	1 і дрібніше
Клас шорсткості	7	8–9	10	11	10	11	12–13	13	13

Полірування — це процес, унаслідок якого з поверхні матеріалу видаляють усі забруднення та нерівності й він набуває блиску. Пластини шліфують з обох боків, а полірують тільки робочий бік. Для полірування пластин використовують ті самі верстати, що й для шліфування. Як правило, для доведення до досконалості готових виробів застосовують спеціальні пасти та м'які диски або диски полірувальників обтягують різними натуральними чи синтетичними тканинами.

Замша — м'яка шкіра з низьким і густим ворсом, вироблена зі шкур тварин методом жирового дублення. Зазвичай позбавлена лицьового шару.

Повсть (войлок) — це натуральний нетканий матеріал, який виробляють із валяної вовни домашніх тварин. Виготовляють не тільки натуральну, а й особливо міцну штучну повсть із синтетичних волокон у вигляді листів, з яких вирізають диски для полірувальників.

Ворсит — різновид штучної шкіри, яку отримують шляхом просочення тканини (вельветону) з лицьового ворсового боку бензиновими розчинами синтетичного каучуку. Використовують як основу під час шліфування пластин.

Точність механічного оброблення напівпровідникових матеріалів залежить насамперед від налагодження верстата, а також від жорсткості кріплення матеріалів. У процесі різання кристалів на пластини вико-

ристовують кріплення зливків за допомогою епоксидних смол, клеїв БФ, полістиролу. Під час шліфування та полірування пластини кріплять до устаткування верстатів за допомогою восків, парафінів, шелаку, церезину, гліфталевих лаків.

Епоксидна смола — це реактопласт, реакція взаємодії епоксидної смоли із затвердником є необоротною. Епоксидний склад має два компоненти. Під час змішування вони вступають у реакцію полімеризації. Шляхом різного комбінування смол та отверджувача отримують найрізноманітніші епоксидні композиції (ЕД-5, ЕД-6). Як отверджувачі використовують феноли, аміди, аміни або їхні аналоги.

Клеї БФ — це речовини від жовтого до бурого кольору, які отримують змішуванням фенолформальдегідної і полівінілбутиральної смол. Клеї марок БФ-2 і БФ-4 застосовують для склеювання кольорових металів, сталі, термореактивних пластмас, органічного скла, порцеляни, кераміки й інших матеріалів у будь-якому поєднанні, завдяки чому утворюються тверде клейове з'єднання. Клей БФ-6 використовують для клейового з'єднання, щоб воно було еластичним і стійким до вібрації (гума, тканина, шкіра).

Полістирол — твердий, крихкий, аморфний полімер, який розчиняється в метилбензені з утворенням однорідної в'язкої рідини. Для кріплення основ мікросхем полістирол використовують як емульсії.

Віск — термопластична речовина тваринного (бджолиний віск) або рослинного походження. Нерозчинний у воді, температура розм'якшення: +60–70 °С. Використовують для приклеювання напівпровідникових пластин до шліфувальних або полірувальних дисків.

Парафін — термопластична речовина білого, жовтого чи коричневого кольору, один із продуктів нафтопереробної промисловості. Використовують для кріплення напівпровідникових пластин до шліфувальних або полірувальних дисків.

Шелак — природна смола жовто-коричневого кольору, шаруватої структури. Використовують у лакофарбовій промисловості під час виготовлення спиртових лаків і фарб, в електротехніці — як ізоляційний матеріал для просочування паперу, картону та як клейку мастику.

Церезин — воскоподібна речовина від білого до коричневого кольору, без смаку й запаху, дещо масна на дотик. Отримують із нафтової сировини. Він не розчиняється у воді й етанолі (спирті), обмежено розчиняється в мінеральних маслах, добре розчиняється в бензені. В електротехніці застосовують як ізоляційний матеріал, як спеціальне покриття для радіотехнічного обладнання.

Гліфталевий лак — прозора рідина, за складом — синтетична алкідна смола, модифікована каніфоллю та рослинною олією. Лак має високу клейову здатність, міцність отриманих плівок, забезпечує маслостійкість, електричну міцність і термоеластичність покриттів. Застосовують для кріплення напівпровідникових пластин. Шар лаку, нанесений на пластинку, має бути прозорим, без сторонніх включень.

Хімічне травлення напівпровідникових пластин супроводжується видаленням поверхневого шару з механічно порушеною кристалічною структурою, разом з яким видаляються наявні на поверхні забруднення. Травлення є обов'язковою технологічною операцією.

Поверхневі хімічні реакції при полірувальному травленні проходять дві стадії: окиснення поверхневого шару напівпровідника й переведення оксиду в розчинні сполуки. При травленні кремнію роль окиснювача виконує нітратна кислота. Плавикова кислота, яка входить до складу речовини для травлення, переводить силіцій оксид у силіцій тетрафторид. Для травлення, що надає поверхням пластин дзеркального блиску, використовують суміш зазначених кислот у співвідношенні 3:1, температура травлення: +30–40 °С, час травлення — приблизно 15 с.

Після того, як виконано всі технологічні операції на пластині, її поділяють на окремі кристали розміром від 1×1 до 10×10 мм. Перед поділом пластину наклеюють на самоклеїтку фольгу, щоб уникнути втрати кристалів.

Пластини різуть на окремі кристали різними способами.

Скрайбування алмазним різцем. Істотні недоліки способу — великі (30–50 мкм або 20–40 мкм) сколи по краях риски, мала глибина скрайбування (10–15 мкм), незручність для роботи захоплювальних пристроїв при автоматизованому складанні, спосіб не забезпечує якісного розламування товстих пластин. Алмазне скрайбування залишилося тільки у вигляді лабораторного методу різання пластин завтовшки не більше 350 мкм.

Скрайбування лазерним променем — риски завширшки 25–40 мкм і завглибшки 50–100 мкм утворюються випаровуванням напівпровідникового матеріалу з поверхні пластин сфокусованим лазерним пучком і забезпечують їх розламування з перпендикулярними до робочої поверхні бічними гранями кристалів. Перевагою цього методу є висока продуктивність через відсутність механічної дії на напівпровідниковий матеріал (безконтактний спосіб). На поверхні пластин не утворюються сколи, що дає нагоду збільшити швидкість скрайбування. Лазерне скрайбування забезпечує якісне розламування пластин кремнію завтовшки до 400–450 мкм і дає змогу істотно підвищити продуктивність процесу.

Для збільшення терміну використання мікроелементів, мікромодулів і мікросхем, а також підвищення їхньої надійності велике значення мають захисні матеріали й різні методи герметизації. Як захисні матеріали використовують епоксидні й силіконові матеріали, кремнійорганічні смоли тощо. Герметизація мікросхем буває корпусна, безкорпусна та комбінована й здійснюється кількома способами: просоченням, заливанням, обгортанням і розміщенням у корпусі. Вибір способу визначається переважно умовами експлуатації, наявним обладнанням і необхідною продуктивністю. У кожному конкретному випадку потрібно вибрати оптимальні матеріали та метод герметизації.

6.2. Матеріали для гібридно-плівкових інтегральних мікросхем

Для безкорпусної герметизації застосовують методи пресування литтям, заливання під вакуумом, обгортання і поверхневе покриття зануренням і розпиленням. Під час пресування литтям (лиття під тиском) процес герметизації виконують на ливарних машинах. Метод заснований на здатності пластмасових матеріалів розплавлятися і в рідкому стані заповнювати всі порожнечі в спеціальній формі для лиття.

Корпусну герметизацію здійснюють в уніфікованих стандартизованих металевих або пластмасових корпусах, що слугують для захисту елементів мікросхем від механічних і кліматичних впливів. Усередині корпусу до його основи шляхом паяння або приклеювання кріплять пластину мікросхеми. Виводи корпусу з'єднують із контактними площадками основи мікросхеми.

6.2. Матеріали для гібридно-плівкових інтегральних мікросхем

Гібридною інтегральною мікросхемою (ГІМС) називають схему, у якій разом з елементами, нерозривно пов'язаними на поверхні або в об'ємі основи, використовують і навісні мікромініатюрні елементи (напівпровідникові транзистори, діоди, дроселі тощо), які не можуть бути виконані як плівки (рис. 6.1).

Залежно від методу виготовлення нерозривно пов'язаних елементів розрізняють *гібридну плівкову* та *гібридну напівпровідникову інтегральні схеми*. Широке застосування отримала ГІМС, у якій пасивні елементи — плівкові, а активні елементи — навісні. Перевагами гібридно-плівкової технології є висока гнучкість процесу, тобто можливість великого вибору різних матеріалів і методів виготовлення плівкових елементів, а також відносна простота розроблення та виготовлення більшості схем.

Залежно від методу нанесення плівкових елементів на основу та їхньої товщини, розрізняють *тонкоплівкові* (напилення у вакуумі з товщиною плівок менше 10 мкм) і *товстоплівкові* (графаретний друк із товщиною плівок понад 10 мкм) гібридні інтегральні мікросхеми.

Конфігурації тонко- і товстоплівкових елементів однакові, але їхні конкретні геометричні розміри (за заданими електричними параметрами) можуть істотно відрізнитися через використання абсолютно різних матеріалів. Плівкові елементи немає потреби ізолювати один від одного, оскільки їх виготовляють на діелектричній основі.

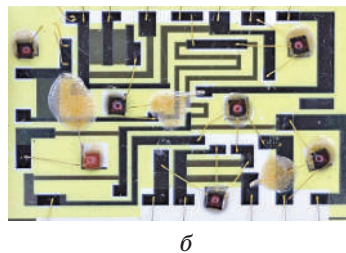
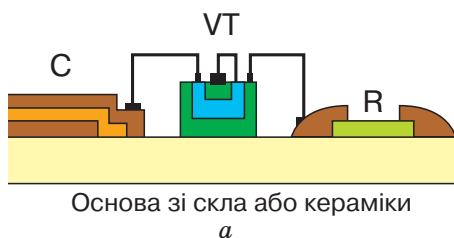


Рис. 6.1. Гібридна інтегральна мікросхема: а) конструкція; б) загальний вигляд

Розділ 6. Матеріали для електронного виробництва

Основа ГІМС слугує як для розташування плівкових і навісних елементів, так і для відведення тепла. Як матеріал основи найчастіше використовують скло, кераміку, ситал, синтетичний сапфір. Цей вибір зумовлений малою питомою електропровідністю, хімічною стійкістю та високою електричною міцністю матеріалів, невисокою вартістю. Основи мають прямокутну або квадратну конфігурацію і товщину від 0,2 до 1 мм. Вони не повинні вступати в хімічні реакції з матеріалами плівок, у них має бути низький ступінь шорсткості поверхні, високий електричний опір. Для забезпечення хорошого зчеплення плівок з основою останні піддають ретельному поліруванню, травленню в кислотах і промиванню. Крім того, перед нанесенням плівок основи очищують шляхом йонного бомбардування безпосередньо в установці для наплення плівок.

Для виготовлення основ товстоплівкових ГІМС найчастіше використовують кераміку, яка має велику термостійкість, механічну міцність і теплопровідність. Основи для них мають розміри $16 \times 10 \times 1$ або $10 \times 10 \times 1$ мм. Недоліком кераміки є значна шорсткість поверхні, що ускладнює отримання відтворюваних номіналів тонкоплівкових елементів. Збільшення класу чистоти оброблення поверхні шляхом покриття кераміки шаром нелужного скла веде до значного зменшення теплопровідності.

Для тонкоплівкових схем як матеріал основи (табл. 6.2) використовують нелужне боросилікатне скло марок С41-1 і С48-3, а також ситали, глазурану кераміку й полікор. Габаритні розміри основ тонкоплівкових схем також стандартизовані. Товщина їх становить 0,4–0,6 мм. Одним із недоліків основ зі скла є мала теплопровідність.

Для основ гібридних інтегральних мікросхем застосовують ситал — склокерамічний матеріал, який отримують термообробленням (кристалізацією) скла. Він досить легко піддається механічному обробленню: його можна пресувати, витягати, прокатувати й відливати відцентровим способом. Ситал у 2–3 рази міцніший за скло, витримує різкі перепади температури, газонепроникний, має високі електричний опір, стійкість до стирання, хімічну стійкість до кислот, дуже малу пористість, дає незначну об'ємну усадку, має малу газовіддачу за високих температур.

Таблиця 6.2

Електрофізичні параметри матеріалів основ ГІМС

Параметри матеріалу	Матеріал основи				
	Скло		Ситал СТ50-1	Кераміка	
	С41-1	С48-3		22ХС (96 % Al_2O_3)	Полікор
Клас чистоти оброблення поверхні	14	14	13–14	12	12–14

6.2. Матеріали для гібридно-плівкових інтегральних мікросхем

Продовження табл.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення за $t = +20\text{ }^\circ\text{C}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C)	1	1,5	1,5	10	30–45
Діелектрична проникність за $f = 10^6$ Гц і $t = +20\text{ }^\circ\text{C}$	7,5	3,2–8,0	5,0–8,5	10,3	10,5
Тангенс кута діелектричних втрат за $f = 10^6$ Гц і $t = +20\text{ }^\circ\text{C}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Об'ємний опір за $t = +25\text{ }^\circ\text{C}$, Ом·м	10^{15}	10^{11}	—	—	—
Електрична міцність, кВ/мм	40	40	—	50	—

Як тонкоплівкові резистивні матеріали використовують чисті метали та сплави з високим електричним опором: нікель, тантал, хром, ніхром, а також спеціальні резистивні матеріали — кермети, які складаються із частинок металу й діелектрика.

Тонкоплівкові резистори конструктивно складаються з резистивної плівки прямокутної форми, або Г-подібної і П-подібної конфігурації та контактних площадок (рис. 6.2). Параметри тонкоплівкових резисторів визначаються властивостями резистивних матеріалів, що застосовують, товщиною резистивної плівки й умовами її формування. Для створення ГІМС потрібні резистивні плівки з питомим поверхневим опором ρ_s від десятків до десятків тисяч Ом на квадрат площі. Що менша товщина плівок, то вищий ρ_s , але одночасно підвищується температурний коефіцієнт питомого опору TK_ρ , а також погіршується часова й температурна стабільність плівок.

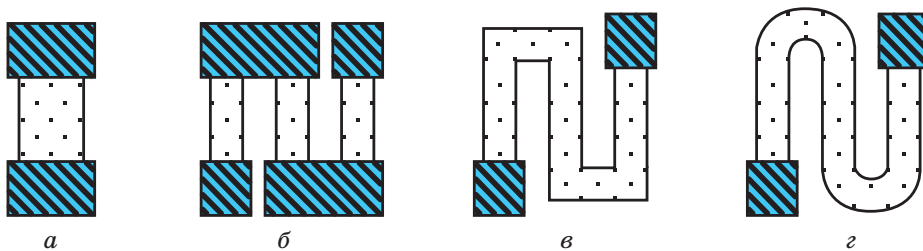


Рис. 6.2. Конфігурації тонкоплівкових резисторів:

а) прямокутна; б) складена зі смужок; в) типу «меандр»; з) «змійка»

Тонкоплівкові резистори наносять шляхом осадження на діелектричну основу резистивного матеріалу за допомогою термічного й катодного наплення. Тонкоплівкові резистивні шари з ніхрому товщиною менше 0,1 мкм наносять вакуумним випаровуванням і забезпечують опір до

Розділ 6. Матеріали для електронного виробництва

300 Ом/квадрат. Опір шару до кількох кОм на квадрат площі мають плівки танталу, які отримують катодним напиленням. Великий опір до 10 кОм/квадрат мають тонкі плівки резистивних сплавів, наприклад кремнію та хрому в різних відсоткових співвідношеннях. Ще більший опір до 50 кОм/квадрат мають плівки з керметів — сумішей діелектричного матеріалу з металом (наприклад, мікрокомпозиція Cr–SiO, метало-силіцидні сплави типу МЛТ-3М, РС3001) (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Основні параметри матеріалів для тонкопліткових резисторів

Матеріал резистора	Матеріал контактної площадки	Питомий поверхневий опір ρ_s , Ом/квадрат	Діапазон номінальних значень резисторів, Ом	Питома потужність розсіювання P_0 , мВт/см ²	Температурний коефіцієнт питомого опору TK_p , К ⁻¹
Ніхром Х20Н80	Мідь	300	50–30 000	2	1×10^{-4}
Хром	Мідь	500	50–30 000	1	6×10^{-5}
Тантал ТВЧ	Алюміній	100	50–100 000	3	-2×10^{-4}
Кермет К-50С	Золото	5000	500–200 000	2	-4×10^{-4}
Сплав РС-3001	Золото	1000	100–50 000	2	-2×10^{-5}
Сплав РС-3710	Золото	3000	1000–200 000	2	-3×10^{-5}
Сплав МЛТ-3М	Мідь	500	50–50 000	2	2×10^{-4}

Для отримання товстопліткових резисторів застосовують пасти, що містять як функціональну фазу частинки паладію (Pd) та аргентум оксиду (Ag_2O). Опір шару півки завтовшки 15–20 мкм лежить у межах від 50 Ом/квадрат до 1 МОм/квадрат залежно від відсоткового співвідношення між Pd і Ag_2O . Пасту на поверхню основи наносять за допомогою спеціальних сітчастих трафаретів за певним рисунком. Після нанесення пасти її сушать за температури +80–125 °С. У цей час із пасти відділяється зв'язувальна органічна речовина. Потім проводять випалювання пасти для отримання хорошої адгезії з основою і необхідних параметрів елементів.

Композиційні товстопліткові резистори на основі рутенієвих паст системи Ru–RuO або композицій RuPb–RuBi мають більш стабільний електроопір і менше значення $TK_p = (1,5 - 2,5) \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

Для зменшення технологічного розкиду параметрів пліткових резисторів застосовують *індивідуальну підгонку* резисторів різними спосо-

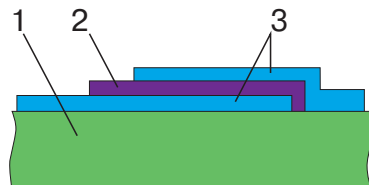
6.2. Матеріали для гібридно-плівкових інтегральних мікросхеми

Найпростіший спосіб підгонки полягає в частковому механічному зішкрібанні резистивного шару до того, як поверхню схеми буде захищено покриттям. Більш досконалі є методи часткового видалення шару за допомогою електричної іскри, електронного або лазерного променя. Але всі ці способи дають змогу лише збільшувати опір резистора. Найбільш досконалий і гнучкий метод полягає в пропусканні через резистор досить великого струму. При підгонці струмом одночасно відбуваються два процеси: окиснення поверхні резистивного шару й упорядкування його дрібнозернистої структури. Перший процес сприяє збільшенню, а другий — зменшенню опору. Підбираючи силу струму й атмосферу, у якій проводять підгонку, можна забезпечити зміну опору і в один, і в інший бік на $\pm 30\%$ із похибкою (відносно бажаного номіналу) до часток відсотка.

Плівкові конденсатори мають багатшарову структуру й загалом утворені двома електропровідними плівками-обкладками, розділеними шаром діелектричної плівки (рис. 6.3). Обкладки плівкових конденсаторів виготовляють з електропровідних плівок, що містять алюміній, тантал, срібло, мідь і подібні матеріали. Діелектричну плівку зазвичай отримують із різних оксидів: танталу, стибію, кремнію, германію тощо. Ємність плівкових конденсаторів становить від 10 пФ до 20 нФ із допуском $\pm 20\text{--}30\%$.

Рис. 6.3. Конструкція плівкового конденсатора:

- 1 — діелектрична основа;
- 2 — діелектрик;
- 3 — провідникові обкладки



Товщина діелектричної плівки d істотно залежить від технології виготовлення: для тонких плівок — $d = 0,1\text{--}0,2$ мкм, для товстих — $d = 10\text{--}20$ мкм. Тому за інших рівних умов питома ємність у товстоплівкових конденсаторів менша, ніж у тонкоплівкових. Але відмінність у товщині діелектрика можна компенсувати завдяки вибору матеріалу іншої діелектричної проникності. Усі характеристики тонкоплівкових конденсаторів — ємність, робоча напруга, розміри — визначаються властивостями діелектричного матеріалу, який використовують. Для високочастотних тонкоплівкових конденсаторів оптимальним діелектриком є оксиди кремнію або германію.

Ємність тонкоплівкових конденсаторів також визначається площею перекриття їхніх обкладок (переважно площею верхньої обкладки).

Плівкові котушки індуктивності мають спіралеподібну форму (круглу або квадратну) й утворені шляхом напилення струмопровідних плівок на поверхню основи (рис. 6.4, с. 210). Індуктивність таких плівкових котушок не перевищує 10 мкГн. У сучасних ГІМС площа спіральної котушки індуктивності становить не більше 1 см^2 , при цьому макси-

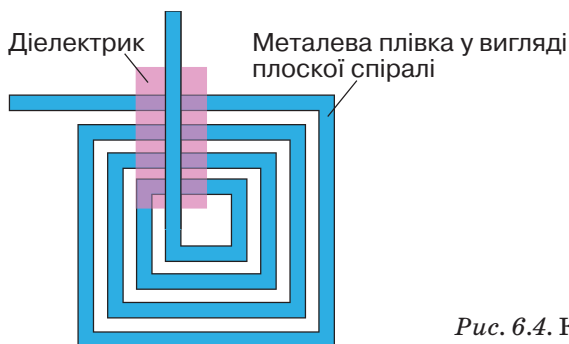


Рис. 6.4. Конструкція плівкової індуктивності

мальне число витків, яке можна розмістити на цій площі, залежить від роздільної здатності технологічного процесу. При оптимальному співвідношенні (що дорівнює 0,4) внутрішнього та зовнішнього діаметрів спіралі та ширині плівки 50 мкм величина індуктивності не перевищує 10 мкГн.

Матеріали провідникових доріжок і контактних площадок. Провідникові доріжки в ГІМС забезпечують необхідне поєднання елементів між собою і підключення їх до вивідних затискачів. Зазвичай ці доріжки виконують як тонкі плівки. Ці матеріали повинні мати малий питомий опір, високу електричну провідність, добру адгезію до поверхні основи, значну корозійну стійкість, допускати можливість паяння або зварювання.

Найбільш поширені плівки із золота з підшаром із хрому, ніхрому або титану, який потрібний для підвищення адгезії до поверхні основи. Для менш жорстких вимог можна використовувати плівки міді або алюмінію з підшаром із хрому, ніхрому або титану, але тоді для підвищення корозійної стійкості й полегшення паяння поверхню міді або алюмінію покривають тонким шаром нікелю, срібла або золота.

Товщина золотих плівкових доріжок зазвичай 0,5–1,0 мкм, а мідних та алюмінієвих — приблизно 1 мкм. Товщина золотого або нікелевого покриття на поверхні міді й алюмінію — орієнтовно 0,02–0,3 мкм. Алюмінієві доріжки мають досить високу корозійну стійкість. Захисний шар нікелю в такому випадку слугує для поліпшення умов паяння.

Компоненти ГІМС. Як навісні компоненти використовують діоди, діодні матриці, транзистори, транзисторні матриці, а також безкорпусні напівпровідникові ІМС, конденсатори з ємністю понад 2000 пФ, резистори з опором менше 5 Ом індуктивності, дроселі та трансформатори. Компоненти можуть мати гнучкі або жорсткі виводи із золота або нікелю. Зазвичай компоненти з гнучкими виводами приклеюють до основи, якщо під ними не проходять тонкоплівкові елементи, інакше їх клеять до проміжної ізоляційної прокладки, яку приклеюють до основи. Гнучкі виводи компонентів закріплюють до центру контактних площадок (рис. 6.1, с. 205) паянням низькотемпературними м'якими припоями. Довжина гнучких виводів без додаткового кріплення не має перевищувати 3 мм.

6.3. Матеріали для елементів друкованого монтажу

Друкована плата (ДП) — це один із монтажних елементів електронних пристроїв і конструкцій, який складається з діелектричної основи та мідних провідників, що нанесені на основу у вигляді металізованих ділянок (струмопровідних рисунків) (рис. 6.5). Плата має необхідні отвори для встановлення радіоелектронних елементів і забезпечує з'єднання всіх елементів схеми.

Друкована плата може бути: однобічною (ОДП), двобічною (ДДП), багатошаровою (БДП) і гнучкою (ГДП).

Для виготовлення основ:

– фольговані (з одного або з обох боків) і нефольговані діелектрики (гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, склотканина, лавсан, поліімід, фторопласт тощо);

– керамічні матеріали;

– металеві пластини з поверхневим діелектричним шаром.

Для склеювання шарів багатошарових друкованих плат:

– препреги — ізоляційні матеріали склеювальних прокладок.

Для захисту поверхні друкованої плати від зовнішніх впливів:

– полімерні захисні лаки й покривні захисні плівки.

Вибираючи матеріал основи ДП, необхідно звернути увагу на передбачувані механічні дії (вібрації, удари тощо), клас точності друкованої плати (відстань між провідниками), реалізовані електричні функції, швидкодію, умови експлуатації, вартість. Матеріал основи має добре зчіплюватися з металом провідників, мати високу механічну міцність, зберігати свої властивості у разі впливу кліматичних факторів, мати близький коефіцієнт теплового розширення порівняно з металом провідників.

Фольговані діелектрики випускають зі струмопровідним покриттям із мідної електролітичної фольги. Для поліпшення міцності зчеплення мідну фольгу з одного боку оксидують або покривають шаром хрому завтовшки 1–3 мкм. Для фольги характерні чистота складу (домішок не більше 0,05 %), пластичність.

Фольгування здійснюють пресуванням за температур $+160\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску 5–15 МПа. На діелектрик з одного або обох боків наклеюють суцільний лист мідної фольги. Товщину фольги визначають струмами, під які проєктують плату (від 5 до 105 мкм). Найбільшого поширення набула фольга завтовшки 18 і 35 мкм. Такі значення виходять зі стандартних товщин міді в зарубіжних матеріалах, де товщина шару мідної фольги обчислюють в унціях на квадратний фут: 18 мкм відповідає $\frac{1}{2}$ унції і 35 мкм — 1 унції.

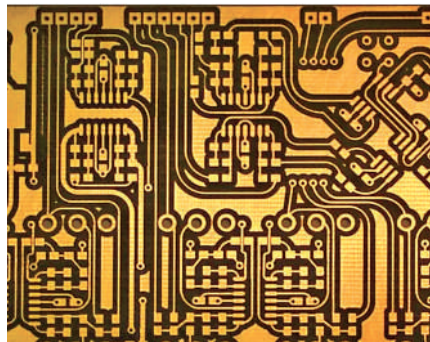


Рис. 6.5. Загальний вигляд основи друкованої плати з нанесеним струмопровідним рисунком

Нефольговані діелектрики випускають двох типів:

– з адгезійним (клейовим) шаром завтовшки 50–100 мкм, який наносять для підвищення міцності зчеплення хімічної міді з основою (наприклад, епоксидно-каучукові композиції);

– з додаванням до об'єму діелектрика каталізатора, який сприяє осадженню хімічної міді на поверхню основи.

Як діелектричну основу *жорстких друкованих плат* використовують *шаруваті пластики*, що складаються з наповнювача (електроізоляційного паперу, тканини, склотканини) і зв'язувальної речовини (епоксидної або фенолформальдегідної смоли). До шаруватих пластиків належать гетинакс, текстоліт і склотекстоліт.

Гетинакс (виготовлений на основі паперу) застосовують за нормальних кліматичних умов експлуатації для побутової апаратури.

Текстоліт (на основі бавовняної або синтетичної тканини) застосовують за нормальної вологості навколишнього середовища.

Склотекстоліт (виготовлений на основі склотканини), порівняно з гетинаксом і текстолітом, має кращі механічні й електричні характеристики, вищу нагрівостійкість, менше вологовбирання. Однак має недоліки: великі труднощі під час механічного оброблення, вищу вартість, істотну відмінність (приблизно в 30 разів) коефіцієнта теплового розширення міді та склотекстоліту в напрямі товщини матеріалу, що може призвести до розриву металізації в отворах під час паяння або в процесі експлуатації.

Для виготовлення друкованих плат, що експлуатуються в умовах підвищеної небезпеки загоряння, застосовують вогнестійкі гетинакси й склотекстоліти. Підвищення вогнестійкості діелектриків досягають, додаючи до їхнього складу антипірени.

Для виготовлення *гнучких друкованих плат*, що витримують багаторазові вигини, застосовують *діелектрики на основі поліестерної плівки* (лавсан або поліетилентерефталат), фторопласту, полііміду тощо (рис. 6.6).

Препрег (з англ. *pre-preg*, скорочено з *pre-impregnated* — попередньо просочений) — ізоляційний матеріал склеювальних прокладок, який

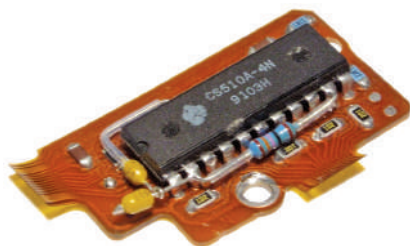


Рис. 6.6. Гнучка друкована плата зі змонтованими на ній електронними компонентами

виготовляють зі склотканини, просоченої термореактивною епоксидною смолою (або іншими смолами), або з полііміду з нанесеним із двох боків адгезійним покриттям. Препрегова технологія дає змогу отримати монолітні вироби складної форми за мінімального інструментального оброблення (рис. 6.7).

Як матеріал основи ДП можна використовувати *кераміку*. Перевагою керамічної ДП є краще тепловідведення від

6.3. Матеріали для елементів друкованого монтажу

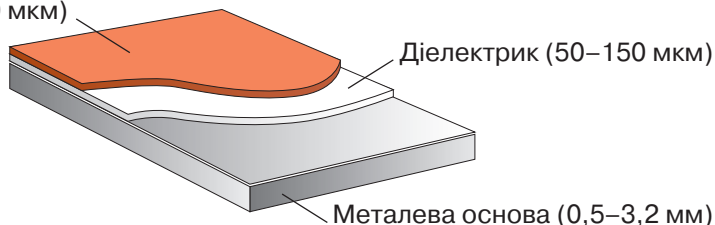
активних елементів, висока механічна міцність, стабільність електричних і геометричних параметрів, зниження рівня перешкод, низьке водопоглинання і газовиділення. Недоліки — це крихкість, велика маса при малих габаритах (до 150×150 мм), тривалий цикл виготовлення, велика усадка матеріалу, висока вартість.

Металева основу для ДП використовують у виробках із великим струмовим навантаженням, за підвищених температур, у силовій електроніці — для ефективного відведення тепла від електронних компонентів. При цьому металева основа плати кріпиться до радіатора.

Як матеріал основи застосовують алюміній (рис. 6.8), сталь, титан, мідь, сплав заліза з нікелем. Для отримання на металевій основі ізолювального шару використовують спеціальні склоемалі, кераміку, епоксидні смоли, полімерні плівки тощо. Поверх діелектрика наносять мідну фольгу. Плати на алюмінієвих основах забезпечують ефективне відведення тепла й високу теплостійкість, а сталеві основи дуже зручні в автоматизованому виробництві, оскільки суттєво спрощують конструкції захоплювачів промислових роботів. Недоліком металевих емальованих друкованих плат є висока діелектрична постійна емаль, що внеможливіє їх використання у ВЧ-апаратурі. Металеву основу ДП часто використовують як шини живлення, «землі», як екран.

Як матеріал для друкованих плат, що працюють у діапазоні надвисоких частот і за температур до +260 °С, застосовують фторопласт, армований склотканиною (наприклад, ФАФ-4Д), і кераміку.

Мідна фольга (35–350 мкм)



Діелектрик (50–150 мкм)

Металева основа (0,5–3,2 мм)

Рис. 6.8. Друкована плата на алюмінієвій основі

Матеріали елементів друкованого рисунка

Як матеріал елементів друкованого струмопровідного рисунка (провідники, контактні площадки, кінцеві контакти (ламельі) тощо), засто-

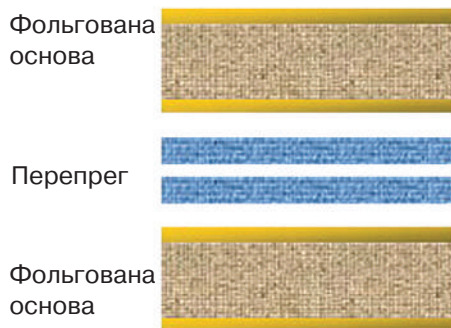


Рис. 6.7. Елементи конструкції багатошарової друкованої плати

совують металеві покриття (найчастіше мідь) (табл. 6.4). У керамічних друкованих платах використовують графіт.

Під час виготовлення ДП застосовують механічні, хімічні й електролітичні (а також їхні комбінації) методи відтворення необхідного струмопровідного рисунка.

У промисловості друковані плати виготовляють *хімічним способом* (фотодрук) із готового фольгованого матеріалу: необхідний рисунок провідників наносять на основу як фотошаблон з УФ-прозорого матеріалу, покривають фоторезистом, експонують (засвічують), проявляють, закріплюють і травлять.

Фоторезисти — це тонкі плівки органічних розчинів, які полімеризуються після експонування та переходять в нерозчинний стан. Фоторезистом суцільно покривають мідну фольгу ДП, після чого рисунок доріжок і контактів із фотошаблону переносять на фоторезист засвіченням (ультрафіолетове опромінення). Засвічений фоторезист змивають, оголюючи мідну фольгу для подальшого травлення; незасвічений фоторезист фіксують на фользі, захищаючи її від травлення.

Фоторезист буває *рідким* або *плівковим*. Рідкий використовують у промислових умовах. Його наносять шляхом занурення, накатування ребристим роликком, поливання із центригуванням. Плівковий дорожчий, його застосовують під час ручного виготовлення плат.

Травлення незахищених ділянок фольги — це хімічний процес переходу міді в розчинні сполуки. Травильні розчини мають бути сумісними з фоторезистом, що застосовують під час травлення, бути нейтральними до ізоляційних матеріалів, мати високу швидкість травлення. Як травильні розчини широко застосовують кислі й лужні розчини хлоридної міді, розчини на основі хлоридного заліза, залізо-мідно-хлоридні розчини й інші хімікати. Після травлення захисний рисунок із фольги змивають.

Електролітичне осадження міді на основу ДП здійснюють у гальванічній ванні з електролітом $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$ + спирт + вода. У ванну опускають заготовки по кілька штук і під час процесу їх погойдують, щоб уникнути нерівномірного осадження. Процес триває до отримання шару гальванічної міді завтовшки до 50 мкм. Густина струму у ванні — 2 А/дм². Після закінчення цього етапу отримують заготовку ДП з нанесеним товстим шаром гальванічної міді.

Однією з найбільш перспективних технологій, що дає змогу нанести рисунок на різні поверхні, є *імерсійний друк*, який можна застосовувати практично до будь-яких матеріалів: металу, скла, різних видів пластмас, кераміки.

Імерсією називають процес відновлення металів із розчину на негативно заряджених поверхнях. Під час імерсії атоми металу певної поверхні заміщуються частинками металу, що знаходиться в розчині. Класичним прикладом імерсії є імерсійне позолочення, яке використо-

6.3. Матеріали для елементів друкованого монтажу

вують, коли потрібно отримати золоте покриття на радіоелектронних компонентах: друкованих платах, корпусах мікросхем тощо. Процес позолочення полягає в заміщенні металу (наприклад, хімічного нікелю), що є покриттям друкованої плати, на золото. Методом імерсійного позолочення створюють золоті покриття завтовшки до 0,2 мкм.

Таблиця 6.4

Металеві покриття, які використовують під час створення друкованого рисунка

Покриття	Товщина, мкм	Призначення
Мідь	25–30	Створення основного струмопровідного шару, з'єднання провідних шарів
Сплав Розе	1,5–3,0	Захист від корозії, забезпечення паяння
Сплав олово–свинець	9–15	Захист від корозії, забезпечення паяння
Золото або золоті сплави (золото–нікель, золото–кобальт тощо)	0,5–3,0	Поліпшення електропровідності, зовнішнього вигляду, зниження перехідного опору, захист від корозії
Срібло або срібні сплави (срібло–стибій тощо)	6–12	Поліпшення електропровідності, підвищення зносостійкості контактів перемикачів і кінцевих контактів
Паладій	1–5	Зниження перехідного опору, підвищення зносостійкості контактів перемикачів і кінцевих контактів
Хімічний нікель — імерсійне золото; хімічний нікель — хімічний паладій; імерсійне золото; хімічне олово	0,2–0,4	Фінішне покриття контактних площадок і ламелей
Нікель	3–6	Захист від корозії, підвищення зносостійкості контактів перемикачів і кінцевих контактів
Родій	0,1–3,0	Підвищення зносостійкості та твердості контактів перемикачів і кінцевих контактів

Механічний спосіб виготовлення друкованих рисунків припускає використання верстатів або інших інструментів для механічного видалення шару фольги із заданих ділянок (застосовується нечасто).

Після отримання рисунка провідників виконують металізацію отворів, нанесення захисних покриттів і лудіння, нанесення маркування.

Розділ 6. Матеріали для електронного виробництва

Можливі такі покриття:

- захисно-декоративні лакові покриття;
- лудіння, яке захищає поверхню міді, збільшує товщину провідника, полегшує монтаж компонентів; виконують зануренням у ванну з припоєм або хвилею припою;
- гальванічне покриття фольги інертними металами (позолочення, паладіювання) і струмопровідними лаками для поліпшення контактних властивостей роз'ємів;
- інформаційне маркування за допомогою шовкографії, рідше — струменевим методом або лазером.

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Назвіть відомі вам інтегральні мікросхеми за технологією їхнього виготовлення.
2. Назвіть речовини, які застосовують для виготовлення напівпровідникових мікросхем.
3. Яка мета процесу шліфування пластин напівпровідникових мікросхем та які матеріали для цього процесу застосовують?
4. Які сорти електрокорунду вам відомі?
5. Яка мета процесу полірування пластин напівпровідникових мікросхем та які матеріали для цього процесу застосовують?
6. На які групи поділяють ГІМС залежно від товщини пліткових елементів та методу їхнього нанесення на основу?
7. Які матеріали застосовують для виготовлення основи ГІМС?
8. Назвіть матеріали для виготовлення тонкопліткових резисторів.
9. Назвіть матеріали для виготовлення товстопліткових резисторів.
10. Назвіть матеріали для виготовлення обкладок пліткових конденсаторів та їхніх діелектричних плівок.
11. Назвіть види друкованих плат.
12. Назвіть базові матеріали для виготовлення основ друкованих плат.
13. Що вам відомо про фольговані шаруваті пластики?
14. У яких випадках застосовують і з яких матеріалів виготовляють металеві основи друкованих плат?
15. Яке призначення фоторезисту?
16. Назвіть матеріали для створення рисунка друкованих плат.
17. Які покриття застосовують під час виготовлення друкованих плат після отримання друкованого рисунка?
18. *Виконайте тестове завдання. У конструкції друкованої плати препрег потрібний для*
 - А** склеювання шарів багатошарових друкованих плат
 - Б** виготовлення основ
 - В** захисту поверхні плати від зовнішніх впливів
 - Г** отримання рисунка провідників
19. Складіть таблицю основних матеріалів для виготовлення гібридно-пліткових інтегральних мікросхем

Частина будови гібридно-пліткової ІМС	Застосований матеріал	Властивості матеріалу

ДОДАТКИ

Додаток 1

Множники й приставки для утворення похідних одиниць та їхні назви

Множник	Приставка		
	Назва	Позначення	
		Міжнародне	Українське
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	T	Т
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гіга	G	Г
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	M	М
$1\ 000 = 10^3$	кіло	k	к
$100 = 10^2$	гекто	h	г
$10 = 10^1$	дека	da	дк
$0,1 = 10^{-1}$	деци	d	д
$0,01 = 10^{-2}$	санти	c	с
$0,001 = 10^{-3}$	мілі	m	м
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	мікро	μ	мк
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	нано	n	н
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	піко	p	п

Додаток 2

Деякі одиниці міжнародної системи SI та їхні співвідношення з одиницями інших систем; перевідні коефіцієнти

Величина	Одиниці SI		Співвідношення одиниць
	Назва	Позначення	
Довжина	метр	м	$1\ \text{м} = 10\ \text{дм} = 100\ \text{см} = 1000\ \text{мм}$ $1\ \text{м} = 10^6\ \text{мкм}$ $1\ \text{м} = 39,4\ \text{дюйма}$ $1\ \text{м} = 3,28\ \text{фута}$ $1\ \text{м} = 6,21 \times 10^{-4}\ \text{миль}$ $1\ \text{м} = 5,41 \times 10^{-4}\ \text{миль морських}$
Температура	кельвін	К	Абсолютний нуль $0,0\ \text{K} = -273,15\ \text{°C} = -459,67\ \text{°F}$ $273,16\ \text{K} = 0,01\ \text{°C}$
Маса	грам	г	$1\ \text{г} = 10^{-3}\ \text{кг}$ $1\ \text{кг} = 1000\ \text{г} = 10^{-3}\ \text{т}$ $1\ \text{т} = 1000\ \text{кг}$ $1\ \text{фунт} = 409,5\ \text{г}$

Додатки

Об'єм	метр кубічний або літр	м ³	1 м ³ = 10 ³ л = 10 ⁶ мл 1 л = 1 дм ³ = 10 ³ см ³ = 10 ⁻³ м ³ 1 мл = 10 ⁻⁶ м ³
Час	секунда	с	1 хв = 60 с 1 год = 60 хв = 3600 с 1 доба = 24 год = 1440 хв = 86 400 с
Швидкість	метр за секунду	м/с	1 м/с = 3,58 км/год 1 км/год = 0,278 м/с
Кутова швидкість	обертів за хвилину	об/хв	1 об/хв = 0,105 рад/с 1 рад/с = 9,55 об/хв
Сила	ньютон	Н	1 Н = 0,102 кгс 1 кгс = 9,81 Н
Потужність	ват	Вт	1 Вт = 1 Дж/с = 0,102 кгс·м/с 1 кінська сила = 736 Вт
Робота, енергія, кількість теплоти	джоуль	Дж	1 Дж = 1 Н·м 1 кал = 4,185 Дж 1 еВ = 1,6×10 ⁻¹⁹ Дж
Ударна в'язкість	–	Дж/см ³	1 Дж/см ³ = 0,981 кгс·м/см ²
Тиск	паскаль	Па	1 Па = 1 Н/м ² 1 Па = 0,102 кгс/м ² 1 Па = 1,02×10 ⁻⁵ кгс/см ² 1 Па = 1,02×10 ⁻⁵ ат 1 Па = 7,50×10 ⁻³ мм рт. ст. 1 Па = 0,102 мм вод. ст.
Сила струму	ампер	А	
Напруга, різниця потенціалів, електрорушійна сила	вольт	В	
Електричний опір	ом	Ом	
Питомий опір	ом на метр	Ом·м	
Електропровідність	сіменс	См	
Потужність	ват	Вт	1 Вт = 1 Дж/с
Частота	герц	Гц	1 Гц = 1 с ⁻¹
Ємність	фарад	Ф	
Індуктивність	генрі	Гн	
Кількість електрики (електричний заряд)	кулон	Кл	1 Кл = 1 А·с
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	
Магнітний потік	вебер	Вб	1 Вб = 1 В·с

Грецький алфавіт (складається з 24 літер)

Позна-чення	Назва	Позна-чення	Назва	Позна-чення	Назва
Α α	альфа	Ι ι	йота	Ρ ρ	ро
Β β	бета	Κ κ	каппа	Σ σ	сигма
Γ γ	гамма	Λ λ	лямбда	Τ τ	тау
Δ δ	дельта	Μ μ	мю	Υ υ	іпсилон
Ε ε	епсилон	Ν ν	ню	Φ φ	фі
Ζ ζ	дзета	Ξ ξ	ксі	Χ χ	хі
Η η	ета	Ο ο	омікрон	Ψ ψ	псі
Θ θ	тета	Π π	пі	Ω ω	омега

Додаток 4

Назви деяких хімічних елементів (за сучасним ДСТУ)

Елемент	Назва до реформи	Назва за ДСТУ 2439-94 (1994 р.)	Нормативна назва за ДСТУ 2439:2018 (2018 р.)
H	водень	Гідроген	водень (гідроген)
C	вуглець	Карбон	вуглець (карбон)
O	кисень	Оксиген	кисень (оксиген)
N	азот	Нітроген	азот (нітроген)
F	фтор	Флуор	фтор (флюор)
Si	кремній	Силіцій	кремній (силіцій)
S	сірка	Сульфур	сірка (сульфур)
Mn	марганець	Манган	манган
Fe	залізо	Ферум	залізо (ферум)
Ni	нікель	Нікол	нікель
Cu	мідь	Купрум	мідь (купрум)
As	миш'як	Арсен	арсен
Ag	срібло	Аргентум	срібло (аргентум)
Sn	олово	Станум (або Цина)	олово (станум)
Sb	сурма	Стибій	стибій
Pt	платина	Платинум	платина
Au	золото	Аурум	золото (аурум)
Hg	ртуть	Меркурій	ртуть (меркурій, гідраргірум)
Pb	свинець	Плюмбум	свинець (плюмбум)
Bi	вісмут	Бісмут	бісмут

Згідно з ДСТУ 2439:2018, устандартовані терміни набрано *напівжирним шрифтом*, довідкові назви — *курсивом*. Елементом повернули ті назви, які були традиційними в українській мові: **азот, водень, вуглець, залізо, золото, кисень, кремній, мідь, олово, ртуть, свинець, сірка, срібло, фтор** та ін. Назви «*нітроген, гідроген, карбон, ферум, аурум, оксиген, силіцій, купрум, станум, гідраргірум, плюмбум, сульфур, аргентум, флюор*» належать до категорії «дозволені». Хімічні елементи позначають міжнародними символами, їхні назви й назви простих речовин записують із малої літери.

Назви хімічних елементів і простих речовин є однаковими, окрім випадків, якщо проста речовина утворює алотропи з назвами, що стали традиційними, наприклад: кисень, озон; вуглець, графіт, алмаз. Для елемента із символом Si залишено назву *кремній*, а не силіцій.

Додаток 5

Номенклатура неорганічних сполук різних класів

Клас	Складові назви	Приклад
Оксиди	назва хімічного елемента + оксид	CaO — кальцій оксид NO ₂ — нітроген(IV) оксид
Основи	назва металічного елемента + гідроксид	Ca(OH) ₂ — кальцій гідроксид Cu(OH) ₂ — купрум(II) гідроксид
Кислоти	назва аніона з додаванням закінчення <i>-на</i> + кислота	HCl — хлоридна кислота HNO ₃ — нітратна кислота
Солі	назва металічного елемента + назва кислотного залишку	CaCl ₂ — кальцій хлорид Cu(NO ₃) ₂ — купрум(II) нітрат

Додаток 6

Формули та назви кислот

Формула	Кислота		Кислотний залишок		
	Назва		Склад	Валентність	Назва
	Сучасна	Тривіальна			
HCl	хлоридна	соляна	Cl	I	хлорид
HNO ₃	нітратна	азотна	NO ₃	I	нітрат
H ₂ SO ₄	сульфатна	сірчана	SO ₄	II	сульфат
H ₂ SO ₃	сульфітна	сірчиста	SO ₃	II	сульфіт
H ₂ S	сульфідна	сірководнева	S	II	сульфід
H ₂ SiO ₃	силікатна	кремнієва	SiO ₃	II	силікат
H ₂ CO ₃	карбонатна	вугільна	CO ₃	II	карбонат
H ₃ PO ₄	ортофосфатна	ортофосфорна	PO ₄	III	ортофосфат

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бовсунувський А. П.* Електротехнічні матеріали : короткий довідник. — Київ : НУХТ, 2012. — 36 с.
2. *Власенко А. М.* Матеріалознавство та технологія металів : підруч. для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. — Київ : Літера ЛТД, 2019. — 224 с.
3. *Колесов С. Н., Колесов І. С.* Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали) : підруч. для студ. електротехн. й електромех. спец. — Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2007. — 476 с.
4. *Лабунець В. Ф.* Конспект лекцій з предмета «Електротехнічні матеріали» [Електронний ресурс]. URL: https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/39708/6/06_Елек.Мат._КЛ.pdf
5. *Леонтьєв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А.* Електротехнічні матеріали : навч. посібник. — Вінниця : ВНТУ, 2013. — 122 с.
6. Технологія виготовлення друкованих плат. [Електронний ресурс]. https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/139930/mod_resource/content/1/Лекція%20САПР-11-1.pdf
7. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій / уклад. Т. М. Курська, Г. О. Чернобай, С. Б. Єрьоменко. — Харків : УЦЗУ, 2008. — 136 с.
8. Метали і сплави різного призначення. Неметалеві провідні матеріали. [Електронний ресурс]. URL: http://page.if.ua/uploads/navch_mat/met/MET_Lek_2.pdf
9. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : наук.-навч. видання : У 3 т. Т. 1 / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв, В. Каліта, О. М. Мельник, Є. Потенцкі; за ред. З. Ю. Готри. — Львів : Ліга-Прес, 2002. — 475 с.
10. Національний стандарт України ДСТУ 2439:2018 «Хімічні елементи та прості речовини. Терміни та визначення основних понять, назви й символи». — [Чинний від 01.10.2019]. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
11. Характеристики проводів і кабелів. [Електронний ресурс]. <http://debor.com.ua/dovidniki/>
12. *Попель П., Крикля Л.* Хімія (рівень стандарту): підруч. для 11 кл. закл. заг. сер. освіти. — Київ : ВЦ «Академія», 2019. — 248 с.: іл.
13. *Поплавко Ю. М.* Фізика діелектриків : підруч. / за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 572 с.
14. *Червоний І. Ф., Єгоров С. Г., Воляр Р. М.* Виробництво напівпровідникових матеріалів. Конспект лекцій. — Запоріжжя : Вид-во Запорізької державної інженерної академії, 2006. — 100 с.

З М І С Т

Передмова	3
-----------------	---

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ

1.1. Основні типи хімічного зв'язку.....	5
1.2. Різні агрегатні стани речовин	7
1.3. Обґрунтування вибору електротехнічних матеріалів.....	9
<i>Запитання та завдання</i>	10

РОЗДІЛ 2. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

2.1. Класифікація провідникових матеріалів.....	11
2.2. Властивості провідникових матеріалів.....	13
2.2.1. Фізико-хімічні властивості	13
2.2.2. Механічні властивості	18
2.3. Матеріали високої електричної провідності.....	21
2.3.1. Мідь та її сплави	21
2.3.2. Алюміній та його сплави.....	25
2.4. Матеріали високого питомого опору	27
2.4.1. Тугоплавкі метали	27
2.4.2. Провідникові резистивні матеріали	29
2.4.3. Плівкові резистивні матеріали	31
2.4.4. Матеріали для термопар	32
2.5. Дорогоцінні метали	34
2.6. Метали та сплави різного призначення	36
2.7. Надпровідники та кріопровідники	40
2.8. Неметалеві провідникові матеріали.....	43
2.8.1. Матеріали для електровугільних виробів	43
2.8.2. Композиційні резистивні матеріали	46
2.9. Матеріали для контактів.....	49
2.9.1. Матеріали для рухомих контактів.....	50
2.10. Металокераміка.....	52
2.11. Металеві покриття	54
2.12. Припої	56
2.13. Провідникові вироби	61
<i>Запитання та завдання</i>	72

РОЗДІЛ 3. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Класифікація та галузі застосування діелектричних матеріалів	73
3.2. Властивості діелектричних матеріалів.....	75
3.2.1. Електричні властивості діелектриків.....	75
3.2.2. Механічні властивості діелектриків	83
3.2.3. Теплові властивості діелектриків	84
3.2.4. Фізико-хімічні властивості діелектриків.....	86
3.3. Газоподібні діелектрики	89
3.3.1. Пробій газу в однорідному електричному полі	90
3.3.2. Пробій газу в неоднорідному електричному полі	92
3.4. Рідкі діелектрики	93
3.5. Тверді органічні діелектрики	97
3.5.1. Полімерізаційні синтетичні полімери.....	99
3.5.2. Поліконденсаційні синтетичні полімери	104

3.5.3. Електроізоляційні пластмаси	108
3.5.4. Шаруваті пластики	110
3.5.5. Електроізоляційні плівки	114
3.5.6. Каучуки та гуми	115
3.5.7. Волокнисті діелектрики	116
3.5.8. Лаки й емалі	121
3.5.9. Компаунди.....	124
3.5.10.Клеї та герметики	125
3.5.11.Флюси.....	128
3.6. Неорганічні діелектрики	130
3.6.1. Електротехнічне скло.....	130
3.6.2. Ситали	132
3.6.3. Слюда та слюдопласти	133
3.6.4. Керамічні діелектричні матеріали.....	136
3.7. Активні діелектрики	138
3.8. Рідкі кристали	143
<i>Запитання та завдання</i>	<i>145</i>

РОЗДІЛ 4. НАПІВПРОВІДНИКИ

4.1. Напівпровідникові матеріали та їхні властивості	146
4.2. Утворення енергетичних зон	148
4.3. Електропровідність напівпровідників та її види	150
4.4. Електронно-«дірковий» перехід (<i>p-n</i> -перехід)	154
4.5. Вольт-амперна характеристика напівпровідників	156
4.6. Прості напівпровідники.....	158
4.7. Напівпровідникові хімічні сполуки.....	166
4.7.1. Складні напівпровідники типу $A^{III}B^V$	166
4.7.2. Складні напівпровідники типу $A^{IV}B^{IV}$	170
4.7.3. Складні напівпровідники типу $A^{II}B^{VI}$	170
4.7.4. Складні напівпровідники типу $A^{IV}B^{VI}$	171
4.7.5. Оксидні напівпровідники.....	172
4.7.6. Органічні напівпровідники	173
4.8. Оптичні й фотоелектричні явища в напівпровідниках.....	176
<i>Запитання та завдання</i>	<i>180</i>

РОЗДІЛ 5. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

5.1. Основні характеристики магнітних матеріалів	181
5.2. Магнітом'які матеріали	185
5.3. Магнітотверді матеріали	191
5.4. Матеріали спеціального призначення	194
<i>Запитання та завдання</i>	<i>198</i>

РОЗДІЛ 6. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОГО ВИРОБНИЦТВА

6.1. Матеріали для напівпровідникових інтегральних мікросхем	199
6.2. Матеріали для гібридно-плівкових інтегральних мікросхем	205
6.3. Матеріали для елементів друкованого монтажу	211
<i>Запитання та завдання</i>	<i>216</i>
Додатки	217
Список рекомендованої літератури	221

Навчальний посібник

ПАРЖНИЦЬКИЙ Олександр Вікторович,
АУШЕВА Світлана Володимирівна,
ШУЛЕПІНА Ганна Юріївна

Електроматеріалознавство

Навчальний посібник для здобувачів професійної
(професійно-технічної) освіти

Схвалено для використання в освітньому процесі

Навчальний посібник відповідає Державним санітарним
нормам і правилам «Гігієнічні вимоги
до друкованої продукції для дітей».

У навчальному посібнику з навчальною метою
використано ілюстративні матеріали,
що перебувають у вільному доступі в мережі «Інтернет».

Редактор *С. Залозна*
Художній редактор *О. Андрущенко*
Технічний редактор *Л. Ткаченко*
Комп'ютерна верстка *Г. Нурко*
Коректор *І. Барвінок*

Формат 70×100/16.
Ум. др. арк. 18,144. Обл.-вид. арк. 20,632.
Тираж 20 000 прим.
Зам. №

Видавництво «Грамота».
01033, м. Київ, вул. Паньківська, 25, оф. 15.
Тел./факс: (044) 253-98-04. Електронна адреса: info@gramota.kiev.ua
www.gramota.kiev.ua

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи ДК № 341 від 21.02.2001 р.

Віддруковано в ТОВ «КОНВІ ПРІНТ». 03680, м. Київ, вул. Антона Цедіка, 12.
Свідоцтво ДК № 6115 від 29.03.2018 р.

ISBN 978-966-349-924-6



9 789663 499246 >