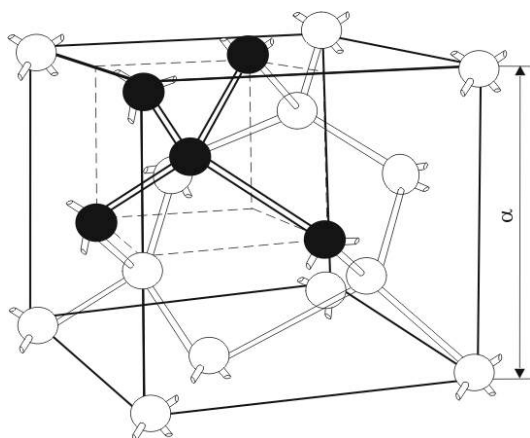


Є.Я. Швець, І.Ф. Червоний, Ю.В. Головка

МАТЕРІАЛИ І КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Запорізька державна інженерна академія

Є.Я. Швець, І.Ф. Червоний, Ю.В. Головка

МАТЕРІАЛИ І КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються
за напрямом підготовки «Мікро- та наноелектроніка»*

Запоріжжя

ЗДІА
2011

*Є.Я. Швець, кандидат технічних наук, професор
І.Ф. Червоний, доктор технічних наук, професор
Ю.В. Головка, кандидат технічних наук, доцент*

Рекомендовано до друку:

вченою радою Запорізької державної інженерної академії (протокол № 6 від 03.02.2011 р.)

Рецензенти:

І.П. Волчок, доктор технічних наук, професор, академік АН ВШУ, завідувач кафедри технології металів Запорізького національного технічного університету;

В.О. Гусев, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронної техніки Севастопольського національного технічного університету;

В.З. Куцова, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана Національної металургійної академії України (м. Дніпропетровськ)

Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В.

Матеріали і компоненти електроніки: навчальний посібник / Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.

ISBN 978-966-8462-47-4

У навчальному посібнику викладаються фізичні принципи, що обумовлюють ті чи інші властивості провідникових, напівпровідникових, діелектричних та магнітних матеріалів електроніки, їхнє застосування в сучасних електронних приладах, а також параметри і характеристики основних пасивних компонентів електроніки. Розглянуті як традиційні матеріали для вакуумних, твердотілих і функціональних електронних приладів та інтегральних мікросхем, так і новітні перспективні матеріали, зокрема органічні провідникові й напівпровідникові сполуки для оптоелектроніки і сонячної енергетики, наноструктури.

В посібнику наведені контрольні питання для самоперевірки самостійної роботи студентів, задачі з прикладами їх розв'язання та тести для визначення рівня засвоєння студентами матеріалу навчальної дисципліни.

Навчальний посібник призначений для студентів, що навчаються за напрямом «Мікро- та наноелектроніка», і розроблений на кафедрі «Фізична та біомедична електроніка» Запорізької державної інженерної академії.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Мікро- та наноелектроніка». Гриф № 1/11-4867 від 15.06.2011 р.

Табл. – 25, рис. – 89, бібл. – 22 назви.

ISBN 978-966-8462-47-4

Головка Ю.В., 2011

© Швець Є.Я., Червоний І.Ф.,

Зміст

Вступ.....	6
Глава 1. Загальні відомості про матеріали електроніки та їх класифікація.....	7
1.1. Види хімічного зв'язку.....	7
1.2. Будова твердих тіл.....	10
1.3. Елементи зонної теорії твердого тіла.....	12
1.4. Класифікація матеріалів електроніки.....	17
Питання для самоперевірки.....	19
Глава 2. Провідникові матеріали.....	20
2.1. Електрична провідність металів.....	20
2.2. Електричні властивості металевих сплавів.....	24
2.3. Опір провідників на високих частотах.....	26
2.4. Опір тонких металевих плівок.....	27
2.5. Контактні явища і терморушійна сила.....	27
2.6. Надпровідність.....	31
2.7. Класифікація провідникових матеріалів.....	32
2.8. Матеріали високої провідності.....	32
2.9. Сплави високого опору та сплави для термопар.....	38
2.10. Метали і сплави різного призначення.....	40
2.11. Неметалічні провідникові матеріали.....	45
2.12. Полімерні провідники.....	47
Питання для самоперевірки і задачі.....	48
Глава 3. Напівпровідникові матеріали.....	53
3.1. Власні та домішкові напівпровідники.....	53
3.2. Провідність напівпровідників.....	61
3.3. Оптичні й фотоелектричні явища в напівпровідниках.....	64
3.4. Термоелектричні явища та ефект Хола у напівпровідниках....	69
3.5. Електропровідність напівпровідників в сильному електричному полі.....	71
3.6. Класифікація напівпровідникових матеріалів.....	71
3.7. Елементарні напівпровідники.....	73
3.8. Напівпровідникові сполуки $A^{IV}B^{IV}$	81
3.9. Напівпровідникові сполуки $A^{III}B^V$	82
3.10. Напівпровідникові сполуки $A^{II}B^{VI}$	87
3.11. Напівпровідникові сполуки $A^{IV}B^{VI}$	88
3.12. Напівпровідникові матеріали для сонячних батарей.....	90

Питання для самоперевірки і задачі	93
Глава 4. Діелектричні матеріали	96
4.1. Поляризація діелектриків.....	96
4.2. Поляризаційні струми і електропровідність діелектриків.....	102
4.3. Втрати в діелектриках.....	106
4.4. Пробій діелектриків.....	109
4.5. Класифікація діелектричних матеріалів.....	112
4.6. Електроізоляційні полімери.....	113
4.7. Композиційні пластмаси і шаруваті пластики.....	117
4.8. Електроізоляційні компаунди.....	118
4.9. Неорганічні стекла.....	119
4.10. Ситали.....	123
4.11. Кераміка.....	124
4.12. Активні діелектрики.....	126
4.12.1. Сегнетоелектрики.....	127
4.12.2. П'єзоелектрики.....	132
4.12.3. Піроелектрики.....	135
4.12.4. Електрети.....	137
4.12.5. Рідкі кристали.....	138
4.12.6. Матеріали для твердотільних лазерів.....	139
Питання для самоперевірки і задачі	142
Глава 5. Магнітні матеріали	146
5.1. Класифікація речовин за магнітними властивостями.....	146
5.2. Процеси при намагнічуванні феро- і феримагнетиків.....	150
5.3. Поводження феромагнетиків у змінних магнітних полях.....	155
5.4. Доменні структури в тонких магнітних плівках.....	158
5.5. Класифікація магнітних матеріалів.....	160
5.6. Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів.....	162
5.7. Магнітом'які високочастотні матеріали.....	165
5.8. Магнітні матеріали спеціалізованого призначення.....	169
5.9. Магнітотверді матеріали.....	173
Питання для самоперевірки і задачі.....	177
Глава 6. Резистори	182
6.1. Основні параметри резисторів.....	182
6.2. Класифікація резисторів.....	185
6.3. Резистори постійного опору.....	186
6.4. Терморезистори.....	188
6.5. Варістори.....	189

6.6. Маркування резисторів.....	191
6.7. Конструкції та монтаж резисторів.....	194
6.8. Можливі несправності резисторів.....	197
Питання для самоперевірки і задачі.....	197
Глава 7. Конденсатори.....	199
7.1. Класифікація конденсаторів.....	200
7.2. Маркування конденсаторів.....	209
7.3. Основні електричні параметри й характеристики конденсаторів.....	209
7.4. Вплив на конденсатори експлуатаційних факторів.....	217
Питання для самоперевірки і задачі.....	220
Глава 8. Індуктивні компоненти.....	222
8.1. Котушки індуктивності.....	222
8.2. Дроселі.....	236
8.3. Трансформатори низької частоти.....	239
Питання для самоперевірки і задачі.....	243
Глава 9. Комутаційні компоненти.....	245
9.1. Електричні роз'єми.....	247
9.2. Перемикачі.....	249
9.3. П'єзокерамічні комутаційні елементи.....	253
9.4. Реле.....	255
9.5. Геркони.....	258
Питання для самоперевірки.....	261
Тести.....	262
Рекомендована література.....	270
Список основних позначень.....	272
Фізичні постійні.....	274
Предметний покажчик.....	275

Вступ

Курс “Матеріали і компоненти електроніки” є базовим для таких дисциплін спеціальності “Мікро - та наноелектроніка”, як “Фізика електронних процесів”, “Технологічні основи електроніки”, “Твердотіла електроніка”, “Мікрохвильова техніка”, “Оптоелектроніка”. Вивчення цього курсу ознайомлює студентів з широкою номенклатурою використовуваних в електронних пристроях компонентів і матеріалів та різноманітністю їх властивостей. Знання властивостей компонентів і матеріалів та вміння застосовувати їх на практиці є необхідним фахівцям з мікроелектроніки та нанотехнологій.

Сукупність науково-технічних знань про фізико-хімічну природу, методи дослідження й виготовлення різних матеріалів та компонентів електроніки дозволяють цілеспрямовано створювати нові матеріали із заздалегідь заданими властивостями, розвивати нанотехнології та нові компоненти на їх основі.

Метою курсу “Матеріали і компоненти електроніки” є формування в студентів фізичного та інженерного підходів до вибору компонентів і матеріалів для конкретного електронного приладу, розуміння переваг, недоліків та меж ефективного використання обраних компонентів і матеріалів.

Призначення даного навчального посібника - спрямувати самостійну роботу студентів по вивченню курсу, сприяти розвитку їх творчих здібностей, а також розвинення навиків практичного використання одержаних теоретичних знань. Розв’язання задач і відповіді на поставлені в посібнику контрольні запитання сприятимуть розвитку в студентів навичок практичного застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні цієї та попередніх дисциплін, дозволити глибше зрозуміти фізичну сутність процесів і явищ у матеріалах, закріпити в пам’яті основні формули й визначення, а також значення або порядок величин найважливіших параметрів матеріалів і компонентів електроніки.

Глава 1. Загальні відомості про матеріали електроніки та їх класифікація

1.1 Види хімічного зв'язку

Основними елементарними частинками, з яких побудовані всі відомі нам речовини, є протони, нейтрони й електрони. Із протонів і нейтронів складаються атомні ядра; електрони заповнюють оболонки атома, компенсуючи позитивний заряд ядра.

Гази, рідкі й тверді тіла можуть складатися з атомів, молекул або іонів. При зближенні атомів до відстані порядку декількох ангстрем між ними проявляються сили взаємодії. Залежно від характеру руху електронів у сусідніх атомах ці сили можуть бути силами відштовхування або притягання. Електрони внутрішніх повністю заповнених оболонок міцно пов'язані з ядром і не беруть участь в утворенні хімічних зв'язків. Хімічні властивості атомів визначаються будовою зовнішньої, не повністю заповненої електронами, оболонки. Електрони, що перебувають у зовнішній оболонці, називають валентними.

Розрізняють кілька видів хімічного зв'язку.

Гомеополярним (ковалентним) називають зв'язок, що утворюється в речовині шляхом об'єднання атомів у молекулу або кристал за рахунок електронів, які стають загальними для пар атомів.

Гомеополярні зв'язки певним чином орієнтовані в просторі й утворюються тільки між найближчими сусідніми атомами.

Молекули з гомеополярним зв'язком, у яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, називають неполярними. Якщо ж у молекулах центри протилежних за знаком зарядів не збігаються й перебувають на деякій відстані один від одного, то такі молекули називають полярними або дипольними (рис. 1.1).

Дипольна молекула характеризується дипольним моментом p , що визначається добутком заряду e на відстань між центрами позитивних і негативних зарядів l : $p = e \cdot l$. Заряд електрона $e \approx 2 \cdot 10^{-19}$ Кл, відстань $l \sim 10^{-10}$ м. Тому звичайно дипольні моменти молекул $p = 5 \cdot 10^{-29} \dots 10^{-30}$ Кл·м.

Гомеополярний зв'язок є типовим для органічних молекул і спостерігається також у твердих речовинах неорганічного походження, якщо їх кристалічна решітка складається з атомів.

Прикладами подібних речовин є алмаз, кремній, германій, карбід кремнію (SiC) та інші.

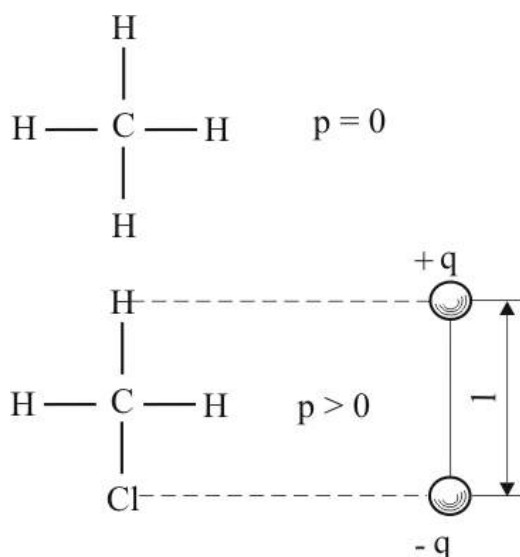


Рисунок 1.1 - Приклади неполярної (симетричної) і полярної (несиметричної) молекул

В структурі алмазу (рис. 1.2) кожний атом утворює по чотири ковалентні зв'язки зі своїми найближчими сусідами.

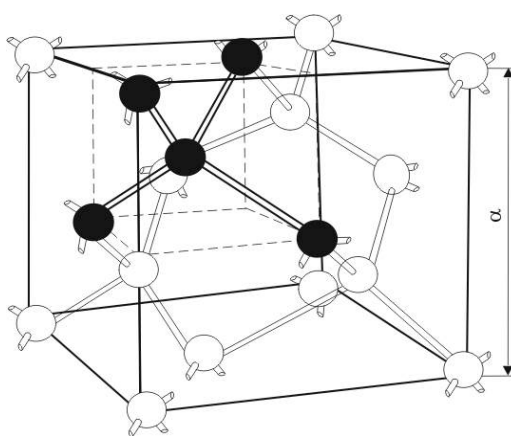


Рисунок 1.2 - Структура алмазу (германію, кремнію)

Ковалентний зв'язок характеризується високою міцністю, внаслідок чого такі речовини як алмаз, кремній та карбід кремнію характеризуються високою твердістю та високою температурою плавлення.

Гетерополярним (іонним) називають зв'язок, що виникає внаслідок переходу валентних електронів від металевого атома до металоїдного і електростатичного притягання різнойменно заряджених іонів.

Цей вид хімічного зв'язку реалізується в іонних кристалах. Типовим прикладом іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів (рис. 1.3).

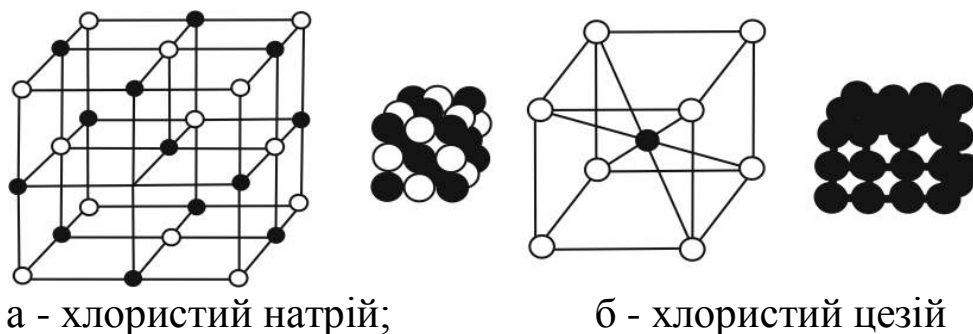
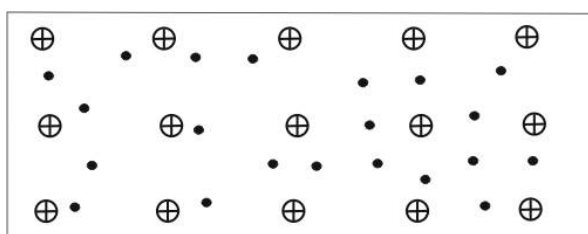


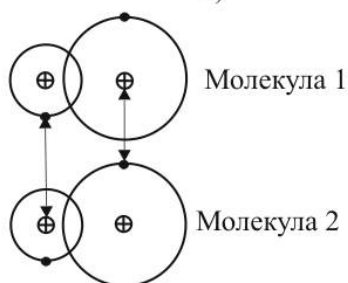
Рисунок 1.3 - Структура іонних кристалів

Іонні решітки характеризуються високим координаційним числом, яке показує кількість найближчих іонів протилежного знака. Наприклад, для кристалів NaCl координаційне число дорівнює 6, а для кристалів CsCl - 8. Весь монокристал іонної сполуки можна вважати однією гігантською молекулою, у якій кожний іон відчуває сильний вплив з боку всіх сусідніх частинок.

Металевий зв'язок існує в системах, побудованих як остов з позитивних іонів, що перебувають у середовищі вільних колективізованих електронів (рис. 1.4,а), яке називають електронним газом.



а)



б)

а - схема будови металевого кристалу;
б – схема утворення міжмолекулярного зв'язку Ван-дер-Ваальса
Рисунок 1.4 – Схеми міжатомних зв'язків

Притягання між позитивно зарядженим остовом й електронами обумовлює цілісність металу. В утворенні колективу вільних електронів беруть участь усі атоми кристала, причому електрони не локалізуються поблизу своїх атомів, а вільно переміщуються усередині всього об'єму решітки, утворюючи «електронний газ».

Не маючи локалізованих зв'язків, металеві кристали (на відміну від іонних) не руйнуються при зміні положень атомів, тобто їм властива пластичність (ковкість) при деформаціях. Завдяки наявності вільних електронів метали мають високі електро- і теплопровідність.

Молекулярний зв'язок, або зв'язок Ван-дер-Ваальса, спостерігається в речовинах з ковалентним характером внутрішньо-молекулярної взаємодії. Наявність притягання між молекулами в цьому випадку можливо при погодженому русі валентних електронів у сусідніх молекулах (рис. 1.4,б).

Зв'язок Ван-дер-Ваальса є найбільш універсальним, але й найбільш слабким зв'язком, енергія якого приблизно на два порядки нижче енергій іонного або ковалентного зв'язків. Тому молекулярні кристали мають низькі температури плавлення (наприклад, у парафіну $T_{пл} = 50...52^{\circ}C$).

1.2 Будова твердих тіл

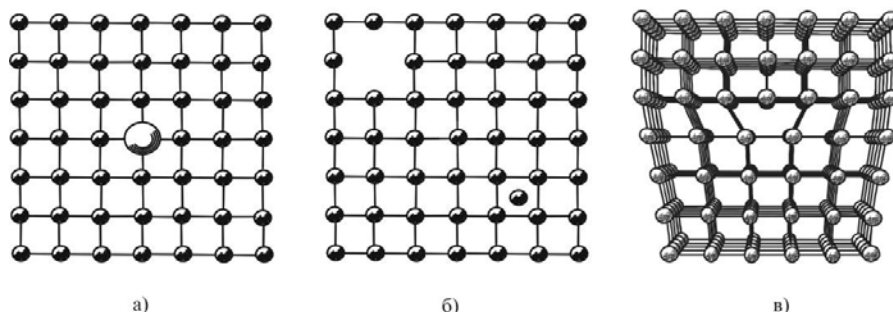
Більшість матеріалів електроніки є твердими тілами.

Кристали – це тверді тіла, в яких частинки (атоми, іони або молекули) розподілені в просторі періодично, утворюючи кристалічну решітку. Періодичність структури обумовлює періодичне потенційне поле кристалів.

Дефекти в будові кристалічних тіл. Кристалів з ідеально правильною будовою в природі не існує. У реальних умовах завжди спостерігаються ті або інші відхилення від регулярного розташування частинок. Такі відхилення прийнято називати дефектами структури. Їх умовно підрозділяють на динамічні (тимчасові) і статичні (постійні). Динамічні дефекти виникають при механічних, теплових або електромагнітних впливах на кристал, при проходженні через нього потоку частинок високої енергії й т.п. Найпоширенішим видом динамічних дефектів є фонони - тимчасові порушення регулярності решітки, викликані тепловим рухом атомів.

Серед статичних дефектів розрізняють атомні (точкові) і протяжні недосконалості структури. Атомні дефекти можуть

проявлятися у вигляді незайнятих вузлів решітки (**вакансій**), у вигляді зміщення атома з вузла в міжвузлове положення (рис. 1.5,б), у вигляді впровадження в решітку чужорідного атома або іона (рис. 1.5,а).



а - сторонній атом у вузлі решітки; б - порожній вузол (вакансія); в - перспективне зображення розташування атомів біля крайової дислокації

Рисунок 1.5 - Дефекти кристалічної решітки

До протяжних дефектів відносяться дислокації, дефекти укладки, границі зерен або двійників, пори, тріщини, мікрровключення іншої фази. Слово «дислокація» у перекладі означає «зміщення». Найпростішими видами дислокацій є крайова (рис. 1.5,в) й гвинтова дислокації. Хоча відносна концентрація атомних дефектів може бути невеликою, але вони можуть призводити до величезних змін фізичних властивостей кристала. Наприклад, тисячні частки атомного відсотка деяких домішок можуть змінювати електричний опір чистих напівпровідникових кристалів в $10^5 \dots 10^6$ разів. Протяжні дефекти структури впливають на механічні властивості кристалів.

Поліморфізм. Деякі тверді речовини здатні утворювати не одну, а дві й більше кристалічних структур, що є стійкими при різних температурах і тисках. Таку властивість матеріалів називають поліморфізмом, а кристалічні структури, що відповідають їм, називають поліморфними формами або алотропними модифікаціями речовини. Поліморфізм широко розповсюджений серед матеріалів і має важливе значення для їхньої обробки й експлуатації.

Практичний інтерес має поліморфізм вуглецю – існування його у вигляді алмазу (див. рис. 1.2), який є напівпровідниковим матеріалом, та графіту, який є провідниковим матеріалом. У звичайних умовах графіт є більш стійкою модифікацією, ніж алмаз. Однак при підвищенні тиску стійкість алмазу зростає, а графіту

падає, і при досить високих тисках алмаз стає більше стійким. Якщо при цьому підвищити температуру, щоб збільшити рухливість атомів, то графіт можна перевести в алмаз. На цьому принципі засноване виготовлення штучних алмазів. Синтез проводять під тиском порядку 10^{10} Па при температурі на рівні 2000 °С. Виготовлені в такий спосіб штучні алмази мають більш високу міцність і твердість, ніж природні кристали.

Скло та аморфні тіла. Кристалічний стан більшості твердих тіл є природним, тому що вільна енергія при впорядкованому розташуванні атомів мінімальна. Однак через різке зменшення швидкості дифузії атомів при охолодженні розташовуванню затвердіння в процесі затвердіння можуть утворюватися тіла з випадковим хаотичним розташуванням частинок, які називають аморфними. На відміну від кристалів аморфні тіла ізотропні за властивостями, не мають певної температури плавлення й характеризуються досить широким температурним інтервалом розм'якшення. Прикладом аморфних речовин є скло й різноманітні пластики. Склоподібний стан характеризується дуже високою в'язкістю, що й обмежує дифузійну активність атомів і перешкоджає утворенню кристалічної фази. Однак такий стан є термодинамічно нестійким. Тому при відпалі може відбуватися «розскловування» матеріалу, тобто перехід у більш стійкий кристалічний стан.

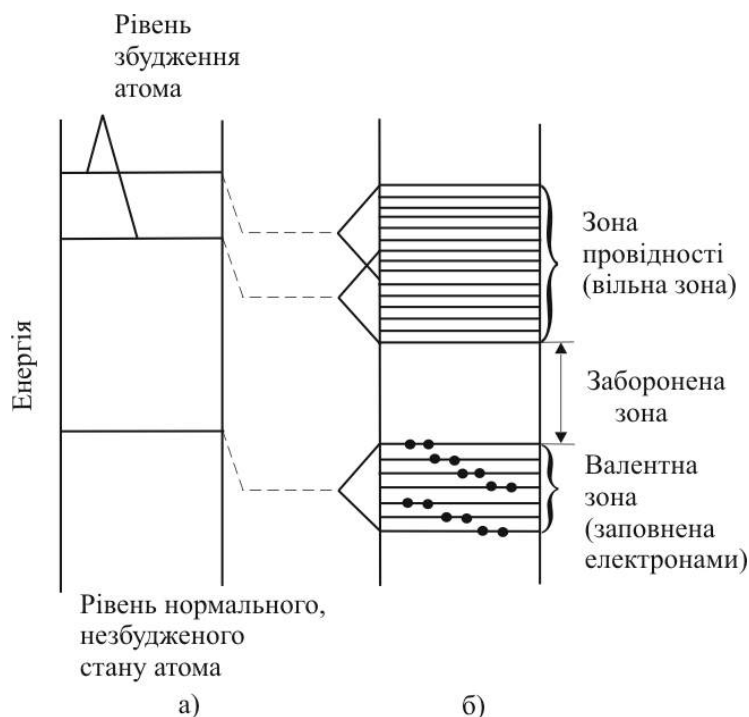
1.3 Елементи зонної теорії твердого тіла

Зонна теорія твердого тіла - це теорія валентних електронів, що рухаються в періодичному потенційному полі кристалічної решітки.

Окремі атоми мають дискретний енергетичний спектр, тобто електрони можуть займати лише цілком певні енергетичні рівні. Частина цих рівнів заповнена при нормальному, не збудженому, стані атома. На інших рівнях електрони можуть перебувати тільки тоді, коли на атом діє зовнішній енергетичний вплив, тобто коли він збуджений (рис. 1.6,а).

Якщо атоми знаходяться на достатньо великих відстанях один від одного (наприклад, газоподібна речовина), то взаємодія між атомами практично відсутня і енергетичні рівні електронів залишаються без змін. При утворенні кристалічної решітки всі наявні електронні рівні (як заповнені електронами, так і незаповнені) зміщуються внаслідок взаємодії сусідніх атомів. В результаті

дискретні енергетичні рівні ізольованого атома розщеплюються в енергетичні зони (рис. 1.6,б).



а - відокремлений атом; б - неметалічне тверде тіло

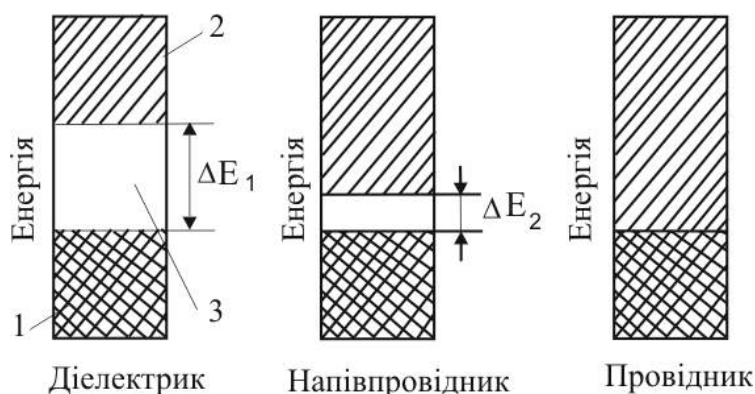
Рисунок 1.6 - Енергетичні діаграми при абсолютному нулі температури

Завдяки обмінній взаємодії електрони можуть без зміни енергії за допомогою обміну переходити від одного атома до іншого, тобто переміщуватися по кристалу.

Енергетичні зони. Обмінна взаємодія має чисто квантову природу і є наслідком нерозрізненності електронів. Дозволені енергетичні зони розділені забороненими інтервалами енергії. Ширина дозволених енергетичних зон не залежить від розмірів кристала, а визначається лише природою атомів, що утворюють тверде тіло, і симетрією кристалічної решітки. Кількість енергетичних рівнів в зоні визначається числом атомів, що входять до твердого тіла. А це значить, що в кристалі кінцевих розмірів відстань між рівнями зворотно пропорційна числу атомів. У кристалі об'ємом в 1 см^3 міститься $10^{22} \dots 10^{23}$ атомів, а рівні в зоні відстоять один від одного по енергії на $10^{-22} \dots 10^{-23}$ еВ, тобто енергетична зона характеризується квазібезперервним спектром. Мізерно малого енергетичного впливу досить, щоб викликати перехід електронів з одного рівня на іншій, якщо там є вільні стани.

Розподіл електронів. Відповідно до принципу Паулі в кожному атомному стані може перебувати не більше одного електрона. Тому число електронних станів у зоні виявляється кінцевим і дорівнює числу відповідних атомних станів. Кінцевим виявляється й число електронів, що заповнюють дану енергетичну зону. Енергетичні зони можуть бути повністю заповненими, частково заповненими й вільними. Внутрішні оболонки в ізолюваних атомах заповнені, тому відповідні їм зони також виявляються заповненими. Найверхню із заповнених електронами зон називають валентною (див. рис. 1.6,б). Ця зона відповідає енергетичним рівням електронів зовнішньої оболонки в ізолюваних атомах. Найближчу до неї вільну, незаповнену електронами, зону називають зоною провідності. Взаємне положення цих двох зон визначає більшість процесів, що відбуваються у твердому тілі.

Висновки зонної теорії. Характер енергетичного спектра провідників, напівпровідників і діелектриків істотно різний. У металевих провідниках валентна зона заповнена не повністю або перекривається із зоною провідності (рис. 1.7). У напівпровідниках і діелектриках зона провідності й валентна зона розділені енергетичним зазором, названим забороненою зоною.



1 – заповнена електронами зона; 2 – зона вільних енергетичних рівнів; 3 – заборонена зона шириною ΔE

Рисунок 1.7 – Схема енергетичних зон твердих тіл

Електрони валентної зони мають практично однакову свободу руху у всіх твердих тілах незалежно від того, чи є вони металами або діелектриками. Рух здійснюється шляхом тунельного переходу електронів від атома до атома. Зовнішнє електричне поле порушує симетрію в розподілі електронів за швидкостями, прискорюючи електрони, що рухаються в напрямку діючих електричних сил, і

сповільнюючи частинки із протилежно спрямованим імпульсом. Однак прискорення або уповільнення пов'язане зі зміною енергії електронів, що повинно супроводжуватися переходом їх у нові квантові стани. Такі переходи можуть здійснюватися лише за умови наявності в енергетичній зоні вільних рівнів. Додаткова енергія, що здобувається електронами на довжині вільного пробігу під дією електричного поля, дорівнює $10^{-8} \dots 10^{-4}$ еВ, тобто набагато перевершує відстань між підрівнями в зоні.

У металах, де зона не повністю укомплектована електронами, навіть слабе поле надає електронам достатній імпульс для їхнього переходу на прилеглі вільні рівні. Тому метали є хорошими провідниками електричного струму при будь-якій температурі.

У напівпровідниках і діелектриках при температурі 0 К всі електрони перебувають у валентній зоні, і вона є повністю заповненою (див. рис. 1.7,б). Електрони зони не можуть приймати участі в створенні електричного струму. Зона провідності абсолютно вільна. Для появи електропровідності необхідно частину електронів перевести з валентної зони в зону провідності. Енергії електричного поля (за винятком дуже сильних полів, коли починається електричний пробій) не достатньо для здійснення такого переходу, потрібно більш сильний енергетичний вплив, наприклад, нагрівання твердого тіла.

Теплова енергія нерівномірно розподіляється між частинками. У кожний момент часу є невелике число атомів, у яких амплітуда й енергія теплових коливань значно перевищують середнє значення. У процесі теплових коливань атоми можуть передати електронам частину теплової енергії. В результаті деякі з електронів можуть перейти з валентної зони в зону провідності. Чим вище температура й вужче заборонена зона, тим вище інтенсивність міжзонних переходів. У діелектриків заборонена зона настільки велика, що електронна електропровідність в них не відіграє визначальної ролі.

При кожному акті переходу електронів у зону провідності з'являються вільні енергетичні рівні валентної зони, називані «дірками». При наявності дірок електрони валентної зони можуть здійснювати естафетні переходи з рівня на рівень. У електричному полі дірка рухається протилежно руху електрона, тобто поводить себе як деяка квазічастинка з позитивним зарядом. Таким чином, дірки забезпечують участь валентних електронів у процесі електропровідності.

Процес переходу електронів у вільний стан супроводжується й зворотним явищем, тобто поверненням електронів у нормальний стан. У результаті в речовині при будь-якій температурі встановлюється динамічна рівновага, тобто кількість електронів, що переходять у вільну зону, стає рівною кількості електронів, що повертаються назад у валентну зону. З підвищенням температури число вільних електронів у напівпровіднику зростає, а зі зниженням температури до абсолютного нуля - зменшується аж до нуля.

Виходить, речовина, що при одних температурах поводить себе як ізолятор, при інших, більш високих, здобуває провідність. Розходження між провідностями двох типів матеріалів (металів і неметалів) є найбільш значним при температурах, що наближаються до абсолютного нуля; розходження ж між двома класами неметалів (напівпровідниками й діелектриками) зникає при наближенні температури до абсолютного нуля.

Енергію, необхідну напівпровіднику або діелектрику для переходу електрона у вільний стан чи для утворення дірки, може дати не тільки тепло, але й інші джерела енергії, наприклад, поглинена матеріалом енергія світла, потоку електронів або ядерних частинок, енергія електричних полів, механічна енергія й т.інш. Збільшення ж числа вільних електронів або дірок під впливом якого-небудь виду енергії сприяє підвищенню електропровідності, збільшенню струму, появі електрорушійних сил в напівпровіднику або діелектрику.

Домішки й точкові дефекти, що порушують періодичність структури, створюють особливі енергетичні рівні, які розташовуються в забороненій зоні ідеального кристала. Якщо домішкові атоми або дефекти розташовані досить далеко один від одного, то взаємодія між ними відсутня, а відповідні їм енергетичні рівні є дискретними і локалізованими в певному місці решітки, тобто на дефекті структури. При високій концентрації домішкових атомів відстані між ними стають порівняними з розмірами атомів, електронні оболонки найближчих атомів домішки перекриваються, їх дискретні енергетичні рівні розщеплюються в енергетичну зону домішкових станів, здатну забезпечити провідність, якщо не всі рівні в цій зоні заповнені електронами.

Підбиваючи підсумок, варто підкреслити, що зонна теорія строго застосовна тільки до твердих тіл з ковалентними або металевими зв'язками.

1.4 Класифікація матеріалів електроніки

Матеріали, використовувані в електроніці, підрозділяють на електротехнічні, конструкційні й спеціального призначення (рис. 1.8).

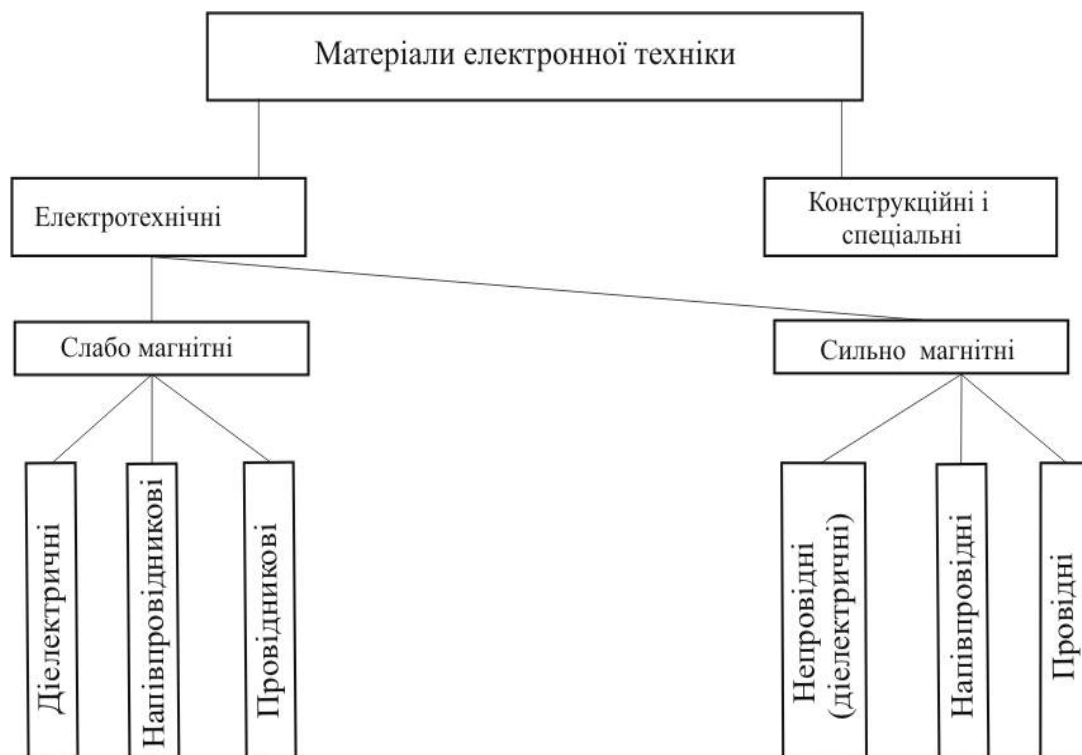


Рисунок 1.8 - Класифікація матеріалів електроніки

Електротехнічними називають матеріали, що мають певні властивості стосовно електромагнітного поля й застосовувані в техніці з урахуванням цих властивостей.

Практично всі матеріали піддаються впливам як окремо електричних або магнітних полів, так і їхньої сукупності. За поведінням в магнітному полі електротехнічні матеріали підрозділяють на сильномагнітні (магнетики) і слабомагнітні. Перші знайшли особливо широке застосування в техніці завдяки їхнім магнітним властивостям. Більшість електротехнічних матеріалів можна віднести до слабомагнітних або практично немагнітних.

За поведінням в електричному полі матеріали підрозділяють на провідникові, напівпровідникові й діелектричні.

Провідниковими матеріалами I роду називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є провідність вільних електронів. Їхнє застосування в техніці обумовлено в основному

високою питомою електричною провідністю при нормальній температурі.

Умовно до провідників відносять матеріали з питомим електричним опором $\rho \leq 10^{-5}$ Ом·м. Хорошими провідниками електричного струму є метали. Зі 105 хімічних елементів лише 25 є неметалами.

Напівпровідниковими називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є електронно-діркова провідність.

Напівпровідники за величиною питомої провідності є проміжними між провідниковими й діелектричними матеріалами. Питомий опір напівпровідників залежно від будови й хімічного складу матеріалів, а також від умов їхньої експлуатації може змінюватися в межах $10^{-5} \dots 10^8$ Ом·м, однак питомий опір деяких напівпровідників може бути великим і навіть більшим, ніж у широко застосовуваних діелектриків. Характерною властивістю напівпровідників є сильна залежність питомої провідності від концентрації й виду домішок або різних дефектів, а також у більшості випадків - від зовнішніх енергетичних впливів (температури, освітленості й т.інш.).

Діелектричними називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є іонна провідність. До діелектриків відносять матеріали, у яких $\rho > 10^8$ Ом·м.

Чітку границю між значеннями питомого опору різних класів матеріалів провести досить складно. Наприклад, діелектрики при сильному нагріванні можуть проявляти властивості напівпровідників. Однак для металів провідний стан є основним, а для напівпровідників і діелектриків - збудженим.

При застосуванні діелектриків досить чітко визначилася необхідність використання як пасивних, так і активних властивостей цих матеріалів. Електроізоляційними (пасивними) називають діелектрики, які не допускають витоку електричних зарядів, тобто з їхньою допомогою відокремлюють електричні ланцюги один від одного або струмоведучі частини пристроїв, приладів і апаратів від провідних, але не струмоведучих частин (від корпусу, від землі). Активними (керованими) діелектриками є сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики, електролюмінофори, матеріали для випромінювачів і затворів у лазерній техніці, електрети та інші.

Питання для самоперевірки

1. Які основні види хімічного зв'язку є в матеріалах і чим вони обумовлені?
2. У чому розходження між монокристаллами, полікристалічними й аморфними речовинами?
3. Наведіть приклади точкових і протяжних дефектів структури в реальних кристалах.
4. Що таке поліморфізм? Наведіть приклади поліморфних речовин.
5. Чому при утворенні твердого тіла енергетичні рівні атомів розщеплюються в енергетичні зони?
6. Від чого залежить ширина дозволеної зони й число рівнів у ній?
8. Чим розрізняються зонні структури провідника, напівпровідника й діелектрика та в чому розходження механізмів їхньої електропровідності?
9. Які характерні властивості напівпровідників суттєво відрізняють їх від провідників і діелектриків?
10. Наведіть загальну класифікацію матеріалів, використовуваних в електронній техніці.
11. Які матеріали називають електротехнічними?
12. Як підрозділяють матеріали за їх поведінкою в електричному полі?
13. Як підрозділяють матеріали за їх поведінкою в магнітному полі?
14. Які матеріали називають провідниками, а які - напівпровідниками?
15. Які матеріали називають діелектриками?
16. Які матеріали вважають пасивними, а які - активними діелектриками?

Глава 2 Провідникові матеріали

В якості провідників електричного струму в техніці використовують тверді тіла, рідини і гази. В електронній техніці основним типом використовуваних провідників є метали в твердому стані.

Твердими провідниками першого роду є метали, металеві сплави та деякі модифікації вуглецю.

Рідкими провідниками першого роду є розплавлені метали. З усіх металів низьку температуру плавлення мають тільки ртуть (- 39 °С) та галій (29,8 °С). Всі інші метали мають підвищену або високу температуру плавлення. Як вже розглядалося в п. 1.3, протікання струму в провідниках першого роду обумовлено рухом вільних електронів.

Рідкими провідниками другого роду є електроліти, механізм протікання струму в яких обумовлений рухом позитивних та негативних іонів. При протіканні струму в електролітах на електродах виділяються продукти електролізу, а склад електроліта поступово змінюється. Електролітами є розчини кислот, луг та солей, а також розплави іонних сполук.

Усі гази та пари, навіть пари металів, в неіонізованому стані не є провідниками. Але якщо напруженість електричного поля перевищує критичну для даного газу величину, починається його іонізація. Механізм протікання струму в іонізованому газі обумовлений рухом вільних електронів та позитивних іонів.

2.1 Електрична провідність металів

В слабких і середніх електричних полях провідність металів визначається законом Ома, згідно з яким питомі провідність γ

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{env}{E} \quad (2.1)$$

де ρ - питомий опір, Ом·м; e - заряд електрона, Кл; n - концентрація електронів, м⁻³; v - швидкість дрейфу носіїв заряду, м·с⁻¹; E - напруженість електричного поля, В·м⁻¹.

При температурах, відмінних від абсолютного нуля, електрони здійснюють тепловий рух внаслідок зіткнень з іонами, що

розташовані в вузлах кристалічної решітки. У проміжках між зіткненнями з вузлами решітки електрони під впливом електричного поля рухаються із прискоренням

$$a = eE / m_0. \quad (2.2)$$

де a – прискорення, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$; m_0 – маса спокою електрона, г.

Максимальна швидкість дрейфу v_{max} , що здобувається електронем до кінця вільного пробігу,

$$v_{\text{max}} = a\tau_0, \quad (2.3)$$

де τ_0 – час вільного пробігу, с.

Після зіткнення для більшості електронів швидкість спрямованого руху падає до нуля, тобто накопичена кінетична енергія передається іонам решітки. Тому середнє значення швидкості дрейфу за час вільного пробігу дорівнює половині максимального:

$$\bar{v} = \frac{eE}{2m_0} \tau_0 \quad (2.4)$$

Електрони в металі переносять не тільки електричний заряд, але й вирівнюють у ньому температуру, забезпечуючи високу теплопровідність. Завдяки високій концентрації вільних електронів, електронна теплопровідність переважає над іншими механізмами переносу теплоти. Відповідно до атомно-кінетичної теорії ідеального газу співвідношення між електронною теплопровідністю κ та електропровідністю γ може бути записана у вигляді

$$\frac{\kappa}{\gamma} = \frac{3k^2T}{e^2} = L_0T; \quad L_0 = \frac{3k^2}{e^2}. \quad (2.5)$$

де k – константа Больцмана, $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$; T – температура, К; L_0 – константа, $\text{В}^2 \cdot \text{К}^{-2}$, що дістала назву числа Лоренца.

З виразу (2.5) випливає, що хороші провідники електричного струму є й хорошими провідниками теплоти.

Концентрація вільних електронів у чистих металах n дуже слабо залежить від температури. Тому провідність визначається в основному середньою довжиною вільного пробігу електронів, яка

залежить від будови провідника, тобто хімічної природи атомів і типу кристалічної решітки.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) – відносна зміна опору зразка матеріалу при зміні температури навколишнього середовища на 1°C :

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)}, \quad (2.6)$$

де α_R – ТКО, K^{-1} ; R_i – опір, Ом, при температурі T_i , К.

ТКО може змінюватися в інтервалі температур.

Температурний коефіцієнт опору α_R і температурний коефіцієнт питомого опору α_ρ

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(T_2 - T_1)} \quad (2.7)$$

пов'язані з температурним коефіцієнтом лінійного розширення матеріалу α_l :

$$\alpha_l = \alpha_\rho - \alpha_R. \quad (2.8)$$

Електричний опір металів залежить не тільки від температури, а й від розсіювання електронів провідності на статичних дефектах структури, які так само, як теплові коливання вузлів решітки, також порушують періодичність потенційного поля кристала. Розсіювання на статичних дефектах структури не залежить від температури. Тому в міру наближення температури до абсолютного нуля опір реальних металів прагне до деякого постійного значення, названого залишковим опором. Звідси випливає правило Матусена про аддитивність питомого опору:

$$\rho = \rho_T + \rho_z, \quad (2.9)$$

де ρ_T – питомий опір, обумовлений розсіюванням електронів на теплових коливаннях решітки, Ом·м; ρ_z - залишковий питомий опір, пов'язаний з розсіюванням електронів на неоднорідностях структури, Ом·м.

Для чистого металу в недеформованому стані при $T = 300\text{ K}$ $\rho \approx \rho_T$.

Поблизу температури абсолютного нуля повний опір реального металічного провідника дорівнює його залишковому опором. Виключення із цього правила становлять надпровідні метали, у яких нижче деякої критичної температури опір практично зникає.

Найбільш істотний внесок у залишковий опір вносить розсіювання на забруднюючих або легуючих (тобто навмисно введених) домішках. Будь-яка добавка призводить до підвищення ρ , навіть якщо вона має підвищену провідність у порівнянні з основним металом. Так, введення в мідь 0,01 атомної частки домішки срібла викликає збільшення питомого опору міді на 0,002 мкОм·м. Експериментально встановлено, що при малому вмісті домішок питомий опір зростає пропорційно концентрації домішкових атомів.

Для одновалентних металів, згідно з правилом Лінде, зміна залишкового опору на 1 ат. % домішки

$$\Delta\rho_3 = b(\Delta Z)^2, \quad (2.10)$$

де ΔZ - різниця валентностей метала-розчинника і атома домішки; b – константа, однакова для атомів домішок, що належать до одного періода Періодичної системи хімічних елементів, Ом·м.

Залишковий опір лінійно залежить від концентрації x атомів домішки:

$$\rho = \rho_T + \rho_3 = \rho_T + b(\Delta Z)^2 x. \quad (2.11)$$

Внесок у залишковий опір вносять й власні дефекти структури – вакансії, міжвузлові атоми, дислокації, границі зерен. Концентрація точкових дефектів експоненційно зростає з температурою й може досягати високих значень поблизу точки плавлення. При всебічному стиску в більшості металів питомий опір зменшується внаслідок зближення атомів і зменшення амплітуди теплових коливань решітки; при пружному розтяганні й крутінні міжатомні відстані збільшуються, міжатомний зв'язок послаблюється, в результаті амплітуди теплових коливань решітки збільшуються, посилюється розсіювання електронів і зростає ρ :

$$\rho = \rho_0(1 \pm \phi\sigma), \quad (2.12)$$

де $\phi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$ – коефіцієнт питомого опору по тиску, Па⁻¹; σ – механічна напруга в перетині зразка, Па (плюс відповідає деформації при розтяганні, а знак мінус – при стисканні). Звичайно коефіцієнт ϕ становить $(1...5)10^{-11}$ Па⁻¹.

Пластична деформація завжди підвищує питомий опір металів і сплавів внаслідок розмноження в решітці дислокацій. Однак це

підвищення навіть при значному деформуванні чистих металів становить одиниці відсотків.

Термічне загартування призводить до підвищення ρ , що пов'язано з появою внутрішніх напружень. При рекристалізації шляхом термічної обробки (відпалу) питомий опір може бути знижений до первісного значення, оскільки відбувається «заліковування» дефектів і зняття внутрішніх напружень.

2.2 Електричні властивості металевих сплавів

У техніці широко застосовуються металеві сплави, що мають структуру неупорядкованого твердого розчину. При утворенні твердого розчину зберігається кристалічна решітка металу-розчинника, змінюється лише її період. Багато металів, що мають однаковий тип кристалічної структури, змішуються в будь-яких пропорціях, тобто утворюють безперервний ряд твердих розчинів. Разом з тим існує чимало металевих систем, компоненти яких мають обмежену взаємну розчинність або взагалі не розчинні у твердій фазі. Статистичний розподіл атомів різних сортів по вузлах кристалічної решітки викликає значні флуктуації періодичного потенційного поля кристала, що, у свою чергу, призводить до сильного розсіювання електронів.

Повний опір сплаву $\rho_{\text{спл}}$ можна виразити у вигляді суми двох доданків:

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_{\text{т}} + \rho_{\text{з}}, \quad (2.13)$$

де $\rho_{\text{т}}$ - опір, обумовлений розсіюванням електронів на теплових коливаннях решітки, Ом·м; $\rho_{\text{з}}$ - додатковий (залишковий) опір, Ом·м, пов'язаний з розсіюванням електронів на неоднорідностях структури сплаву.

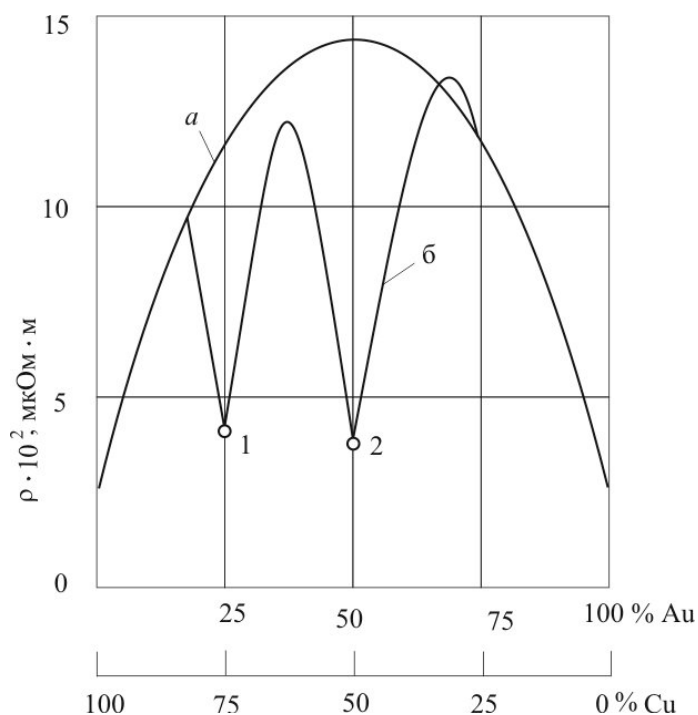
Специфіка твердих розчинів полягає в тому, що $\rho_{\text{спл}}$, на відміну від $\rho_{\text{з}}$ чистих металів, може у багато разів перевищувати теплову складову.

Для багатьох двохкомпонентних сплавів $\rho_{\text{спл}}$ параболічно залежить від складу (закон Нордгейма):

$$\rho_{\text{спл}} = Cx_A \cdot x_B = Cx_A(1-x_A) \quad (2.14)$$

де C – константа, що залежить від природи сплаву, Ом·м; x_A і x_B – атомні частки компонентів у сплаві.

З (2.14) видно, що в бінарних твердих розчинах А–В залишковий опір збільшується як при додаванні атомів В до металу А, так і при додаванні атомів А до металу В, причому ця зміна характеризується симетричною кривою (рис. 2.1). Закон Нордгейма (2.14) досить точно описує зміну питомого опору безперервних твердих розчинів у тому випадку, якщо при зміні складу не спостерігається фазових переходів і жоден з їхніх компонентів не належить до числа перехідних або рідкоземельних елементів.



1 – сплав Cu_3Au ; 2 – сплав $CuAu$; а – неупорядковані сплави (після загартування); б – впорядковані сплави (після відпалу)

Рисунок 2.1 - Залежність питомого опору від складу сплавів Au-Cu

У тому випадку, коли компоненти бінарної системи не мають взаємної розчинності у твердому стані, структура застиглого після кристалізації сплаву є сумішшю двох фаз. Питомий опір таких гетерофазних сплавів у першому наближенні лінійно змінюється зі зміною складу, тобто зростає пропорційно вмісту металу з більшим значенням ρ .

2.3 Опір провідників на високих частотах

На високих частотах спостерігається нерівномірний розподіл електричного струму по перетині провідників; густина струму максимальна на поверхні й зменшується в міру проникнення вглиб провідника (скін-ефект).

Нерівномірний розподіл струму пояснюється дією магнітного поля того ж провідника. Зчеплений із дротом магнітний потік пропорційний струму: $\Phi = Li$, де L - індуктивність провідника, Гн; i - електричний струм, А.

Зміна магнітного потоку викликає появу електрорушійної сили (е.р.с.) самоіндукції

$$E_l = -L \frac{di}{dt}.$$

Якщо струм змінюється за синусоїдальним законом, то індукована е.р.с. залежить від частоти:

$$i = I_m \sin \omega t; E_l = -\omega L I_m \cos \omega t.$$

Е.р.с. самоіндукції має напрямок, протилежний струму в дроті й гальмує його зміну відповідно до закону Ленца.

За глибину проникнення поля Δ приймають відстань, на якій амплітуда напруженості поля, а, отже, і густини струму, зменшується в e разів стосовно свого значення на поверхні провідника. Зв'язок глибини проникнення поля з фізичними характеристиками речовини визначається виразом

$$\Delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)}, \quad (2.15)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна стала, Гн/м; μ - відносна магнітна проникність матеріалу.

У випадку сильно вираженого поверхневого ефекту $\Delta \ll d$ і коефіцієнт збільшення опору провідника з круглим перетином $K_R = R_{\sim} / R_0 = d / (4\Delta)$.

При надвисоких частотах густина струму у всіх частинах перетину, за винятком невеликого поверхневого шару, практично дорівнює нулю.

У радіотехніці для плоских провідників використовують спеціальну характеристику - опір квадрата поверхні R_s , що

визначається (в Ом) виразом $R_s = \rho / \Delta$, який показує, що активний опір R_s плоского провідника нескінченної товщини у випадку поверхневого ефекту дорівнює опору плоского провідника товщиною Δ для постійного струму.

У міру віддалення від поверхні змінюється не тільки амплітуда поля, але й фаза електромагнітних коливань, тобто усередині провідного середовища коливання запізнюються по фазі стосовно коливань на поверхні.

2.4 Опір тонких металевих плівок

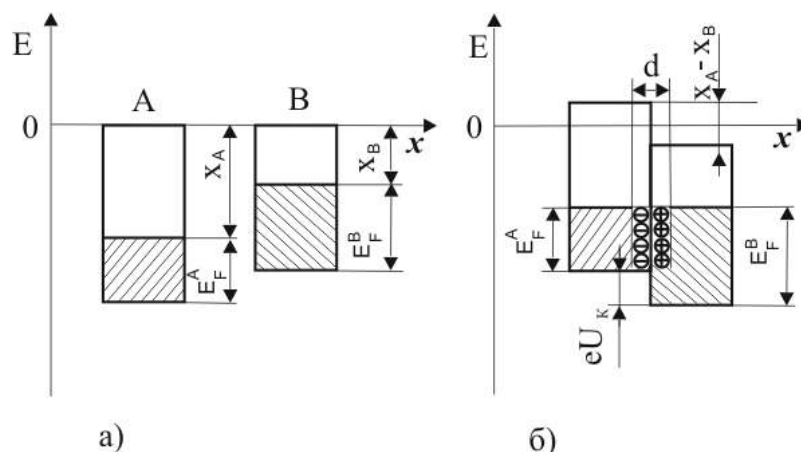
Металеві плівки широко використовуються в мікроелектроніці в якості міжелементних з'єднань, контактних площадок, обкладинок конденсаторів, магнітних і резистивних елементів інтегральних схем. Електричні властивості тонких плівок металів і сплавів можуть значно відрізнятися від властивостей об'ємних зразків вихідних провідникових матеріалів. Однією із причин зміни властивостей матеріалу в плівковому стані є те, що залежно від умов конденсації структура плівок може змінюватися від гранично неупорядкованого дрібнодисперсного стану (аморфний конденсат) до структури досить досконалого монокристалічного шару (епітаксійні плівки). Інша причина пов'язана із проявом розмірних ефектів, тобто зі зростаючою роллю поверхневих процесів у порівнянні з об'ємними, тобто тоді, коли товщина плівки або будь-якого нанорозмірного об'єкта виявляється порівняною із середньою довжиною вільного пробігу електронів.

2.5 Контактні явища і терморушійна сила

При контакті двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів. Це явище відкрив італійський фізик А. Вольта в 1797 р. Відповідно до квантової теорії, основною причиною появи різниці потенціалів на контакті є різна енергія Фермі металів, що з'єднуються.

Нехай в ізольованому стані електронний газ у металах А і В характеризується енергіями Фермі E_F^A і E_F^B , відлічуваними від дна зони провідності (рис. 2.2,а).

Термодинамічні роботи виходу електронів дорівнюють відповідно χ_A , χ_B . Енергія електронів, що перебувають на рівні Фермі, у різних металах різна. Тому при контактуванні матеріалів виникає більш інтенсивний перехід електронів з області з більшим значенням енергії E_F в область, де ця енергія менше, тобто з металу В у метал А.



а – до контакту; б – контакт у стані рівноваги

Рисунок 2.2 - Енергетична діаграма контакту двох металів

У результаті такого процесу метал В заряджається позитивно, а метал А - негативно; між ними виникає різниця потенціалів, що перешкоджає подальшому переходу носіїв заряду. Рівновага наступить тоді, коли робота електрона по подоланню сил виниклого поля буде дорівнювати різниці енергій електронів, що переходять через контакт (дивись рис.2.2,б):

$$eU_k = E_F^B - E_F^A.$$

Контактне поле забезпечує рівність потоків електронів з одного металу в іншій у стані рівноваги, яка встановлюється дуже швидко – за час $\sim 10^{-16}$ с.

В умовах сталої рівноваги рівень Фермі в обох металах повинен бути однаковий: енергетичні рівні в металі, що зарядився негативно, здіймуться, а в металі, що зарядився позитивно, опустяться. Подвійний електричний шар d , що існує в області контакту (рис. 2.2,б), є дуже тонким (порядку періоду кристалічної решітки) і не впливає на проходження електричного струму через контакт. Контактна різниця потенціалів між двома металами може становити від десятих часток до декількох вольтів.

Термоелемент, складений із двох різних провідників, що утворюють замкнутий ланцюг, називають термопарою (рис. 2.3).

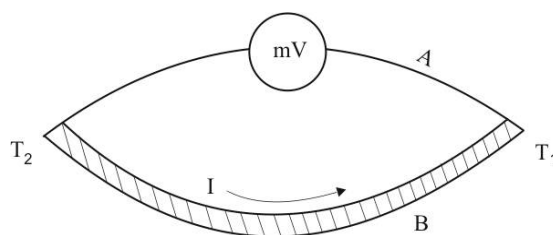


Рисунок 2.3 - Схема пристрою термопари

При різній температурі контактів у замкнутому ланцюзі виникає струм, названий термоелектричним (ефекту Зеебека). Якщо ланцюг розірвати в довільному місці, то на кінцях розімкнутого ланцюга з'явиться різниця потенціалів, названа термоелектрорушійною силою (термо-е.р.с.). Як показує досвід, у відносно невеликому температурному інтервалі термо-е.р.с. пропорційна різниці температур контактів (спаїв).

При достатньо великій різниці температур двох спаїв термо-е.р.с.

$$U_t = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_T dT,$$

де α_T - відносна питома (диференційна) термо-е.р.с, $V \cdot K^{-1}$.

Значення α_T залежить від природи контактуючих провідників і температури. В загальному випадку α_T є складною функцією температури й термо-е.р.с. можна представити у вигляді $U(T_2, T_1) = f(T_2) - f(T_1)$.

Термо-е.р.с. у контурі складається із трьох складових. Перша з них обумовлена температурною залежністю контактної різниці потенціалів. У металах зі збільшенням температури рівень Фермі, хоча й слабо, але зміщується вниз по енергетичній шкалі. Наслідком зсуву рівня Фермі і є виникнення контактної складової термо-е.р.с. Друга складова термо-е.р.с. обумовлена дифузією носіїв заряду від гарячих спаїв до холодного. Електрони, зосереджені на гарячому кінці, мають трохи більшу кінетичну енергію й більшу швидкість руху у порівнянні з носіями холодного кінця. Тому вони в більшій кількості дифундують у напрямку температурного градієнта, ніж у зворотному. Дифузійний потік, несучи негативний заряд з гарячого

кінця в холодний, створює між ними різницю потенціалів. Третя складова термо-е.р.с. виникає в контурі внаслідок захоплення електронів квантами теплової енергії (фононами). Їхній потік також поширюється до холодного кінця.

Питома термо-е.р.с. для металів α_T становить декілька мкВ/К. Істотно більші значення питомої термо-е.р.с. можна одержати при використанні металевих сплавів, які мають складну зонну структуру.

Металеві термопари широко використовуються для точного виміру температури, при цьому необхідно стабілізувати температуру одного зі спаїв.

В реальних електричних ланцюгах повністю виключити перепади температури практично неможливо. Тому в них можуть виникати паразитні термо-е.р.с. Для зменшення їхнього впливу в ланцюгах електровимірювальних приладів варто підбирати контактуючі матеріали з малими значеннями α_T .

Різниця потенціалів на кінцях послідовного ланцюга з різномірних провідників визначається розходженням у роботах виходу електронів із крайніх провідників і не залежить від числа і складу проміжних ланок:

$$E_k = \frac{A_1 - A_n}{el},$$

де A_1, A_n - робота виходу електронів з першого й останнього матеріалів, еВ; l - довжина зазору між матеріалами, м.

В провіднику, виготовленому з одного металу, при наявності градієнта температури на кінцях його також виникає різниця потенціалів. Її значення, віднесене до одиничної різниці температур на кінцях провідника, називають абсолютною питомою термо-е.р.с. В термопарному контурі відносна питома термо-е.р.с. - це різниця абсолютних питомих термо-е.р.с. контактуючих провідників:

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B, \quad (2.16)$$

де α_T^A и α_T^B - абсолютні питомі термо-е.р.с. контактуючих металів А і В.

Зі співвідношення (2.16) випливає, що якщо відомо абсолютне значення питомої термо-е.р.с. одного матеріалу, який прийнято як еталон, то для будь-якого іншого матеріалу цей параметр легко

визначити за допомогою вимірів щодо цього еталона. Як еталон найчастіше використовують свинець, у якого термоелектричні властивості виражені дуже слабо. При низьких температурах найкращими еталонами є надпровідники, оскільки в них абсолютна питома термо-е.р.с. завжди дорівнює нулю. Знак термо-е.р.с. вважається негативним, якщо гарячий кінець провідника заряджається позитивно, що характерно для більшості металів. У загальному випадку абсолютна термо-е.р.с. сильно залежить від температури й навіть може змінювати знак у процесі нагрівання.

2.6 Надпровідність

У багатьох металів і сплавів при температурах, близьких до абсолютного нуля, спостерігається різке зменшення питомого опору. Це явище називають надпровідністю, а температуру $T_{\text{нп}}$ переходу в надпровідний стан, називають критичною температурою переходу. Питомий опір матеріалів у надпровідному стані за експериментальними даними $\sim 10^{-25}$ Ом·м, що в 10^{17} разів менше опору міді при кімнатній температурі.

За квантовою теорією, надпровідність є наслідком притягання електронів один до одного та зв'язування в пари, називані куперовськими. Такі спарені електрони не розсіюються на дефектах структури. При $T = 0$ К всі електрони, розташовані поблизу рівня Фермі, зв'язані в пари. При температурі $T = T_{\text{нп}}$ відбувається повний розрив всіх пар, надпровідність зникає.

Електрони надпровідності не обмінюються енергією з решіткою. Тому при температурі нижче критичної теплопровідність металів зменшується.

Зовнішнє магнітне поле проникає в товщу зразка на глибину менше за $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м, загасаючи в найтоншому його шарі, тому що в поверхневому шарі надпровідника магнітному полі виникає круговий незатухаючий струм, що повністю компенсує зовнішнє поле в товщі зразка. Тобто надпровідники за магнітними властивостями є ідеальними діамагнетиками з магнітною проникністю $\mu < 1$ і виштовхуються з магнітного поля. Стан надпровідності може бути зруйнований, якщо напруженість магнітного поля перевищить деяке критичне значення $H_{\text{нп}}$. За характером переходу з надпровідного стану в стан звичайної електропровідності під дією магнітного поля розрізняють надпровідники I і II роду. У надпровідників I роду цей

перехід відбувається стрибкоподібно, як тільки напруженість поля досягне критичного значення. Надпровідники II роду переходять із одного стану в інший поступово.

2.7 Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали у фізиці, хімії та техніці класифікують за різними ознаками. Одна з можливих схем класифікації провідників - за складом, властивостям і технічним призначенням (рис. 2.4).

2.8 Матеріали високої провідності

До цієї групи матеріалів прийнято відносити провідники з питомим електричним опором у нормальних умовах не більше як 0,1 мкОм·м. Найпоширенішими серед цих матеріалів є мідь і алюміній.

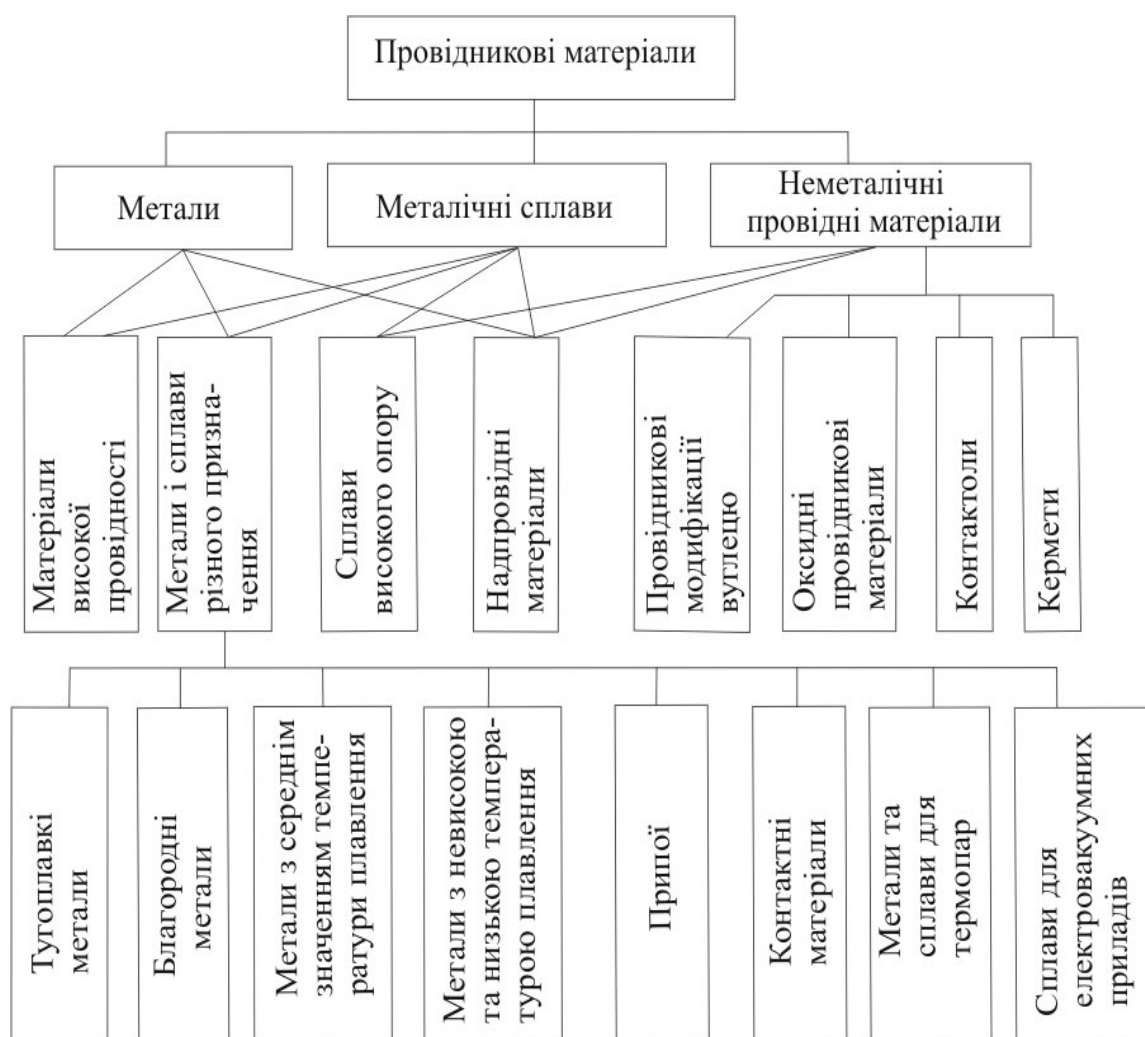


Рисунок 2.4 - Класифікація провідникових матеріалів

Мідь

Переваги міді, що забезпечують їй широке застосування як провідникового матеріалу:

1) малий питомий опір (із всіх металів тільки срібло має трохи менший питомий опір, ніж мідь);

2) досить висока механічна міцність;

3) задовільна в більшості випадків стійкість до корозії; навіть в умовах високої вологості мідь окислюється на повітрі значно повільніше, ніж, наприклад, залізо;

4) порівняно легка оброблюваність (за методом прокатки з міді можна виготовити листи, стрічки, за методом протягання - дріт, товщина якого може бути доведена до тисячних часток міліметра);

5) відносна легкість пайки й зварювання.

Методом холодного протягання виготовляють тверду (твердотягнуту) мідь (маркується МТ), що має високу межу міцності при розтяганні й мале відносне подовження, а також твердість і пружність при вигині; дріт із твердої міді трохи пружинить. Якщо ж мідь піддати нагріванню до кількох сотень градусів з наступним охолодженням, то вийде м'яка (відпалена) мідь (марки ММ), що порівняно пластична, має малу твердість і невелику міцність, але більш високу питому провідність.

Стандартна мідь має питомий опір $\rho = 0,017241$ мкОм·м. Це мідь марок М1 і М0. Мідь М1 містить 99,9 % Cu, а в загальній кількості домішок (0,1 %) кисню повинно бути не більше як 0,08 %. При підвищеному вмісті кисню помітно погіршуються механічні й технологічні властивості міді, а також утруднюються пайка й лудіння. Мідь, що містить більше 0,1 % кисню, легко руйнується при гарячій обробці тиском. Кращі механічні властивості має мідь М0 (99,95% Cu, домішок не більше як 0,05 %, у тому числі кисню - не більше як 0,02 %). З міді М0 може бути виготовлений найтонший дріт.

В електровакуумних приладах застосовують сорти міді, що не містять кисню. Краща безкиснева мідь містить 99,97 % Cu. Ще більш чистим металом є вакуумна мідь, виплавлена у вакуумних індукційних печах, яка може містити 99,99% Cu. Вільна від кисню мідь високо пластична.

Недоліком міді є її схильність до атмосферної корозії з утворенням окисних і сульфідних плівок, внаслідок чого мідь непридатна для слабкострумних контактів. Відшаровування від

металу й термічне розкладання при високих температурах окисної плівки викликає підвищене зношування мідних контактів при сильних струмах.

Застосування міді. Мідь застосовують в електротехніці для виготовлення дротів, кабелів, шин розподільних пристроїв, обмоток трансформаторів, електричних машин, струмоведучих деталей приладів і апаратів, анодів у гальванопластиці. Мідні стрічки використовують як екрани кабелів. Зі спеціальних електровакуумних сортів міді виготовляють деталі клістронів, магнетронів, аноди потужних генераторних ламп, виводи енергії приладів НВЧ, деякі типи хвилеводів і резонаторів. Крім того, мідь використовують для виготовлення фольгованого гетинаксу й застосовують у мікроелектроніці у вигляді осаджених на підкладки плівок, що грають роль провідних з'єднань між функціональними елементами схеми.

Незважаючи на великий коефіцієнт лінійного розширення в порівнянні з коефіцієнтом розширення скла, мідь застосовують для спаїв зі склом, оскільки вона має низьку границю текучості, м'якість й високу теплопровідність.

Алюміній

Другим за значенням (після міді) провідниковим матеріалом є алюміній. Питомий опір алюмінію в 1,6 рази більше питомого опору міді, але алюміній в 3,5 рази легше міді. Тому при однаковому опорі й однаковій довжині алюмінієві дроти у два рази легше мідних, незважаючи на більший поперечний переріз. До того ж у порівнянні з міддю алюміній набагато більше розповсюджений у природі й має меншу вартість.

Недоліком алюмінію є його низька механічна міцність. Відпалений алюміній у три рази менш міцний на розрив, чим відпалена мідь.

Для електротехнічних цілей використовують алюміній технічної чистоти марки АЕ, що містить не більше як 0,5 % домішок. Виготовлений з алюмінію АЕ й відпалений при температурі 350 ± 20 °С дріт має питомий опір при 20 °С не більше за 0,0280 мкОм·м. Алюміній високої чистоти А97 (не більше 0,03 % домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів і корпусів електролітичних конденсаторів. В алюмінії особливої чистоти А999 домішки не перевищують 0,001 %, значення

залишкового питомого опору при температурі рідкого гелію не перевищує $4 \cdot 10^{-6}$ мкОм·м.

З алюмінію шляхом прокатки можна виготовляти дуже тонку (6...7 мкм) фольгу, застосовувану в якості обкладок у паперових конденсаторах, або пластин конденсаторів змінної ємності.

Алюміній активно окислюється й покривається тонкою плівкою окису з великим електричним опором. Така плівка охороняє алюміній від корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих дротів, що унеможлиблює пайку алюмінію звичайними методами. Тому для пайки алюмінію застосовують спеціальні пасти-припої або використовують ультразвукові паяльники.

За допомогою електрохімічної обробки алюмінію створюють більш товстий шар окису, що є надійною електричною ізоляцією на порівняно високі напруги. З окисованого алюмінію виготовляють різні котушки без додаткової міжвиткової та міжшарової ізоляції. Недоліками окисної ізоляції дротів є її обмежена гнучкість і помітна гігроскопічність. Оксидну ізоляцію використовують в електролітичних конденсаторах, а також у деяких типах випрямлячів і розрядників.

Плівки алюмінію широко використовують в інтегральних мікросхемах як контакти й міжз'єднання, що забезпечують зв'язок між окремими елементами схеми й зовнішні приєднання. Перевагами алюмінію як контактного матеріалу є те, що він легко напилюється, має хорошу адгезію до кремнію й плівкової ізоляції з SiO_2 , широко використовуюваної в кремнієвих інтегральних схемах. До того ж алюміній утворює хороші омичні контакти із кремнієм. Недоліком алюмінію є значна схильність до електроміграції, що призводить до збільшення опору або навіть розриву міжз'єднання.

Надпровідні матеріали. Більшість із надпровідних металів є надпровідниками I роду із критичними температурами переходу нижче 4,2 К. Через те більшість надпровідних металів для електротехнічних цілей застосувати не вдається. Надпровідність не мають метали, що є найкращими провідниками в нормальних умовах, - срібло, мідь, золото. Крім чистих металів надпровідниками є багато інтерметалічних сполук та сплавів. Ще 13 елементів проявляють надпровідні властивості при високих тисках: кремній, германій, селен, телур, сурма й інші. Загальна кількість найменувань відомих у цей час надпровідників становить близько 2000. Серед них

найвищими критичними параметрами характеризуються сплави й сполуки ніобію (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Основні властивості надпровідних сплавів

Матеріал	$T_{\text{нп}},$ К	$H_{\text{нп1}},$ Тл	$H_{\text{нп2}},$ Тл	$J_{\text{доп}},$ А/м	Особливості
V_3Ga	14,8	0,60	21,0	$1,6 \cdot 10^9$	Задовільні механічні властивості
V_3Si	17,0	0,62	23,4	$2,4 \cdot 10^9$	Задовільні механічні властивості
Nb_3Sn	18,3	0,54	24,5	$1,6 \cdot 10^9$	Велика густина струму, технологічність
Nb_3Ga	20,3	-	34,0	-	Висока температура переходу, технологічність
Nb_3Ge	24,3	-	37,0	10^9	Найвища температура переходу

Деякі з них дозволяють використати для досягнення надпровідного стану замість рідкого гелію більш дешевий холодоагент - рідкий водень.

Всі надпровідні інтерметалічні сполуки й сплави відносяться до надпровідників II роду.

Надпровідність ніколи не спостерігається в системах, у яких існує феро- або антиферомагнетизм. Утворенню надпровідного стану в напівпровідниках і діелектриках перешкоджає мала концентрація вільних електронів. Однак у матеріалах з великою діелектричною проникністю сили кулонівського відштовхування між електронами значною мірою послаблені. Тому деякі з них також проявляють властивості надпровідників при низьких температурах. Прикладом може служити сегнетоелектрик **титанат стронцію** ($SrTiO_3$). Ряд напівпровідників вдається перевести в надпровідний стан добавкою великої концентрації легуючих домішок ($GeTe$, $SnTe$, Cu і ін.).

В теперішній час промисловість випускає різноманітний асортимент надпровідних дротів і стрічок. Виготовлення таких провідників пов'язане з великими технологічними труднощами, що обумовлені поганими механічними властивостями багатьох надпровідників, їхньою низькою теплопровідністю й складною структурою дротів. Внаслідок великої крихкості інтерметалічних сполук з хорошими критичними параметрами замість простих дротів і

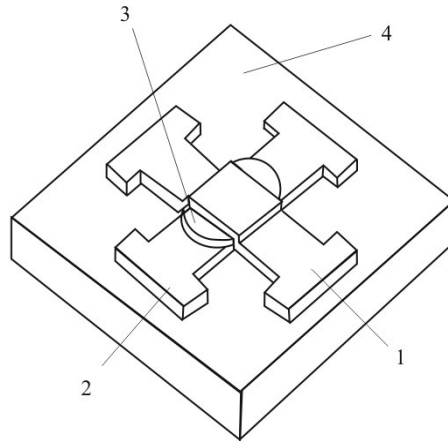
стрічок доводиться створювати композиції із двох (звичайно надпровідник з міддю) і навіть декількох металів.

Застосування надпровідників. Надпровідні елементи й пристрої застосовуються у багатьох галузях науки й техніки. Надпровідні соленоїди дозволяють створювати однорідні магнітні поля напруженістю понад 10^7 А/м у досить великій області простору, у той час як межею звичайних електромагнітів із залізними сердечниками є напруженості порядку 10^6 А/м. До того ж у надпровідних магнітних системах циркулює незатухаючий струм, тому їм не потрібне зовнішнє джерело живлення. Надпровідні соленоїди дозволяють значною мірою зменшити габарити й споживання енергії в синхрофазотронах і інших прискорювачах елементарних частинок. Перспективним є використання надпровідних магнітних систем для втримання плазми в реакторах керованого термоядерного синтезу, у магнітогідродинамічних (МГД) перетворювачах теплової енергії в електричну, в індуктивних накопичувачах енергії для покриття пікових потужностей у масштабах великих енергосистем. Розробляються електричні машини з надпровідними обмотками збудження. Економічно обґрунтованим є створення надпровідних трансформаторів, розрахованих на високий рівень потужності (десятки-сотні мегават). Розроблено експериментальні зразки імпульсних надпровідних котушок для живлення плазмених гармат і систем накачування твердотільних лазерів. У радіотехніці використовують надпровідні об'ємні резонатори, що завдяки мізерно малому електричному опору мають дуже високу добротність. За принципом механічного виштовхування надпровідників з магнітного поля створюється надшвидкісний залізничний транспорт на «магнітній подушці».

Порушення надпровідності матеріалу зовнішнім магнітним полем використовується в роботі приладу, що називають кріотроном (рис. 2.5).

На кріотронних елементах можна виготовити комірку обчислювальних машин. Із кріотронів можна зібрати будь-яку схему пам'яті або перемикачів.

Два стани з нульовим і кінцевим опорами природно ототожнити з позиціями 0 і 1 у двійковій системі числення. Перевагами комірок на плівкових кріотронах є висока швидкодія, малі втрати й надзвичайна компактність.



1 - керуюча плівка зі свинцю; 2 - вентильна плівка з олова; 3 - ізоляційний шар; 4 – підкладка
Рисунок 2.5 - Схема плівкового кріотрона

Широкі перспективи застосування надпровідників відкриває вимірювальна техніка. Надпровідні елементи дозволяють реєструвати дуже тонкі фізичні ефекти, вимірювати з високою точністю й обробляти велику кількість інформації. Вже зараз на основі надпровідності створені високочутливі болометри для реєстрації інфрачервоного випромінювання, магнітометри для виміру слабких магнітних потоків, індикатори надмалих напруг і струмів. Коло цих приладів безупинно розширюється.

2.9 Сплави високого опору та сплави для термопар

Сплавами високого опору називають провідникові матеріали, у яких у нормальних умовах $\rho \geq 0,3$ мкОм·м. Їх застосовують при виготовленні електровимірювальних та електронагрівальних пристроїв і приладів, зразкових резисторів, реостатів. При використанні сплавів в електровимірювальній техніці від них потрібні не тільки високий питомий опір, але й можливо менше значення α_p , а також мала термо-е.р.с. щодо міді. Провідникові матеріали в електронагрівальних приладах повинні довгостроково працювати на повітрі при температурах ~ 1000 °С. Серед великої кількості матеріалів для зазначених цілей найпоширенішими в практиці є сплави на мідній основі - манганін і константан, а також хромонікелеві й залізохромоалюмінієві сплави (табл. 2.2).

Манганін – основний сплав на мідній основі для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів Манганін має

жовтуватий відтінок, добре витягається в тонкий дріт до діаметра 0,02 мм. З манганіну виготовляють також стрічку товщиною 0,01...1 мм і шириною 10...300 мм.

Таблиця 2.2 – Властивості сплавів високого опору

Сплав	Питомий опір, ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^6$, K^{-1}	Термо-е.р.с. відносно міді, мкВ/К	Гранична робоча температура, °С
Манганін 86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni	0,42...0,48	5...30	1...2	100...200
Константан 60 % Cu, 40 % Ni	0,48...0,52	-(5...25)	40...50	450...500
Ніхром X15H60 (55...61) % Ni, (15...18) % Cr, 1,5 % Mn, Fe	1,0...1,2	100...200	-	1000
Ніхром X20H80 (75...78) % Ni, (20...23) % Cr, 1,5 % Mn, Fe	1,0...1,1	100...200	-	1100

Константан – сплав міді й нікелю. Вміст нікелю в сплаві приблизно відповідає максимуму ρ і мінімуму α_p для сплавів Cu-Ni. Константан добре піддається обробці, як і манганін. Значення α_p константану близько до нуля й звичайно має негативний знак.

З константану виготовляють реостати і електронагрівальні елементи, робоча температура яких не перевищує 400...450 °С. Константан у парі з міддю або залізом має велику термо-е.р.с. Це є недоліком при використанні константанових резисторів у вимірювальних схемах; при наявності різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають термо-е.р.с., які можуть стати джерелом помилок, особливо при нульових вимірах у потенціометричних схемах. Константан з успіхом застосовують для виготовлення термопар, які служать для виміру температури, якщо остання не перевищує декількох сотень градусів.

Хромонікелеві сплави (ніхроми) (табл. 2.2) використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток,

паяльників і т.ін. Із цих сплавів виготовляють дріт діаметром 0,02 мм і більше й стрічку перетином $0,1 \times 1,0 \text{ мм}^2$ і більше.

Тонкі плівки з ніхромового Х20Н80, одержувані методом термічного випару й конденсації у вакуумі, широко застосовуються для виготовлення тонкоплівкових резисторів, зокрема, резисторів інтегральних мікросхем. Звичайно застосовують тонкі ніхромові плівки з поверхневим опором $R = 50 \dots 300 \text{ Ом}$ і α_R , що змінюється в межах від $-3 \cdot 10^{-4}$ до $+2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Такі плівки мають досить добру адгезію до діелектричних підкладок і високою стабільністю властивостей.

В термопарах найчастіше застосовують наступні сплави: **копель** (56 % Cu й 44 % Ni); **алюмель** (95 % Ni, інші складові - Al, Si і Mn); **хромель** (90 % Ni і 10 % Cr); **платинородій** (90 % Pt і 10 % Rh). Термопари можна використовувати для виміру наступних температур: платинородій–платина - до 1600 °С; мідь–константан і мідь–копель - до 350 °С; залізо–константан, залізо–копель і хромель–копель - до 600 °С; хромель–алюмель 900...1000 °С.

Із використовуваних у практиці термопар найбільшу термо-е.р.с. при даній різниці температур має термопара хромель-копель. Знак термо-е.р.с. у зазначених вище термопар такий, що в холодному спаї струм спрямований від першого названого в парі матеріалу до другого (тобто від хромелі до копелі, від міді до константану й т.д.), а в гарячому спаї - у зворотному напрямку.

У процесі тривалої експлуатації може спостерігатися поступова зміна питомої термо-е.р.с термопар. Причинами нестабільності є забруднення домішками з навколишньої атмосфери, леткість компонентів, окислювання дротів, різкі перегини й деформації, які вносять внутрішні напруження й створюють фізичну неоднорідність. Найбільш високу точність, стабільність й відтворюваність мають платина-платинородієві термопари, незважаючи на малу питому термо-е.р.с. Ці якості пояснюються хімічною інертністю цих матеріалів й можливістю одержувати їх з високим ступенем чистоти.

2.10 Метали і сплави різного призначення

Тугоплавкі метали

До тугоплавких відносяться метали з температурою плавлення, що перевищує 1700 °С. Як правило, вони хімічно стійкі при низьких

температурах, але стають активними при підвищених. Експлуатація їх при високих температурах може бути забезпечена в атмосфері інертних газів або у вакуумі. Основними тугоплавкими металами є вольфрам, молібден, тантал, ніобій, хром, ванадій, титан, цирконій і реній.

Вольфрам – дуже важкий, твердий метал сірих кольорів. Із всіх металів вольфрам має найбільш високу температуру плавлення. У природі зустрічається тільки у вигляді сполук. Волокниста структура обумовлює гнучкість тонких вольфрамових ниток. Межа міцності при розтяганні для тонких ниток - 3000...4000 МПа, а відносне подовження при розриві $\approx 4\%$.

Вольфрам використовується для виготовлення ниток ламп накаливання з 1890 року. Вольфрам є одним з найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. З нього виготовляють електроди, підігрівники, пружини, гачки в електронних лампах, рентгенівських трубках і т.п.

Вольфрам має найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед всіх чистих металів. Ця його властивість використовується при виготовленні термічно погоджених спаїв вольфраму з тугоплавкими стеклами, які теж мають низький температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Молібден – метал, за зовнішнім виглядом та технологією обробки близький до вольфраму. Відпалений дрібнозернистий молібден характеризується високою пластичністю. Поліпшення структури й підвищення механічної міцності молібдену домагаються введенням спеціальних присадок.

При кімнатній температурі молібден – хімічно відносно інертний метал, хоча й більш активний, ніж вольфрам. На повітрі він окислюється, починаючи з температури 300 °С. Тому молібденові деталі, що нагрівають, повинні працювати у вакуумі або відновлюючому середовищі.

Серед тугоплавких металів молібден має найменший питомий опір. Висока міцність та пластичність роблять молібден одним із кращих провідникових матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють при високих температурах. З молібдену виготовляють сітки й електроди електронних ламп, рентгенівських трубок і допоміжні деталі електровакуумних приладів з напруженим тепловим режимом.

Тантал виготовляють у вигляді дроту, прутків, листів, стрічок і фольги товщиною ~ 10 мкм. Межа міцності його при розтяганні залежно від механічної й термічної обробки 350...1250 МПа. На противагу вольфраму й молібдену тантал не стає крихким при нагріванні у вакуумі до досить високих температур. Завдяки здатності попередньо дегазованого танталу поглинати гази в діапазоні температур 600...1200 °С, а також тугоплавкості, пластичності й формостійкості тантал є одним з найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. Однак через природну дефіцитність і високу вартість тантал використовується переважно для відповідальних виробів, що працюють у напруженому тепловому режимі, або коли до вакууму висувають підвищені вимоги. З танталу виготовляють аноди й сітки генераторних ламп, катоди прямого й непрямого розжарення й різні допоміжні деталі електровакуумних приладів. Широко застосовуються електролітичні й тонкоплівкові конденсатори з великою питомою ємністю, виготовлені на основі танталу. Із танталу виробляють тонкоплівкові резистори. Внаслідок високої тугоплавкості танталу для одержання тонких плівок кращими є методи катодного або іонно-плазмового розпилення в чистому аргоні.

Ніобій – метал, за властивостями близький до танталу. Метал, що містить 99,4 % Nb, є високопластичним і випускається у вигляді прутків, листів, стрічки, фольги й дроту. Ніобій має високе газопоглинання в інтервалі температур 400...900 °С. В електровакуумних приладах конструктивні деталі з ніобію одночасно виконують функції нерозпорошуючого геттера. Серед тугоплавких металів ніобій має найменшу роботу виходу електронів. Тому його застосовують як розжарювані катоди в потужних генераторних лампах.

Хром має високу стійкість до окислювання, тому використовується для захисних покриттів виробів, експлуатованих при підвищених температурах.

З тонких плівок хрому виготовляють резистори й адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних з'єднань в інтегральних мікросхемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів. Хром має добру адгезію до скляних, ситалових і керамічних підкладок. Крім того, хром добре з'єднується з будь-яким провідниковим матеріалом.

Реній – один з рідких дуже важких металів, з температурою плавлення, близькою до температури плавлення вольфраму. Реній і його сплави з вольфрамом застосовують у виробництві електроламп і електровакуумних приладів замість вольфраму. Це забезпечує більш тривалий термін служби в умовах динамічних навантажень. Реній і його сплави разом з вольфрамом дозволяють створювати термопари для вимірів температур до 2500...2800 °С у вакуумі, водні або інертному середовищі.

У радіоелектроніці реній застосовують для захисту від корозії й зношування деталей з міді, срібла, вольфраму, молібдену. Тонкі плівки ренію, використовуються для прецизійних резисторів в інтегральних схемах.

Благородні метали

Благородні метали - це найбільш хімічно стійкі метали: золото, срібло, платина, паладій. Вони зустрічаються в природі у вигляді самородків і домішок у різних рудах. У результаті металургійної, хімічної й електролітичної переробки вдається одержати метали дуже високої чистоти: золото - 99,998 %; срібло - 99,999 %; платину - 99,9998 %; паладій - 99,94 %.

Золото має високу пластичність. Межа міцності при розтяганні золотого дроту становить 150 МПа, відносне подовження при розриві - порядку 40 %.

В електронній техніці золото використовують як контактний матеріал, матеріал для корозійно-стійких покриттів резонаторів НВЧ, внутрішніх поверхонь хвилеводів. Перевагою золота як контактного матеріалу є його стійкість проти утворення сірчистих і окисних плівок в атмосферних умовах, як при кімнатній температурі, так і при нагріванні. Тонкі плівки золота застосовуються як напівпрозорі електроди у фоторезисторах і напівпровідникових фотоелементах, а також у якості міжз'єднань і контактних площадок у плівкових мікросхемах.

Срібло є стійким до окислювання при нормальній температурі; має серед металів найменший питомий опір. Межа міцності при розтяганні для срібного дроту становить близько 200 МПа, відносне подовження при розриві ≈ 50 %. Срібло застосовується в широкій номенклатурі контактів в апаратурі різної потужності. Високі значення питомих теплоємності, теплопровідності й електричної провідності срібла забезпечують у порівнянні з іншими металами найменше нагрівання контактів і швидкий відвід теплоти від

контактних точок. Срібло застосовують також для безпосереднього нанесення на діелектрики в якості електродів у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів. Їм покривають внутрішні поверхні хвилеводів для одержання шарів високої провідності. Срібленню піддають провідники високочастотних котушок.

Недоліком срібла є схильність до міграції усередину напівпровідника або діелектрика, на який воно нанесено, в умовах високої вологості, а також при високих температурах навколишнього середовища. У порівнянні з іншими благородними металами срібло має знижену хімічну стійкість. Срібло легко паяється звичайними припоями. Широке застосування срібла стримується його природним дефіцитом.

Платина практично не з'єднується з киснем і є досить стійкою до хімічних реагентів, що забезпечує платиновим контактам стабільний перехідний опір. Платина прекрасно піддається механічній обробці, витягається в дуже тонкі нитки й стрічки.

Її застосовують для виготовлення термопар, розрахованих на робочі температури до 1600 °С, у парі зі сплавом платинородій. Особливо тонкі нитки із платини діаметром близько 0,001 мм використовують для підвісок рухливих систем в електрометрах і інших чутливих приладах.

Внаслідок малої твердості платина рідко використовується для контактів у чистому вигляді, але є основою контактних сплавів для напівпровідників.

Паладій за рядом властивостей близький до платини й часто служить її заміником, тому що дешевше її в 4...5 разів. Використання паладія в електровакуумній техніці обумовлено його здатністю інтенсивно поглинати водень - більш ніж 850-кратний об'єм водню відносно власного об'єму. Виділеним з паладія чистим воднем наповнюють деякі типи газорозрядних приладів. Паладій і його сплави зі сріблом і міддю застосовують як контактні матеріали. У відпаленому стані паладій має досить хороші механічні властивості: межа міцності при розтяганні - порядку 200 МПа, відносне подовження при розриві - до 40 %.

Припої

Припої - це спеціальні сплави, застосовувані при пайці. Пайку здійснюють або з метою створення механічно міцного (іноді герметичного) шва або електричного контакту з малим перехідним опором. При пайці на границі зіткнення розплавленого припою й

твердого металу припій змочує метал, розтікається по ньому й заповнює зазори між з'єднуваними деталями. При цьому компоненти припою дифундують в основний метал, який розчиняється в припої, в результаті чого утворюється проміжний прошарок, що після застигання з'єднує деталі в одне ціле.

Припої прийнято ділити на м'які й тверді. До м'яких відносять припої з температурою плавлення до 300 °С, до твердих – вище 300 °С. М'які припої мають межу міцності при розтяганні 16...100 МПа, тверді - 100...500 МПа. М'якими припоями є олов'яно-свинцеві сплави (ПОС) зі вмістом олова від 10 (ПОС-10) до 90 % (ПОС-90), інша складова - свинець. Провідність цих припоїв становить 9...15 % провідності чистої міді, а $\alpha_l = (26...7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Найпоширенішими твердими припоями є мідно-цинкові (ПМЦ) і срібні (ПСр) з різними добавками.

2.11 Неметалічні провідникові матеріали

Поряд з металами й металевими сплавами для створення резистивних, контактних і струмопровідних елементів досить широко використовуються різні композиційні матеріали, деякі окисли й провідні модифікації вуглецю.

Вуглецеві матеріали

Серед твердих неметалічних провідників найбільш широко використовується в електротехніці графіт (одна з алотропних форм чистого вуглецю). Графіт має малий питомий опір, значну теплопровідність, стійкість до багатьох хімічно агресивних середовищ, високу нагрівостійкість, легкість механічної обробки. У вакуумі або захисних газових середовищах вироби із графіту можуть експлуатуватися при температурах до 2500 °С. Графіт широко використовується в технології напівпровідникових матеріалів для виготовлення різного роду нагрівачів і екранів, човників, тиглів, касет і т.п.

Для виготовлення лінійних резисторів поверхневого типу широко використовуються плівки піролітичного вуглецю, що виготовляються шляхом термічного розкладання парів вуглеводнів у вакуумі або в середовищі інертного газу.

Композиційні провідні матеріали - це механічна суміш провідного наповнювача з діелектричною зв'язкою. Шляхом зміни складу й характеру розподілу компонентів можна в досить широких

межах управляти електричними властивостями таких матеріалів. Особливістю всіх композиційних матеріалів є частотна залежність провідності й старіння при тривалому навантаженні, іноді - нелінійність електричних властивостей. В таких матеріалах провідна фаза - це метали, графіт, сажа, деякі окисли й карбіди, а зв'язувальна речовина - органічні та неорганічні діелектрики.

Контактоли - це малов'язкі або пастоподібні полімерні композиції. Їх використовують як струмопровідні клеї, фарби, покриття та емалі, для створення контактів між металами, металами й напівпровідниками, електродів на діелектриках, екранування приміщень і приладів від перешкод, для струмопровідних комунікацій на діелектричних підкладках, у гнучких хвилеводах і інших виробках електронної промисловості.

Керметами називають металодіелектричні композиції з неорганічною зв'язкою. Вони призначені для виготовлення тонкоплівкових резисторів. Істотною перевагою керметних плівок є можливість варіювання їхнім питомим опором у широких межах. Найбільш поширеною є мікрокомпозиція Cr-Si.

У товстоплівкових мікросхемах використовують резистори, виготовлені на основі композиції скла з паладієм і сріблом. Питомий опір плівок залежить від процентного вмісту провідних компонентів і режиму спікання.

Провідникові матеріали на основі окислів

Переважає більшість чистих окислів металів у нормальних умовах є хорошими діелектриками. Однак при порушенні стехіометричного складу завдяки утворенню кисневих вакансій, а також при введенні деяких домішок їх провідність підвищується. Використовуються як контактні і резистивні шари.

Найчастіше у радіоелектроніці використовується двоокис олова, переважно у вигляді тонких плівок. Окисні плівки SnO₂ мають дуже велику міцність зчепленням з керамічною або скляною підкладкою - до 20 МПа, що набагато більше, ніж у металевих плівок. Питомий опір плівок залежить від ступеня порушення стехіометричного складу й може становити 10⁻⁵ Ом·м. Нагрівання плівок з SnO₂ вище 240 °С призводить до незворотної зміни опору в результаті більш повного окислювання. Разом з тим, плівки стійкі до багатьох хімічних середовищ - руйнуються тільки плавиковою кислотою й киплячим лугом. Тонкі шари двоокису олова мають високу прозорість у видимій і інфрачервоній частинах спектра. Власне поглинання плівок

SnO_2 товщиною до 2 мкм у видимій частині спектра не перевищує 3 %.

Висока оптична прозорість разом з підвищеною електричною провідністю плівок двоокису олова обумовлює застосування їх як прозорих провідних покриттів на внутрішніх стінках скляних балонів електровакуумних приладів, електродів електролюмінісцентних конденсаторів і рідкокристалічних індикаторів, передаючих телевізійних трубок, перетворювачів і підсилювачів зображення, сонячних елементів.

2.12 Полімерні провідники

Переважаюча більшість полімерів мають високі електроізоляційні властивості. Але такі полімери, молекули яких складаються з атомів вуглецю, з'єднаних по черзі одинарними й подвійними хімічними зв'язками, проводять струм. Якщо така молекула містить функціональну групу, що легко віддає електрон, то в полімерному матеріалі утворюються численні вільні носії електричного заряду. Полімер стає провідним.

Полімерами з електронною провідністю є **редокс-полімери** - сполуки, де перенос електрона відбувається переважно завдяки процесу окислювально-відновлювальних реакцій між сусідніми фрагментами полімерного ланцюга. Їх перевагою є можливість керування оптичними властивостями полімерів за допомогою електричного керуючого сигналу. Такі матеріали можна використовувати в найрізноманітніших модифікаціях – у вигляді волокна, плівки, у порошкоподібному вигляді (рис. 2.6).

Плівки із провідних полімерних матеріалів мають властивість міняти оптичні параметри залежно від рівня окислювання. При цьому спостерігається електрохромний ефект, при якому редокс-полімери при переході з окисленого у відновлений стан змінюють свої кольори з темно-зеленого, жовтогарячого, червоно-коричневого, синього (залежно від природи металевого центра) на жовтий різних відтінків.

З використанням цього ефекту створюються електрохромні системи, які знаходять широке застосування в пристроях, а також у виробництві кольорових дисплеїв.

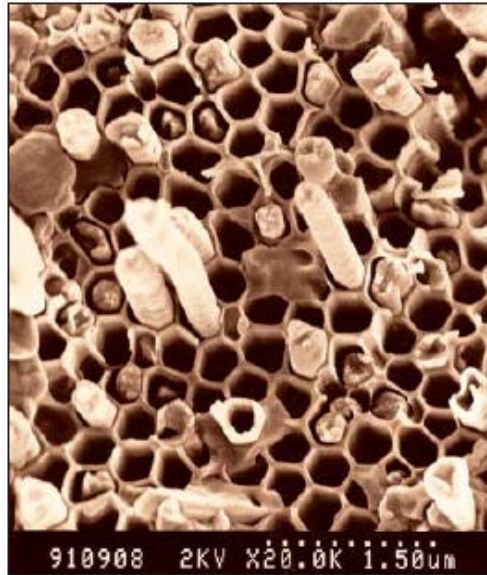


Рисунок 2. 6 - Поліпиролові стрижні в металевих комірках, x 20 000

Ефект зміни провідності залежно від рівня окислювання в провідникових полімерах застосовується для створення хемотронних мікропристроїв, наприклад, в електрохімічному транзисторі.

Нанотехнології при виробництві так званих хемотронних пристроїв дозволяють зменшити відстані між мікроелектродами, які в найближчому майбутньому стануть вимірятися нанометрами.

На основі редокс-полімерів вже створені електрохімічні сенсорні елементи, робота яких ґрунтується на залежності властивостей редокс-полімеру від складу й концентрації компонентів електроліту. Полімерні датчики можуть подавати сигнал про підвищення температури шляхом зменшення провідності. Матеріалами для таких сенсорів є, зокрема, полімери класу індолів, тιοфенолів, полипиролів, анілінів або фуранів.

Сенсори на основі провідникових полімерів працюють при кімнатних температурах, прості в експлуатації й налагодженні. Вони мають високу чутливість, що дозволяє визначати наявність в навколишньому середовищі речовин з концентрацією від 0,1 ppm (одна десятимільйонна) до 100 ppm.

Питання для самоперевірки

1. Чому питомий опір металів збільшується з підвищенням температури? Що називають температурним коефіцієнтом питомого опору? Чи є він константою для даного металу?

2. Як впливають домішки на питомий опір металів? Сформулюйте правило Матіссена.

3. Чому металеві сплави типу твердих розчинів мають більш високий питомий опір, ніж чисті компоненти, що утворюють сплав?

4. Чому при термічному загартуванні питомий опір металів зростає, а при термічному відпалі - зменшується? Як і чому змінюється питомий опір металів при плавленні?

5. Поясніть поведження провідників в електромагнітному полі на високих частотах. Намалюйте графік розподілу густини струму по перетину циліндричного провідника при впливі на нього напруги високої частоти.

6. Які метали й у яких умовах можуть переходити в стан надпровідності? Як впливає магнітне поле на критичну температуру переходу в стан надпровідності?

7. Як і чому змінюється питомий опір металів при механічних впливах (стиск, розтягання, вигин, пластична деформація)?

8. Як залежить питомий опір тонких металевих плівок від їхньої товщини й чому?

9. Які основні види провідників електричного струму вам відомі?

10. Чи може метал використовуватись як електроізоляційний матеріал?

11. Які властивості міді обумовлюють її широке застосування в електронній техніці?

12. Які переваги й недоліки в порівнянні з міддю має алюміній як провідниковий матеріал?

13. Наведіть приклади сплавів високого опору та їхнього використання.

14. Які функції виконує ніхром в приладах мікроелектроніки?

15. У яких умовах можлива поява термо-е.р.с. у замкнутому ланцюзі? Назвіть основні механізми, відповідальні за виникнення термо-е.р.с.

16. Наведіть приклади матеріалів для термопар.

17. Які метали відносять до тугоплавких? Які з тугоплавких металів використовуються в вакуумних електронних приладах?

18. Які функції виконують вольфрам і молібден в напівпровідникових приладах?

19. Які з благородних металів використовуються в напівпровідникових приладах та інтегральних мікросхемах? Які функції вони там виконують?

20. Яка властивість срібла заважає його використанню для контактів в напівпровідникових приладах та інтегральних мікросхемах?

21. Опишіть неметалічні провідникові матеріали і наведіть приклади їхнього застосування в електронній техніці.

23. Опишіть полімерні провідникові матеріали і наведіть приклади їхнього застосування в електронній техніці.

Задачі

1. Визначити час, протягом якого електрон пройде відстань $l = 1$ км по мідному дроту, якщо питомий опір міді $0,017$ мкОм·м, а різниця потенціалів на кінцях провідника $U = 220$ В. За який час електрон пролетить цю ж відстань, рухаючись без зіткнень, при тій же різниці потенціалів? Який час передачі сигналу?

Розв'язання.

Концентрація вільних електронів у міді $n = 8,45 \cdot 10^{28}$ м⁻³. Середню швидкість дрейфу електронів знаходимо з (2.1):

$$v = E / (\rho n e) = (U / (\rho n e l)) = \frac{220}{0,017 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,45 \cdot 10^{28} \cdot 10^3} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Час дрейфу електрона по провіднику $t = l/v = 10^6$ с.

При відсутності зіткнень із вузлами кристалічних ґраток електрон рухається рівноприскорено й час польоту

$$t_{\text{пр}} = \sqrt{2l/a} = \sqrt{2l^2 m / (eU)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 220}} = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Передача енергії вздовж дротів лінії здійснюється електромагнітним полем, що поширюється уздовж дротів зі швидкістю світла c . Приймавши, що середовищем, що оточує провідник, є повітря, час передачі сигналу

$$t_c = l/c = 10^3 / (3 \cdot 10^8) = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

2. У мідному провіднику під дією електричного поля проходить електричний струм густиною 1 А/мм^2 . Визначити швидкість дрейфу електронів.

3. При включенні в електричний ланцюг провідника діаметром $0,5 \text{ мм}$ і довжиною 43 мм різниця потенціалів на кінцях провідника склала $2,4 \text{ В}$ при струмі 2 А . Визначити питомий опір матеріалу провідника.

4. Мідний і алюмінієвий провідники рівної довжини мають однакові опори. Визначити відношення діаметрів цих провідників. Обчислити, у скільки разів маса алюмінієвого провідника менше за масу мідного провідника.

5. Визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення α_l і подовження ніхромового дроту, якщо відомо, що при підвищенні температури від 20 до $1000 \text{ }^\circ\text{С}$ електричний опір дроту змінюється від 50 до $56,6 \text{ Ом}$. Довжина дроту в холодному стані $l = 50 \text{ м}$. Температурний коефіцієнт питомого опору ніхрому α_p прийняти рівним $15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Розв'язання: Згідно (2.8) і (2.9):

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} = \frac{56,6 - 50}{50(1000 - 20)} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$$
$$\alpha_l = \alpha_p - \alpha_R = (15 \dots 13,5) \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

Звідси: $\Delta l = l\alpha_l \Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}$.

$$\Delta l = l\alpha_l \Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}.$$

6. Вуглецевий резистор і дротяний резистор, виготовлений з ніхрому, мають однаковий номінальний опір $R_{\text{ном}} = 100 \text{ Ом}$. Резистори з'єднані паралельно й включені під напругу $U = 50 \text{ В}$. Чи однакова потужність буде виділятися на цих резисторах?

Розв'язання: У перший момент після подачі напруги на резисторах виділяється однакова потужність $P_{\text{поч}} = U^2/R_{\text{ном}} = 25 \text{ Вт}$. Потім відбувається розігрів резисторів до максимальної температури, обумовлений електричною потужністю, що виділяється, і умовами тепловідводу. Оскільки ніхром має позитивний температурний коефіцієнт питомого опору, а основні модифікації вуглецю - негативний, то при нагріванні опір резистора з ніхрому стає більшим номінального, а опір вуглецевого резистора, навпаки, зменшується. Відповідно у вуглецевому резисторі виділяється більша потужність.

7. Питомий опір чистої міді при 20 і 100 °С дорівнює відповідно 0,0168 і 0,0226 мкОм·м. Користуючись лінійною апроксимацією залежності $\rho(T)$, визначити температурний коефіцієнт питомого опору при 0 °С.

8. Є два провідникові тіла, що пройшли однакову технологічну обробку. Склад першого тіла (Cu + 2 ат. % Zn), а другого - (Cu + 0,5 ат. % As). Визначити, який матеріал має більш високу питому провідність.

Розв'язання

Використаємо правило Лінде (2.10), враховуючи, що атоми цинку й миш'яку належать до одного періоду періодичної системи елементів. Тому що мідь одновалентна, то при введенні цинку $\Delta Z=1$, а при введенні миш'яку $\Delta Z=4$. Приймаємо до уваги, що залишковий опір лінійно залежить від концентрації x атомів домішок. Таким чином,

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост} = \rho_T + b(\Delta Z)^2 x,$$

Звідки $\rho_2 - \rho_1 = b(\Delta Z_2)^2 x_{As} - b(\Delta Z_1)^2 x_{Zn} = b \cdot (16 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}) = 0,06 b$.

Таким чином, перший матеріал має менший питомий опір, тобто більш високу питому провідність.

9. Питомий опір мідного провідника, що містить 0,5 ат. % індію, дорівнює 0,0234 мкОм·м. Визначити концентрацію атомів індію в мідному сплаві з питомим опором 0,0298 мкОм·м, вважаючи, що весь залишковий опір обумовлений розсіюванням на домішкових атомах індію.

10. Визначити внутрішню контактну різницю потенціалів, що виникає при контакті двох металів з концентрацією вільних електронів $n_1 = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ і $n_2 = 1 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

11. Один спай термопар розташований у пічі із температурою 200 °С, інший - перебуває при температурі 20 °С. Вольтметр показує при цьому термо-е.р.с. 1,8 мВ. Чому дорівнює термо-е.р.с., якщо другий спай термопар помістити в посудину: а) з льодом, що тане; б) з киплячою водою? Відносну питому термо-е.р.с. у всьому температурному діапазоні 0...200 °С вважати постійною.

12. Обчислити глибину проникнення електромагнітного поля в мідний провідник на частотах 50 Гц і 1 МГц.

Глава 3 Напівпровідникові матеріали

До напівпровідників відносять матеріали, переважаючим механізмом провідності в яких є електронно–діркова провідність. Для напівпровідників характерна наявність не дуже широкої забороненої зони на енергетичній діаграмі.

На відміну від металів, де наявність вільних електронів обумовлена самою природою металевого зв'язку, у напівпровідниках поява носіїв заряду визначається рядом факторів, найважливішими з яких є хімічна чистота матеріалу й температура. Залежно від ступеня чистоти напівпровідники підрозділяють на власні й домішкові.

3.1 Власні та домішкові напівпровідники

Відповідно до зонної теорії твердого тіла (дивись п. 1.3) у напівпровіднику при температурі абсолютного нуля валентна зона повністю заповнена електронами, а зона провідності абсолютно вільна. Через блокуючу дію забороненої зони чистий напівпровідник при 0 К не має електропровідності, тобто є ідеальним ізолятором. При температурах, відмінних від абсолютного нуля, деякі з електронів за рахунок теплових флуктуацій переходять в зону провідності, тобто стають **електронами провідності**. Завдяки звільненню енергетичних рівнів в валентній зоні її електрони також беруть участь у процесі електропровідності за рахунок естафетних переходів під дією електричного поля на енергетичні рівні, що звільнилися. Рух валентних електронів є суто квантово-механічним явищем. Сукупне квантово-механічне поведіння електронів валентної зони можна представити як класичний рух окремих квазічастинок – **дірок**, що мають позитивний заряд і деяку ефективну масу, яка відрізняється від ефективної маси вільних електронів. Оскільки електрони і дірки утворюються парами шляхом іонізації власних атомів напівпровідника, такі носії заряду називають власними, а напівпровідник, де переважає такий механізм утворення носіїв заряду – власним напівпровідником.

Чим вище температура й менше ширина забороненої зони, тим вище швидкість теплової генерації пар власних носіїв заряду. Одночасно з генерацією в напівпровіднику безупинно йде й зворотний процес – рекомбінація електронів і дірок, тобто

повернення електронів у валентну зону на вільний енергетичний рівень, що означає зникнення пари носіїв заряду. У результаті протікання двох конкуруючих процесів у напівпровіднику при будь-якій температурі встановлюється деяка рівноважна концентрація електронів n і дірок p . Специфіка власного напівпровідника полягає в тому, що в ньому рівноважна концентрація електронів n дорівнює рівноважній концентрації дірок p :

$$n = p = n_i, \quad (3.1)$$

де n_i – концентрація власних носіїв заряду (індекс i походить від англійського Intrinsic – власний):

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (3.2)$$

$$N_V = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3}; \quad N_C = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (3.3)$$

де N_V, N_C – ефективна густина станів дірок валентної зони і електронів зони провідності, відповідно, m^{-3} ; m_n – ефективна маса електрона, г; m_p – ефективна маса дірки, г; k – постійна Больцмана $eV \cdot K^{-1}$; h – постійна Планка, $eV \cdot c$; T – температура, К.

На відміну від металів електронний газ у більшості напівпровідників є неvirодженним. Імовірність заповнення енергетичних рівнів електронами й дірками у власному напівпровіднику показана на рис. 3.1.

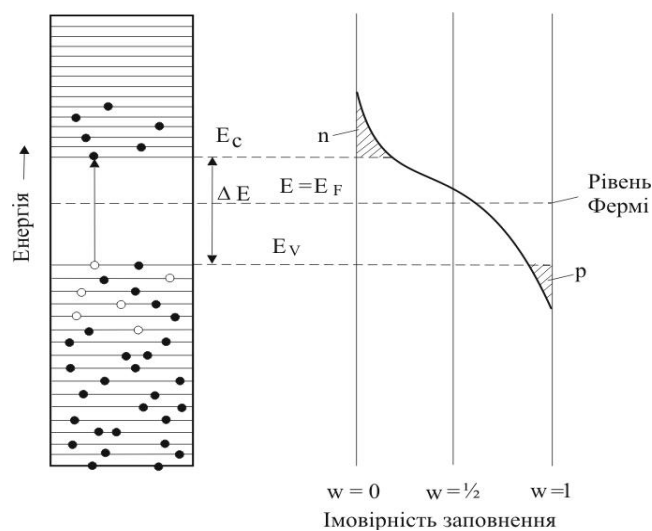


Рисунок 3.1 – Енергетична діаграма й функція ймовірності заповнення енергетичних рівнів для власного напівпровідника

Положення рівня Фермі у власному напівпровіднику:

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}. \quad (3.4)$$

З огляду на близькість значень N_v і N_c , дійдемо висновку, що у власному напівпровіднику рівень Фермі розташований приблизно посередині забороненої зони (дивись рисунок 3.1). Для графічного зображення температурної залежності n_i вираз (3.2) зручно представити у вигляді

$$\ln n_i = \ln \sqrt{N_c N_v} - \frac{\Delta E}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.5)$$

Добуток $N_c N_v$ є слабкою функцією від температури; тому залежність логарифма концентрації носіїв заряду від зворотної температури близький до лінійного (рис. 3.2), причому нахил прямої характеризує ширину забороненої зони напівпровідника.

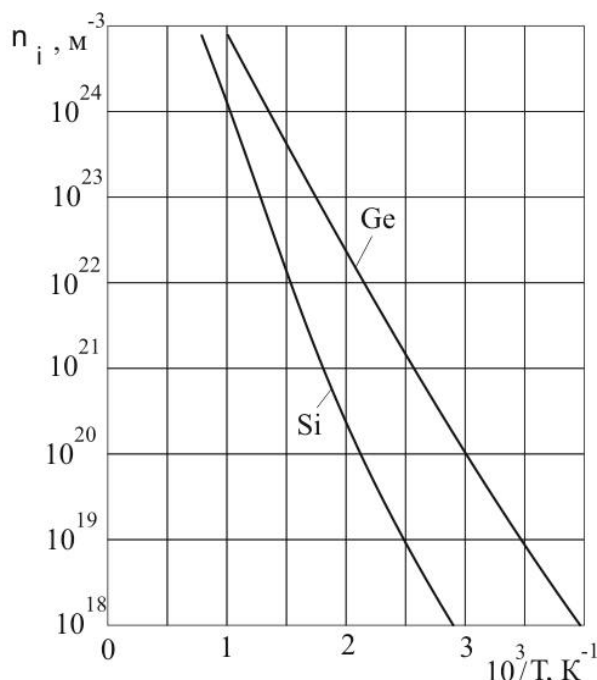


Рисунок 3.2 – Температурна залежність власної концентрації носіїв заряду в кремнії й германії

Механізм власної електропровідності ковалентних напівпровідників пояснює рисунок 3.3, на якому у вигляді плоскої моделі зображені кристалічна решітка кремнію.

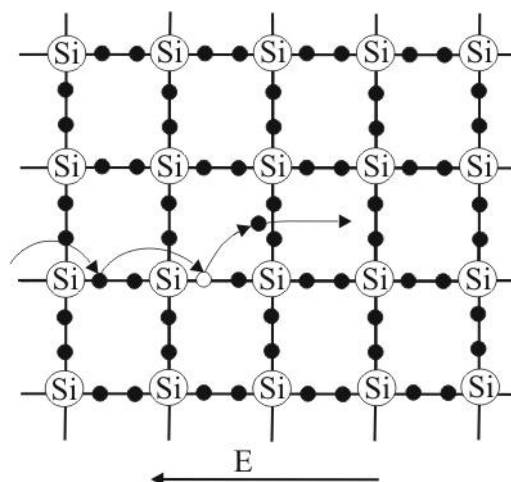


Рисунок 3.3 – Схематичне подання власної електропровідності напівпровідника

Кремній і германій, є елементами IV групи системи Менделєєва, кристалізуються в структурі алмаза (див. рис.1.2). У цій структурі кожний атом взаємодіє силами ковалентних зв'язків з чотирма найближчими сусідами. Чотири валентних електрони будь-якого атома утворюють чотири ковалентних зв'язків і не можуть відірватися від своїх атомів без значних витрат енергії.

Енергетичні витрати на розрив зв'язку й звільнення електрона кількісно дорівнюють ширині забороненої зони. Атоми, що втратили електрони, перетворюються в позитивно заряджені іони, а незаповнений валентний зв'язок містить енергетичну вакансію для електронів, тобто проявляє себе як дірка. Позитивно заряджений іон може запозичити електрон від будь-якого сусіднього атома, що призведе до переміщення дірки по кристалу. Вільні електрони і дірки провідності хаотично блукають по решітці доти, доки не рекомбінують при зустрічі. Під дією зовнішнього електричного поля рух носіїв заряду здобуває спрямований характер. При цьому переміщення дірки до негативного полюса джерела можна представити як естафетний перехід валентних електронів від одного атома до іншого в напрямку проти поля.

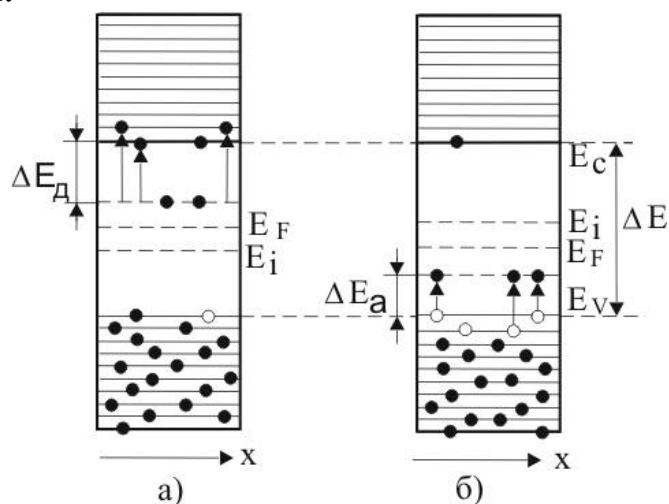
Домішки, які перебувають у міжвузлових положеннях кристалічної решітки (домішки впровадження) є електрично пасивними в напівпровіднику. Домішки, які перебувають у вузлах кристалічної решітки (домішки заміщення), створюють додаткові рівні в енергетичній діаграмі напівпровідника. Якщо додаткові рівні розташовані в забороненій зоні, то домішки є електрично активними, тобто впливають на електропровідність напівпровідника. При малій

концентрації домішок відстань між домішковими атомами велика, їхні електронні оболонки не взаємодіють одна з одною. Внаслідок цього домішкові енергетичні рівні є дискретними, тобто не розщеплюються в зону. Енергетичні рівні можуть створювати й усілякі дефекти структури, у першу чергу, вакансії й міжвузлові атоми.

Напівпровідник, електрофізичні властивості якого в основному визначаються домішками, називають домішковим.

Донори й акцептори. Домішки можуть або поставляти електрони в зону провідності напівпровідника, або приймати їх з рівнів його валентної зони. На рисунку 3.4 показані ці два випадки, що мають найбільше практичне значення.

Домішкові рівні, заповнені електронами при відсутності зовнішніх енергетичних впливів, розташовані в забороненій зоні поблизу нижнього краю зони провідності. При зовнішньому збудженні електрони із домішкових рівнів можуть легко переходити у найближчу вільну зону й брати участь у процесі електропровідності.



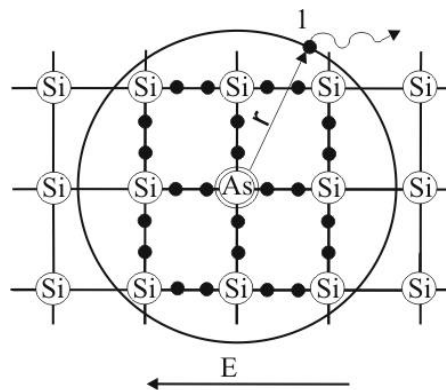
ΔE_d – енергія іонізації донорів; ΔE_a – енергія іонізації акцепторів; x – просторова координата; а – електронний тип провідності (n); б - дірковий тип провідності (p)

Рисунок 3.4 – Енергетичні діаграми напівпровідників з домішками різного типу при $T > 0$

Енергія, необхідна для переходів, значно менше енергії іонізації власних атомів напівпровідника, тобто ширини забороненої зони.

Домішки, що поставляють електрони в зону провідності напівпровідника, називають **донорами**. Завдяки постачанню

донорами додаткових електронів провідності у таких матеріалах концентрація електронів перевищує концентрацію дірок, внаслідок чого вони одержали назву напівпровідників n-типу. Мінімальну енергію, яку необхідно одержати електрону для переведу його з донорного рівня в зону провідності, називають енергією іонізації донора ΔE_d (рис. 3.4,а). Наприклад, у кристалічній решітці кремнію частина основних атомів заміщена атомами миш'яку (елемента V групи). Вбудовуючись у вузол решітки, атом миш'яку віддає чотири електрони на утворення зв'язків з найближчими сусідами, а п'ятий електрон виявляється зайвим, тобто не бере участі у створенні ковалентних зв'язків. Через велику діелектричну проникність напівпровідника кулонівське притягання цього електрона ядром значною мірою послаблено. Тому досить невеликого теплового збудження, щоб відірвати надлишковий електрон від домішкового атома (рис.3.5). Для цього необхідно витратити енергію, рівну ΔE_d . Атом домішки, що втратив електрон, перетворюється в позитивно заряджений іон, нерухомо закріплений в даному вузлі решітки.



1 – надлишковий електрон домішкового атома

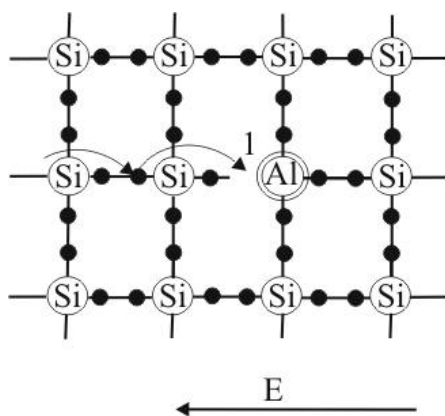
Рисунок 3.5 – Схематичне зображення доної домішки в ковалентному напівпровіднику

Тобто, домішки заміщення, валентність яких перевищує валентність основних атомів решітки, проявляють властивості донорів. Крім миш'яку типовими донорами в кремнії й германії є фосфор і сурма. Енергія іонізації донорів у германії становить менше 0,05 еВ, а в кремнії – менше за 0,1 еВ.

Домішка може внести незаповнені рівні, що розташовуються в забороненій зоні поблизу від верхнього краю валентної зони. Завдяки тепловому збудженню електрони з валентної зони напівпровідника закидаються на ці вільні домішкові рівні. Напівпровідник з такою

домішкою має концентрацію дірок більшу, ніж концентрація електронів, що перейшли з валентної зони в зону провідності, і його називають напівпровідником р-типу, а домішки, що захоплюють електрони з валентної зони напівпровідника, - акцепторами. Мінімальну енергію, яку необхідно надати електрону валентної зони, щоб перевести його на акцепторний рівень, називають енергією іонізації акцептора (рис. 3.4,б).

Якщо в кристалічну решітку кремнію введені домішки якогонебудь тривалентного елемента (наприклад, алюмінію), то для встановлення хімічних зв'язків із чотирма сусідніми атомами решітки в нього не вистачає одного електрона, тому ковалентний зв'язок одного з сусідніх атомів кремнію залишається ненасиченим. Через потребу встановлення чотирьох хімічних зв'язків атом алюмінію може захопити електрон в одного із сусідніх атомів кремнію. У результаті домішковий атом перетворюється в негативно заряджений іон, витрачаючи енергію, рівну енергії іонізації акцепторів. Захоплений електрон локалізується на домішковому атомі й не приймає участі в створенні електричного струму. Атом кремнію, що втратив електрон, стає позитивно зарядженим іоном, поблизу якого є вільний енергетичний стан, тобто утворює дірку. За рахунок естафетного переходу електронів від одного атома до іншого дірка може переміщатися по кристалі (рис. 3.6).



1 – незавершений зв'язок

Рисунок 3.6 – Схематичне зображення акцепторної домішки в ковалентному напівпровіднику

Таким чином, домішки заміщення, що мають валентність менше валентності основних атомів решітки, в ковалентних напівпровідниках є **акцепторами**. Крім алюмінію акцепторні

властивості в кремнії й германії проявляють бор, галій, індій. Енергія іонізації акцепторів чисельно близька до енергії іонізації донорів.

Основні й неосновні носії заряду. Носії заряду, концентрація яких у даному напівпровіднику більше, називають основними, а носії, концентрація яких менше, – неосновними. Так, у напівпровіднику n-типу електрони є основними носіями, а дірки – неосновними; у напівпровіднику p-типу дірки – основними носіями, а електрони – неосновними.

При зміні концентрації домішок у напівпровіднику змінюється положення рівня Фермі й концентрація носіїв заряду обох знаків, тобто електронів і дірок. Однак добуток концентрацій електронів і дірок у невиродженому напівпровіднику при заданій температурі в умовах термодинамічної рівноваги є величина постійна, що не залежить від вмісту домішок (так зване співвідношення діючих мас):

$$n \cdot p = n_i^2. \quad (3.6)$$

Якщо, наприклад, у напівпровіднику n-типу збільшити концентрацію донорів, то зросте число електронів, що переходять в одиницю часу із домішкових рівнів у зону провідності. Відповідно зросте швидкість рекомбінації носіїв заряду й зменшиться рівноважна концентрація дірок - «закон діючих мас» для носіїв заряду.

В робочому інтервалі температур напівпровідникових приладів і інтегральних схем атоми донорної або акцепторної домішки повністю іонізовані (виснаження легуючої домішки), тому концентрація основних носіїв заряду співпадає з концентрацією відповідної домішки, а концентрацію неосновних носіїв заряду знаходять із (3.6):

для напівпровідника n – типу:

$$n_n = N_d, \quad p_n = n_i^2 / N_d,$$

для напівпровідника p – типу:

$$p_p = N_a, \quad n_p = n_i^2 / N_a,$$

де n_n , n_p – концентрації електронів провідності в напівпровідниках n- і p-типу, відповідно, м^{-3} ; p_n , p_p – концентрації дірок провідності в напівпровідниках n- і p-типу, відповідно, м^{-3} ; N_d , N_a - концентрації донорної і акцепторної домішок, відповідно, м^{-3} .

3.2 Провідність напівпровідників

Під дією зовнішнього електричного поля носії заряду, що знаходяться в безперервному тепловому русі, здобувають деяку швидкість спрямованого руху (швидкість дрейфу) і створюють електричний струм. Відношення середньої сталої швидкості спрямованого руху до напруженості електричного поля називають рухливістю носіїв заряду $\mu = \bar{v} / \bar{E}$, де μ – рухливість носіїв заряду, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; \bar{v} – швидкість дрейфу, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, \bar{E} – напруженість електричного поля, $\text{В}/\text{м}$. З урахуванням двох типів носіїв заряду рівняння для густини струму:

$$J = e(n\mu_n + p\mu_p)\bar{E}, \quad (3.7)$$

де n – концентрація електронів провідності, p – концентрація дірок провідності, μ_n та μ_p – рухливості електронів і дірок, відповідно, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

За допомогою узагальненого закону Ома

$$J = \gamma \bar{E}, \quad (3.8)$$

де γ – питома провідність, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$,
знаходимо питому провідність напівпровідника:

$$\gamma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (3.9)$$

У власному напівпровіднику з урахуванням (3.1)

$$\gamma = en_i(\mu_n + \mu_p).$$

У домішкових напівпровідниках, як правило, одним з доданків у виразі (3.9) можна знехтувати. Наприклад, при досить великій концентрації донорів у напівпровіднику внесок дірок в електропровідність мізерно малий. У більшості напівпровідників рухливість дірок менше рухливості електронів.

Причинами розсіювання носіїв заряду в напівпровідниках, що по-різному впливають на величину рухливості та її температурну залежність, є: 1) теплові коливання атомів або іонів кристалічної решітки; 2) домішки в іонізованому або в нейтральному стані;

3) дефекти решітки (вакансії, атоми впровадження, дислокації, тріщини, границі кристалів і т. ін.). У напівпровідниках з атомною решіткою розсіювання носіїв заряду відбувається на теплових коливаннях решітки й на іонізованих домішках. Ці два механізми розсіювання призводять до появи двох ділянок температурної залежності рухливості. Рухливість, обмежена розсіюванням носіїв заряду тільки на теплових коливаннях вузлів решітки, μ_T зменшується з ростом температури:

$$\mu_T \sim T^{-3/2}. \quad (3.10)$$

Розсіювання на теплових коливаннях решітки відіграє домінуючу роль при підвищених температурах. В області низьких температур основне значення має розсіювання на іонізованих атомах домішок. Рухливість носіїв заряду, обмежена розсіюванням тільки на іонізованих домішках, μ_i зростає з ростом температури: $\mu_i \sim T^{3/2}/N_i$ (N_i – концентрація іонізованих домішок). (3.11)

Якщо в розсіюванні носіїв заряду беруть участь обидва механізми, то результуюча рухливість може бути знайдена за допомогою співвідношення $1/\mu = 1/\mu_T + 1/\mu_i$. Її температурна залежність зображується кривою із чітко вираженим максимумом (рис. 3.7). Зі збільшенням концентрації домішок максимум рухливості зменшується й зміщується у бік більш високих температур. При дуже низьких температурах, коли домішки слабо іонізовані, розсіювання носіїв заряду відбувається на нейтральних атомах домішки. При наявності тільки цього механізму розсіювання рухливість не залежить від температури, а визначається тільки концентрацією домішки.

Різке зростання питомої провідності при підвищених температурах відповідає області власної електропровідності, що характеризується рівністю концентрацій електронів і дірок. За нахилом прямої на ділянці власної електропровідності (3.5) можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника ΔE . У виродженого напівпровідника ($N_{ДЗ}$) концентрація носіїв заряду не залежить від температури, а температурна залежність питомої провідності в області домішкової електропровідності якісно подібна до температурної зміни питомої провідності металів.

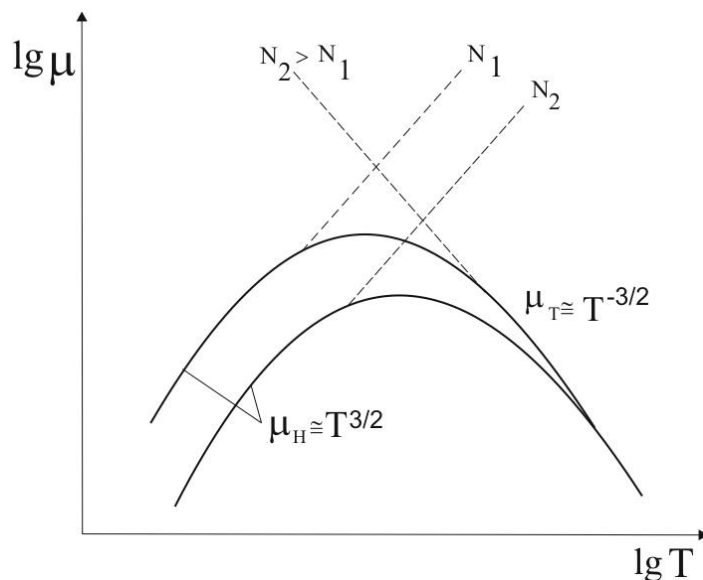


Рисунок 3.7 - Температурна залежність рухливості носіїв заряду для невідродженого напівпровідника при різних концентраціях домішки

Нерівноважні носії заряду в напівпровідниках. В напівпровідниках крім теплової генерації вільних електронів і дірок за рахунок теплового збудження можливі й інші механізми появи носіїв заряду: при опроміненні світлом, при впливі сильного електричного поля, при інжекції через контакт і ін. Дія таких факторів призводить до появи додаткових, нерівноважних, носіїв заряду. Їхня концентрація є надлишковою стосовно рівноважної: $\Delta n = n - n_0$; $\Delta p = p - p_0$, де n_0 і p_0 – рівноважні концентрації електронів і дірок, що виникають під дією теплоти, м^{-3} ; n і p – їхні повні концентрації.

Після припинення нетеплового збудження напівпровідник повертається в рівноважний стан, при цьому надлишкова концентрація носіїв заряду за рахунок процесу рекомбінації спадає до нуля. Надлишкова енергія, що звільняється при рекомбінації електронів і дірок, або випромінюється у вигляді фотона, або передається кристалічній решітці у вигляді теплоти (фононів). У першому випадку рекомбінацію називають випромінювальною, у другому - безвипромінювальною (фононною). Матеріали, в яких велика частка актів рекомбінації є випромінювальними (наприклад, арсенід і фосфід галію) використовуються для виготовлення напівпровідникових джерел випромінювання (світлодіодів, лазерів).

Основними характеристиками процесу рекомбінації є час життя й дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду.

Час життя носіїв заряду. Часом життя нерівноважних носіїв заряду називають відношення надлишкової концентрації (Δn або Δp) нерівноважних носіїв заряду до швидкості зміни цієї концентрації внаслідок рекомбінації. Зміна надлишкової концентрації носіїв заряду після відключення джерела збудження:

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau), \quad (3.12)$$

де Δn_0 – надлишкова концентрація носіїв заряду в момент часу $t = 0$.

Час життя є чутливою характеристикою хімічної чистоти й структурної досконалості напівпровідникового матеріалу і є максимальним у власному напівпровіднику. У реальних напівпровідниках час життя нерівноважних носіїв заряду може становити $10^{-2} \dots 10^{-10}$ с.

Дифузійна довжина – це відстань, на якій в однорідному напівпровіднику при одномірній дифузії під час відсутності електричних і магнітних полів надлишкова концентрація носіїв заряду зменшується внаслідок рекомбінації в e разів, тобто – це середня відстань, на яку носій дифундує за час життя. Вирішуючи рівняння дифузії, можна одержати вираз, що пов'язує дифузійну довжину із часом життя: $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$; $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$, де L – дифузійна довжина носіїв заряду відповідного типу, м; D – їхні коефіцієнти дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$.

Чим менше домішок і дефектів у напівпровіднику, тим більший час життя й, відповідно, дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду.

3.3 Оптичні й фотоелектричні явища в напівпровідниках

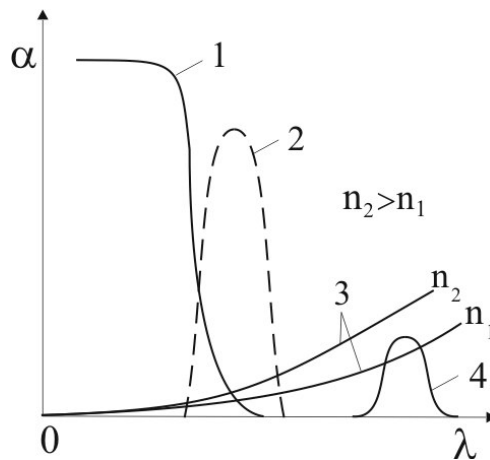
Поглинання світла. Світло, проникаючи в напівпровідник, вступає із кристалічною решіткою у взаємодію, пов'язану з обміном енергій. Позначимо через I_0 інтенсивність світла, тобто кількість світлової енергії, що проходить в одиницю часу через нормальний до світлового потоку одиничний перетин напівпровідника. Частина світлового потоку I_R відбивається від границі розподілу. Частина відбитої енергії характеризується коефіцієнтом відбиття $R = I_R/I_0$. Інтенсивність світла, що проходить через напівпровідник, послаблюється внаслідок процесу поглинання за законом Бугера-Ламберта:

$$I(x) = I_1 \exp(-\alpha x), \quad (3.13)$$

де x - глибина від поверхні напівпровідника, м; $I_1 = I_0(1 - R)$ - інтенсивність світла, що входить через поверхню зразка, Вт/м²; α - показник поглинання, м⁻¹.

При нормальному падінні світлових променів для слабо поглинаючих середовищ коефіцієнт відбиття може бути розрахований за відомою формулою оптики $R = (n-1)^2 / (n+1)^2$, де n - показник переломлення світла в напівпровіднику. Для більшості напівпровідників $n = 3 \dots 4$. Цим значенням відповідає коефіцієнт відбиття $R = 25 \dots 36 \%$.

Залежність показника поглинання α від довжини хвилі або енергії фотонів називають спектром поглинання речовини. У напівпровідниках розрізняють кілька механізмів оптичного поглинання. Кожному з них відповідає певна область спектра (рис. 3.8).



1 - власне поглинання; 2 - екситонне поглинання; 3 - поглинання світла носіями заряду; 4 - домішкове поглинання

Рисунок 3.8 - Залежність показника поглинання від довжини хвилі падаючого випромінювання

Власне поглинання світла обумовлене переходами електронів з валентної зони в зону провідності, тобто енергія квантів світла йде на іонізацію атомів напівпровідника. Власне поглинання можливо в тому випадку, якщо енергія фотонів перевищує ширину забороненої зони. Залежно від ширини забороненої зони воно проявляється у видимій або ближній інфрачервоній області спектра. У більшості

напівпровідників ширина забороненої зони при нагріванні зменшується. Наслідком температурної зміни ширини забороненої зони є зсув краю власного поглинання.

Екситонне поглинання. У деяких напівпровідниках при поглинанні фотонів утворюються особливі збуджені стани електронів валентної зони, називані екситонами. Екситон – це система із взаємозалежних власних електростатичних полів електрона й залишеної їм дірки. Енергія утворення екситону менше ширини забороненої зони, оскільки остання є мінімальною енергією, необхідною для створення розділеної електронно-діркової пари.

Екситон може блукати по кристалу, передаючись від одного атома (що приходить у нормальний стан) до іншого. Тому що екситон є в цілому нейтральним поєднанням електрона з діркою, то хаотичний рух екситонів по кристалу не створює електричного струму.

Поглинання світла носіями заряду. Цей механізм поглинання обумовлений переходами електронів і дірок з одного рівня на інший під впливом квантів світла усередині енергетичних зон (відповідно зони провідності й валентної зони). При фіксованій довжині хвилі світла λ показник поглинання тим більше, чим вище концентрація носіїв заряду в напівпровіднику, тобто чим менше питомий опір матеріалу.

Домішкове поглинання світла обумовлене іонізацією або збудженням домішкових атомів у кристалічній решітці, коли енергія поглинених квантів світла витрачається або на перехід електронів з донорних рівнів у зону провідності, або на перехід електронів з валентної зони на акцепторні рівні. Домішкове поглинання зміщене від краю власного поглинання в далеку інфрачервону область спектра й експериментально спостерігається лише при низьких температурах, коли більша частина атомів домішки ще не іонізована.

Поглинання світла решіткою відбувається в результаті взаємодії електромагнітного поля із коливаннями зарядів в вузлах кристалічної решітки і пов'язане зі зміною коливальної енергії атомів. Воно проявляється в далекій інфрачервоній області спектра й накладається на домішкове поглинання й поглинання носіями заряду.

Із всіх розглянутих механізмів оптичного поглинання світла лише власне й домішкове поглинання супроводжуються генерацією додаткових носіїв заряду. Тому ці два механізми поглинання називають фотоактивними.

Фотопровідність. Зміна електричної провідності (питомого опору) речовини під впливом електромагнітного випромінювання називають фотопровідністю (фоторезистивним ефектом).

При фотопровідності первинним є процес поглинання фотонів. Фотопровідність $\Delta\gamma$ дорівнює різниці провідностей напівпровідника на світлі й у темряві: $\Delta\gamma = \gamma_c - kT = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p$, де Δn і Δp - концентрації нерівноважних носіїв заряду, що виникли внаслідок оптичної генерації, м^{-3} .

Швидкість оптичної генерації носіїв заряду g_0 визначається інтенсивністю падаючого світла I й показником поглинання α : $g_0 = \eta_0 \alpha I$, де η_0 - квантовий вихід внутрішнього фотоефекта, тобто кількість пар носіїв заряду, що доводиться на один поглинений квант. У фотоелектрично активній області електромагнітного спектра квантовий вихід найчастіше дорівнює одиниці, тобто кожний фотон створює при поглинанні одну пару носіїв заряду.

Після припинення опромінення провідність більш-менш швидко (від мікросекунд до хвилин і навіть годин) повертається до того значення, що вона мала до опромінення. Інерційність фотопровідності різних напівпровідникових речовин необхідно враховувати при розробці швидкодіючих фоторезисторів.

Положення спектрального максимуму власної фотопровідності визначається шириною забороненої зони напівпровідника. Для виготовлення власних фоторезисторів використовують халькогеніди елементів II і IV груп: сульфід (CdS) і селенід (CdSe) кадмію (чутливі до видимого випромінювання), сульфід свинцю (PbS) і тверді розчини $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (область спектральної чутливості 1...15 мкм). Високу чутливість в ІЧ-області спектра мають також вузькозонні напівпровідники $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ – арсенід (InAs) і антимонід (InSb) індію.

Люмінесценція. Люмінесценцією називають електромагнітне нетеплове випромінювання, тривалість якого значно перевищує період світлових коливань. При люмінесценції акти збудження й випромінювання світла розділені в часі (а іноді й у просторі) проміжними процесами, що обумовлює відносно тривалий час існування світіння речовини після припинення збудження. Речовини, що здатні люмінесціювати, називаються люмінофорами. Найбільш численну групу люмінофорів утворюють напівпровідники з досить широкою забороненою зоною.

Залежно від виду люмінофора розрізняють фотолюмінесценцію (збудження світлом), катодолюмінесценцію (збудження електронним променем) і електролюмінесценцію (світіння під дією електричного поля).

У напівпровідниках люмінесценція в більшості випадків обумовлена рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду. Генерація видимого випромінювання можлива лише в напівпровідниках із шириною забороненої зони більше 1,7 еВ. Випромінювальні квантові переходи можуть відбуватися спонтанно (самовільно) і вимушено. При спонтанних переходах випускнення фотонів не залежить від зовнішніх впливів на систему. Акти спонтанного випромінювання відбуваються незалежно один від одного в різні моменти часу, тому спонтанне випромінювання є некогерентним. Вимушені квантові переходи відбуваються під дією зовнішнього електромагнітного поля певної частоти, що відповідає частоті збудженого випромінювання. Особливість змушеного (стимульованого) випромінювання полягає в тому, що вимушуючі фотони мають ту ж частоту, поляризацію й фазу, що й фотони змушеного випромінювання, збігаються також й напрямки поширення фотонів. Таким чином, змушене випромінювання є когерентним.

Різні види люмінесценції знаходять різноманітні практичні застосування. За допомогою люмінофорів можна перетворити невидиме випромінювання у видиме світло. Наприклад, у так званих лампах денного світла невидиме оком ультрафіолетове випромінювання електричного розряду в парах ртуті перетворюється у видиме світло, спектральний склад якого можна змінювати підбором люмінофора, що покриває стінки лампи (фотолюмінесценція). Світіння люмінофорів при бомбардуванні їх потоком швидких електронів використовується в електронно-променевих трубках і в електронних мікроскопах (катодолюмінесценція). Однак найбільший практичний інтерес викликає явище електролюмінесценції, що обумовлено швидким розвитком оптоелектроніки.

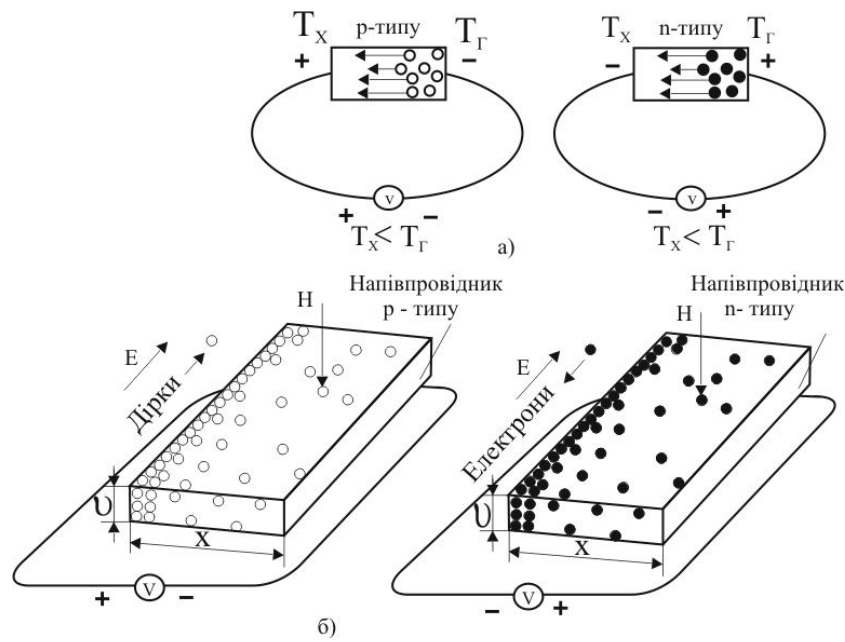
Інжекційна електролюмінесценція спостерігається при включенні р-п-переходу в прямому напрямку. Вона є основою принципу дії світлодіодів і напівпровідникових лазерів. Передпробійна електролюмінесценція виникає в сильних електричних полях, коли розвиваються процеси ударної іонізації, яка призводить до збільшення концентрації нерівноважних носіїв заряду.

3.4 Термоелектричні явища та ефект Хола у напівпровідниках

Термо-е.р.с. У напівпровідниках під дією різниці температур виникає різниця потенціалів, що називають термоелектрорушійною силою. Основні причини появи термо-е.р.с. були розглянуті в п. 2.5. У замкнутому ланцюзі, що складається із двох різних провідних матеріалів (наприклад, напівпровідника й металу), буде проходити електричний струм, якщо контакти мають неоднакову температуру. Нерівномірне нагрівання однорідного напівпровідника призводить до градієнта середньої енергії носіїв заряду в різних частинах кристала. Крім того, перепад температури може впливати на зміну концентрації носіїв заряду, чого не спостерігається в металах. Внаслідок зазначених причин виникає дифузійний потік носіїв заряду з нагрітої в більш холодну область кристала. В результаті утворюється внутрішнє електричне поле, яке перешкоджає подальшому розподілу зарядів і сприяє встановленню рівноваги.

У напівпровідниках у загальному випадку в створенні термо-е.р.с. беруть участь носії заряду двох типів - електрони й дірки. Обумовлені ними складові термо-е.р.с. протилежні за знаком. У напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони. Їхній потік від гарячого кінця до холодного більший, ніж у протилежному напрямку. В результаті дифузії на холодному кінці накопичується негативний заряд надлишкових електронів, а на гарячому кінці утворюється некомпенсований позитивний заряд іонізованих донорів. У напівпровіднику p-типу в процесі дифузії беруть участь дірки, тому полярність виникаючої термо-е.р.с. змінюється на протилежну (рис. 3.9,а).

Неоднакова реакція домішкових напівпровідників на неоднорідності теплового поля дозволяє використати термоелектричний ефект для експресного визначення типу електропровідності матеріалу. Найпростіший пристрій, призначений для цих цілей, називається термозондом. Чисельне значення диференційної термо-е.р.с. напівпровідників залежно від температури й концентрації домішкових атомів коливається в межах $10^2 \dots 10^4$ мкВ/К, тобто є на 2...4 порядку вищим, ніж у металів.



а - термозонд; б - ефект Хола

Рисунок 3.9 - Методи визначення типу електропровідності напівпровідника

Велика термо-е.р.с. напівпровідників дозволяє використовувати їх як ефективні перетворювачі теплової енергії в електричну. Основою таких перетворювачів є термоелементи, складені з послідовно включених напівпровідників р- і n-типів.

Ефект Хола. Фізичні явища, що виникають у напівпровіднику при одночасному впливі на нього електричного й магнітного полів, називають гальваноманітними ефектами. Серед гальваноманітних ефектів одним з найважливіших є ефект Хола. Сутність його така. Якщо пластину напівпровідника, по якій проходить електричний струм, помістити в магнітне поле, перпендикулярне струму й магнітному полю, виникне різниця потенціалів - е.р.с. Хола. Її поява обумовлена тим, що на носії заряду, що рухаються зі швидкістю v , у магнітному полі з індукцією \mathbf{B} діє сила Лоренца $F_L = e[\mathbf{v}]$, що відхиляє їх до однієї з бічних граней пластини. Напрямок сили Лоренца не залежить від знака носіїв заряду, а визначається лише напрямками електричного і магнітного полів. При заданих напрямках \mathbf{E} і \mathbf{B} електрони й дірки в напівпровідниках відхиляються в однакову сторону. Оскільки електрони і дірки мають заряд протилежного знаку, то полярність е.р.с. Хола в напівпровіднику n-типу протилежна полярності, що виникає в матеріалі р-типу, що й використовується

для визначення типу електропровідності напівпровідників (рис. 3.9,б).

За результатами виміру е.р.с. Хола можна визначити не тільки знак носіїв заряду, але й розрахувати їхню концентрацію, а при відомому значенні питомої провідності напівпровідника обчислити й рухливість носіїв заряду. Ефект Хола використовується також і як принцип дії ряду напівпровідникових приладів: вимірників магнітної індукції, безконтактних вимірників струму, фазочутливих детекторів, аналізаторів спектра, модуляторів.

3.5 Електропровідність напівпровідників в сильному електричному полі

Рухаючись в електричному полі, електрон змінює як свою координату, так і енергію, переходячи з одного рівня на іншій. При цьому кінетична енергія його збільшується на величину $e \cdot U$ (де U - пройдена електроном різниця потенціалів). Накопичену енергію електрон може втратити при розсіюванні, повернувшись на більш низький рівень. В сильних електричних полях порушується пропорційність між густиною струму в напівпровіднику й напруженістю зовнішнього електричного поля (див. формулу 3.8), тобто не виконується закон Ома. Критична напруженість поля, при якій можливі істотні відхилення від закону Ома $E_{кр} \approx 10^6$ В/м.

В області сильних полів рухливість носіїв заряду також змінюється. Залежно від температури вона може, як зменшуватись, так і зростати зі збільшенням напруженості електричного поля E . При напруженості електричного поля більше 10^6 В/м у напівпровіднику починають з'являтися надлишкові носії заряду й питома провідність його зростає. Механізми збільшення концентрації носіїв: термоелектронна іонізація (при $E \approx 10^6$ В/м); ударна іонізація (при $E \sim 10^7$ В/м); тунельний ефект (або електростатична іонізація - при $E \sim 10^8$ В/м).

3.6 Класифікація напівпровідникових матеріалів

До класу напівпровідників входять сотні найрізноманітніших речовин. Напівпровідникові властивості мають як неорганічні, так і органічні речовини, кристалічні й аморфні, тверді й рідкі, немагнітні

й магнітні. Одна з можливих схем класифікації напівпровідникових матеріалів наведена на рис. 3.10.

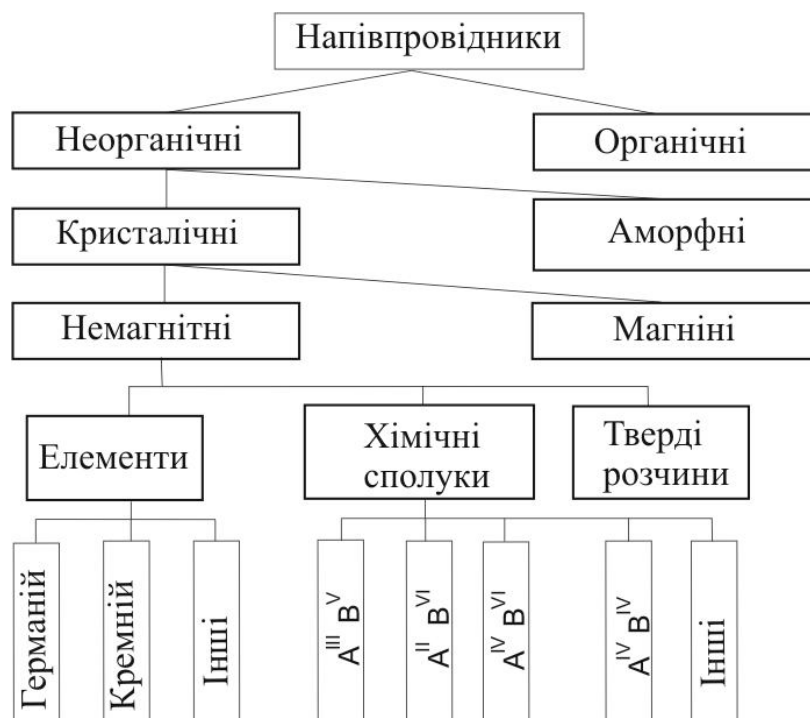


Рисунок 3.10 - Класифікація напівпровідникових матеріалів за складом та властивостями

Основу сучасної електроніки становлять неорганічні кристалічні напівпровідники – елементарні та хімічні сполуки. Кристалічна структура досить великої групи напівпровідникових неорганічних сполук характеризується тетраедричною координацією атомів, як це має місце в решітці алмазу, за що їх називають алмазоподібними. Серед них бінарні сполуки типу $A^{III}B^{V}$ і $A^{II}B^{VI}$ є найважливішими матеріалами напівпровідникової оптоелектроніки.

Багато алмазоподібних напівпровідників утворюють між собою ізовалентні тверді розчини. У твердих розчинах шляхом зміни складу можна плавно й у досить широких межах управляти найважливішими властивостями напівпровідників, зокрема, шириною забороненої зони й рухливістю носіїв заряду. Це відкриває додаткові можливості для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів, дозволяє досягти кращого узгодження фізичних характеристик різних компонентів електронних приладів.

Для виготовлення напівпровідникових приладів використовують як монокристали, так і полікристалічні матеріали. Монокристали є

більш простими системами, з більш досконалою будовою, ніж полікристалічні матеріали. Вони найбільш глибоко вивчені, фізичні явища в них краще піддаються розрахункам, і вони забезпечують більшу надійність і ідентичність параметрів напівпровідникових приладів.

Властивості аморфних, органічних і магнітних напівпровідників вивчені поки недостатньо, хоча практична значимість цих речовин безупинно зростає. В деяких з органічних напівпровідників напівпровідникові властивості поєднуються з еластичністю, що дозволяє виготовляти робочі елементи у вигляді гнучких стрічок і волокон.

3.7 Елементарні напівпровідники

Напівпровідникові властивості проявляють кристали 12 хімічних елементів (табл.3.1). Напівпровідникові властивості має одна з алотропних форм вуглецю – алмаз. Інша його модифікація – графіт за електричними властивостями є провідником ($\Delta E < 0,1$ eV). Олово в нормальних умовах є провідником, але при температурі 13,2 °C воно переходить в напівпровідникову α -модифікацію (сіре олово).

Таблиця 3.1 – Ширина забороненої зони елементарних напівпровідників при температурі 300 К

Елемент	ΔE , eV	Елемент	ΔE , eV
Бор	1,1	Миш'як	1,2
Вуглець (алмаз)	5,2	Сурма	0,12
Кремній	1,11	Сірка	2,5
Германій	0,665	Селен	1,8
Олово (α -Sn)	0,08	Телур	0,36
Фосфор	1,5	Йод	1,25

В сучасній електронній техніці використовують тільки чотири елементарних напівпровідника: кремній, германій, алмаз і селен (табл. 3.2).

Селен існує в кількох кристалічних і аморфних модифікаціях. Як напівпровідник використовують сірий кристалічний селен з гексагональною решіткою, який проявляє р-тип електропровідності. Сучасне використання селену є дуже обмеженим. З нього виготовляють випрямлювачі та фотоелементи.

Таблиця 3.2 – Основні властивості вживаних елементарних напівпровідників

Властивості	Si	Ge	C _{алмаз}	Se _{гексагон}
Температура плавлення, °C	1420	936		220
Густина при 20 °C, Мг/м ³	2,33	5,3		4,8
Температурний коефіцієнт лінійного розширення (0...100 °C), К ⁻¹	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-3}$		$2,5 \cdot 10^{-5}$
Теплопровідність при 20 °C, Вт/(м·К)	80	55		3
Діелектрична проникність	12,5	16		6,3
Ширина забороненої зони, еВ: при 0 К при 300 К	1,165 1,11	0,746 0,665	5,6 5,2	2,5 2,0
Рухливість електронів, м ² /(В·с)	0,14	0,39		-
Рухливість дірок, м ² /(В·с)	0,05	0,19		$2 \cdot 10^{-5}$
Власна електропровідність, Ом·м	$2,6 \cdot 10^3$	0,47	-	-
Власна концентрація носіїв заряду, м ³	10^{16}	$2,1 \cdot 10^9$	-	-
Робота виходу електрона, еВ	4,3	4,8	-	2,85

Алмаз – широкозонний напівпровідник, що забезпечує великі значення коефіцієнту випрямлення діодів та коефіцієнту підсилення транзисторів, а також високу допустиму температуру роботи приладів з цього матеріалу (до 1600 °C). Але дуже велика вартість (штучно вирощені плівки і пластини алмазу напівпровідникової якості дорожчі за природні алмази) і вкрай важка оброблюваність обмежують його використання виготовленням тільки приладів з такими характеристиками, які не можливо досягти при використанні інших напівпровідникових матеріалів. Основна перевага алмазу – найвища з усіх твердих речовин теплопровідність. Завдяки цій властивості з алмазу виготовляють потужні діоди і транзистори надвисокочастотного діапазону і навіть тепловідводи для надвисокочастотних інтегральних мікросхем.

Кремній

За сукупністю електрофізичних властивостей, відпрацьованості технологічних процесів, кількістю й номенклатурою приладів, що випускають, провідне місце серед напівпровідникових матеріалів займає кремній.

Кремній серед усіх хімічних елементів за поширеністю у земній корі займає друге місце після кисню (29,5% по масі). У вільному стані кремній в природі не зустрічається. Численні сполуки кремнію входять до більшості гірських порід і мінералів. Пісок і глина, що утворюють мінеральну частину ґрунту, також є сполуками кремнію. Найпоширенішою сполукою цього елемента є двоокис кремнію SiO_2 . Вільний двоокис кремнію зустрічається в основному у вигляді мінералу кварцу. Як матеріал напівпровідникової електроніки кремній знайшов широке застосування лише в другій половині ХХ сторіччя після розробки ефективних методів його очищення.

Вихідною сировиною при виготовленні кремнію є природний двоокис (кремнезем), з якого кремній відновлюють вуглецем в електричних печах. Отриманий в такий спосіб технічний (металургічний) кремній має дрібнокристалічну структуру і внаслідок вмісту близько 1% домішок не проявляє напівпровідникових властивостей. Для досягнення власної електропровідності при кімнатній температурі вміст залишкових домішок у кремнії повинен не перевищувати 10^{16} м^{-3} ($\sim 10^{-4} \%$ ат.). Технологія виготовлення кремнію напівпровідникової чистоти складається з наступних операцій: перетворення технічного кремнію в легколетючу сполуку (хлориди, силани); очищення сполуки фізичними й хімічними методами; хімічне відновлення сполуки з виділенням чистого кремнію; остаточне кристалізаційне очищення й вирощування монокристалів.

Кремній кристалізується в структурі алмаза, елементарна комірка якої містить вісім атомів (див. рис.1.2). Кожний атом решітки перебуває в оточенні чотирьох найближчих сусідів, розташованих у вершинах правильного тетраедра. Кристалічний кремній при кімнатній температурі є відносно хімічно інертною речовиною. Він нерозчинний у воді, не реагує з багатьма кислотами в будь-якій концентрації. Добре розчиняється лише в суміші азотної й плавикової кислот і в киплячих лугах. Кремній стійкий на повітрі при нагріванні до $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Вище цієї температури він починає інтенсивно

окислюватися з утворенням двоокису SiO_2 . При нагріванні кремній легко взаємодіє з галогенами

Кремній має порівняно високу температуру плавлення (дивись таблицю 3.2) й у розплавленому стані має високу хімічну активність.

У нормальних умовах чистий кремній прозорий для електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі більше 1,1 мкм.

Домішки атомів елементів III і V груп Періодичної системи є відповідно акцепторами й донорами і створюють дрібні рівні в забороненій зоні. Енергія іонізації дрібних донорів і акцепторів у кремнії для більшості домішок становить близько 0,05 еВ. В цьому випадку кімнатна температура відповідає області виснаження домішок.

Домішки елементів I, II, VI і VII груп вносять глибокі рівні в заборонену зону й сильно обмежують час життя нерівноважних носіїв заряду. Більшість домішок має максимум розчинності в кремнії при температурах 1200...1300 °С (рис. 3.11).

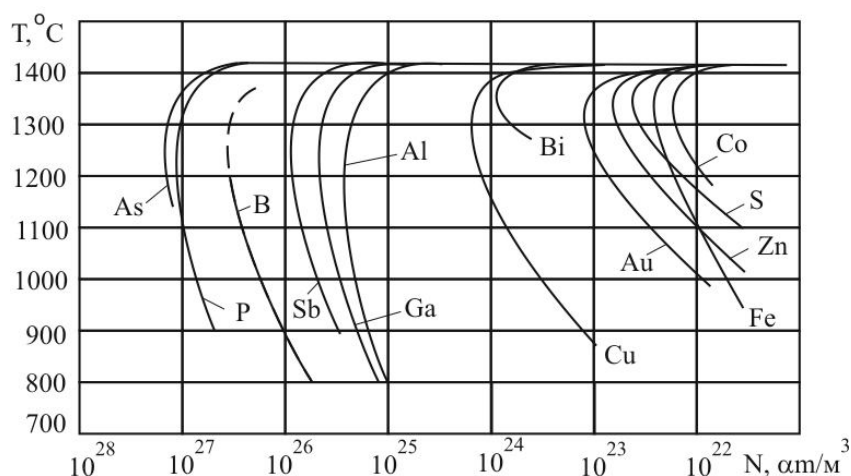


Рисунок 3.11 - Температурні залежності розчинності домішок у кремнії

У планарній технології кремнієвих приладів одним з основних методів легування напівпровідникових пластин і створення р-п-переходів є дифузія електрично активних домішок. Вакансії в кристалічній решітці кремнію є акцепторами й створюють глибокі енергетичні рівні.

Плавлення кремнію супроводжується збільшенням його густини приблизно на 10% і стрибкоподібним зменшенням питомого опору приблизно в 30 разів. У розплавленому стані кремній має питомий

опір порядку 10^{-4} Ом·м і поводитья подібно рідким металам, тобто характеризується малою рухливістю й високою концентрацією носіїв заряду.

Монокристали кремнію в промислових умовах вирощують двома методами: витягування з розплаву за методом Чохральського (для надвеликих -НВІС і ультравеликих - УВІС інтегральних схем, ≈ 90 % усього монокристалічного кремнію) та безтигельної зонної плавки (для силової електроніки й детекторів ядерного випромінювання). За першим методом вирощують, як правило, великі монокристали діаметром до 450 мм (рис. 3.12, табл. 3.3) з відносно невеликим питомим опором (~ 10 Ом·м).

За другим методом (безтигельної зонної плавки) вирощують високоомні монокристали кремнію діаметром до 300 мм з питомим опором до 200 Ом·м і з малим вмістом залишкових домішок, особливо кисню.



Рисунок 3.12 – Монокристал кремнію діаметром 400 мм і довжиною 1,1 м, вирощений за методом Чохральського

Кремній є базовим матеріалом при виготовленні планарних транзисторів і інтегральних мікросхем. Незважаючи на інтенсивний розвиток інтегральної мікроелектроніки, у загальному об'ємі випуску напівпровідникових виробів значну частку становлять кремнієві дискретні прилади. Із кремнію виготовляють випрямні, імпульсні й

НВЧ-діоди, низькочастотні й високочастотні, потужні й малопотужні біполярні транзистори, польові транзистори й прилади із зарядовим зв'язком. Робочі частоти планарних транзисторів досягають 10 ГГц.

Кремнієві випрямні діоди можуть витримувати зворотні напруги до 1500 В та пропускати струм у прямому напрямку до 1500 А. Із кремнію виготовляють більшість стабілітронів і тиристорів. Кремнієві стабілітрони залежно від ступеня легування матеріалу мають напругу стабілізації від 3 до 400 В. Широке застосування в техніці знайшли кремнієві фоточутливі прилади, особливо фотодіоди, що відрізняються високою швидкістю. Спектр фоточутливості кремнієвих фотодетекторів (0,3...1,1 мкм) добре узгоджується зі спектром випромінювання багатьох напівпровідникових джерел світла.

Таблиця 3.3 - Вимоги до монокристалічного кремнію для надвеликих і ультравеликих інтегральних схем

Рік	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Діаметр, мм	200	200	300	300	400	400
Об'ємна концентрація Fe, см ⁻³	1·10 ¹¹	5·10 ¹⁰	2·10 ¹⁰	1·10 ¹⁰	5·10 ⁹	5·10 ⁹
Об'ємна концентрація вуглецю, см ⁻³	10 ¹⁷	10 ¹⁷	8·10 ¹⁶	5·10 ¹⁶	2·10 ¹⁶	1·10 ¹⁶
Об'ємна концентрація кисню (ppma)	≥24±2	≥23±2	≥23±1,5	≥22±1,5	≥22±1,5	≥22±1,5
Мікродофекти (в поперечному перерізі), дефект/см ²	≥5000	≥1000	≥500	≥100	≥100	≥100
Дислокації, дефекти пакування, границі двійників и субструктури (в поперечному перерізі), дефект/см ²	0	0	0	0	0	0
Рекомбінаційний час життя, мкс	150	200	350	500	500	500
Генераційний час життя, мкс	600	750	1000	1250	1500	1500

Кремнієві фотоелементи, що служать для перетворення сонячної енергії в електричну, одержали назву сонячних батарей. Вони використовуються в системах енергопостачання космічних апаратів та наземних систем. Їхній коефіцієнт корисної дії в більшості випадків становить 12...14 %.

Кремній використовується для виготовлення детекторів ядерних випромінювань, датчиків Хола й тензодатчиків. В останніх

використовується сильна залежність питомого опору від механічних деформацій. Верхня температурна межа роботи кремнієвих приладів досягає 180...200 °С.

Германій

Германій часто зустрічається в природі, але є присутнім у різних мінералах у дуже невеликих кількостях. Його вміст у земній корі становить близько $7 \cdot 10^{-4}$ %. Мінерали з великою концентрацією германія зустрічаються дуже рідко й не можуть служити сировиною для виробництва напівпровідників. Основними джерелами промислового виробництва германія є побічні продукти цинкового виробництва, коксування вугілля, а також германієві концентрати, одержувані з мідно-свинцово-цинкових руд.

Чистий германій має металевий блиск, відносно високу твердість й крихкість. Германій кристалізується в структурі алмазу (див. рис.1.2).

Кристалічний германій хімічно стійкий на повітрі при кімнатній температурі. Германій має відносно невисоку температуру плавлення (936°С, табл. 3.2) і мізерно малий тиск насиченої пари при цій температурі. При кімнатній температурі рухливість електронів приблизно у два рази перевищує рухливість дірок. У нормальних умовах чистий германій прозорий для електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі більше 1,8 мкм.

Для виготовлення напівпровідникових приладів германій легують донорами і акцепторами – відповідно елементами V і III груп Періодичної системи. Ці домішки створюють дрібні рівні в забороненій зоні з енергією іонізації порядку 0,01 еВ. Домішки елементів I, II, VI, VII і VIII груп при введенні в решітку германія створюють досить глибокі рівні у забороненій зоні, що обумовлено сильними розходженнями у валентностях атомів домішки й основи. Всі перераховані елементи утворюють із германієм тверді розчини з досить обмеженою розчинністю (частки атомного відсотка, рис. 3.13).

Щоб електропровідність германія була власною при кімнатній температурі, його треба очистити до вмісту домішок не більше 10^{19} м⁻³, тобто один атом домішки на один мільярд атомів германія.

Найбільші монокристали германія вирощують за методом витягування з розплаву (метод Чохральського).

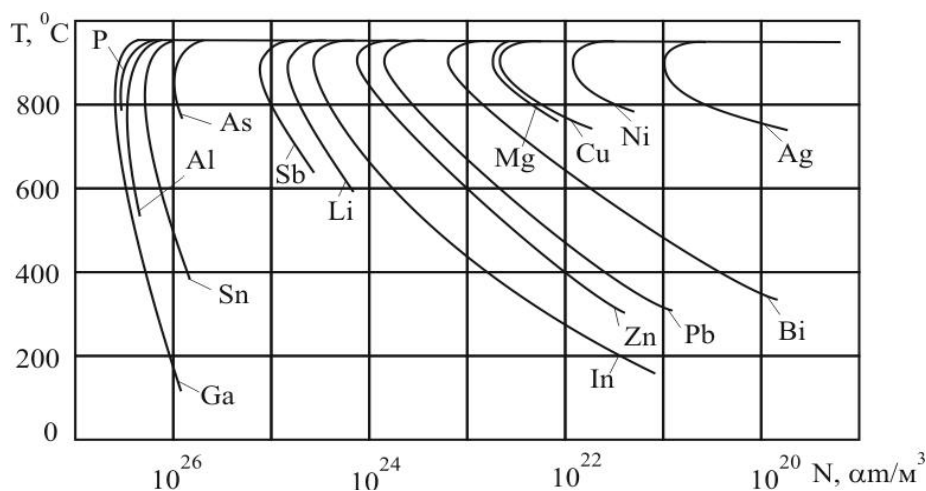


Рисунок 3.13 – Температурні залежності розчинності домішок у германії

На основі германія випускається широка номенклатура приладів всіякого призначення й, у першу чергу, діодів і транзисторів. Випрямні площинні діоди розраховані на прямі струми від 0,3 до 1000 А при спаданні напруги не більше 0,5 В. Недоліком германієвих діодів є невисокі припустимі зворотні напруги. Сплавні біполярні германієві транзистори можуть бути низькочастотними й високочастотними, потужними й малопотужними. Нанесення плівкової ізоляції з SiO_2 дозволяє виготовляти германієві транзистори за планарною технологією.

Германій використовується також для виготовлення лавино-пролітних і тунельних діодів, варикапів, точкових високочастотних, імпульсних і НВЧ-діодів. В імпульсних діодах для досягнення високої швидкості перемикавання потрібен матеріал з малим часом життя нерівноважних носіїв заряду. Цій вимозі задовольняє германій, легований золотом. Домішки золота створюють у германії ефективні центри рекомбінації.

Завдяки високій рухливості носіїв заряду германій застосовують для виготовлення датчиків Хола й інших магніточутливих приладів.

Оптичні властивості германія дозволяють використовувати його для виготовлення фототранзисторів і фотодіодів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла й коротких радіохвиль, а також лічильників ядерних частинок. Робочий діапазон температур германієвих приладів $-60 \dots +70$ °С. Невисока верхня межа робочої температури є істотним недоліком германія.

3.8 Напівпровідникові сполуки $A^{IV}B^{IV}$

Карбід кремнію SiC є єдиною бінарною сполукою, утвореною напівпровідниковими елементами IV групи Періодичної таблиці. У природі цей матеріал зустрічається вкрай рідко й в обмежених кількостях.

За типом хімічного зв'язку карбід кремнію відноситься до ковалентних кристалів. Частка іонного зв'язку не перевищує 10...12%. Наслідком сильних хімічних зв'язків між атомами кремнію й вуглецю є дуже висока хімічна й температурна стабільність SiC, а також його висока твердість.

Кристали карбіду кремнію напівпровідникової чистоти звичайно мають пластинчасту форму з розміром у поперечнику порядку 1 см і характеризуються концентрацією залишкових домішок на рівні 10^{22} м^{-3} .

Карбід кремнію може кристалізуватися в різних поліморфних модифікаціях. Гексагональна модифікація - α -SiC складається з безлічі політипів, тобто кристалічних структур, що відрізняються порядком розташування атомів. Відомо більше 100 різних політипів SiC, що досить істотно розрізняються за величиною ширини забороненої зони й рухливості електронів. На практиці при вирощуванні кристалів SiC з газової фази найбільш легко відтворюється гексагональний політип, що позначається як 6H. Фізико-механічні й хімічні властивості кристалів слабо залежать від структури політипу. Карбід кремнію є однією з найбільш твердих речовин (твердість по мінералогічній шкалі 9,5). Він стійкий проти окислювання до температур понад 1400 °C. При кімнатній температурі карбід кремнію не взаємодіє ні з якими кислотами. При нагріванні він розчиняється в розплавах лугів, а також реагує з ортофосфорною кислотою й сумішшю $\text{HNO}_3 + \text{HF}$.

Електропровідність кристалів SiC при нормальній температурі - домішкова. Тип електропровідності й колір кристалів карбіду кремнію залежать від сторонніх домішок або визначаються надлишком атомів Si або C понад стехіометричним складом. Домішки елементів V групи (N, P, As, Sb, Bi) і заліза в карбіді кремнію обумовлюють електропровідність n-типу, елементи II (Ca, Mg) і III груп (B, Al, Ga, In) – електропровідність p-типу. Надлишок атомів Si призводить до електронної електропровідності SiC, а надлишок атомів C – до діркової.

Власна електропровідність карбіду кремнію спостерігається, починаючи з температури приблизно 1400 °С.

Чудовою особливістю карбіду кремнію є його здатність до люмінесценції у видимій області спектра. Використовуючи різні політипи, а також, змінюючи домішки, у карбіді кремнію можна в принципі викликати люмінесценцію з будь-якими кольорами випромінювання - від червоного до фіолетового, що використовується для створення світлодіодів. Найбільш широко поширені світлодіоди жовтого випромінювання, що виготовляються за допомогою дифузії бора в карбід кремнію n-типу, легованого азотом.

Недолік SiC-світлодіодів - невисока ефективність перетворення електричної енергії у світлову. Перевага - стабільність характеристик, практично повна відсутність деградації (незворотного погіршення властивостей). Це дозволяє використовувати світлодіоди з карбіду кремнію як світлові еталони й опорні джерела світла у вимірювальних пристроях.

3.9 Напівпровідникові сполуки $A^{III}B^V$

Сполуки $A^{III}B^V$ за використанням посідають друге місце після кремнію в сучасній твердотілій електроніці, а в оптоелектроніці – перше місце. Ці напівпровідникові сполуки кристалізуються в структурі сфалерита, що подібна до структури алмазу, але характеризується іонно-ковалентним типом хімічного зв'язку. Різноманітність фізичних властивостей напівпровідникових сполук $A^{III}B^V$ (табл. 3.4) дають можливість вибору оптимального матеріала для створення того чи іншого приладу.

Серед всіх напівпровідників антимонід індію має рекордно високу рухливість електронів. Абсолютне значення рухливості електронів для більшості сполук істотно перевищує рухливість дірок. Виключення становить тільки антимонід алюмінію, у якого рухливість дірок майже в три рази перевищує рухливість електронів.

Внаслідок великого розходження в значеннях рухливостей електронів і дірок в InSb, InAs, GaAs їх власний питомий опір практично повністю визначається рухом електронів.

Таблиця 3.4 - Властивості напівпровідникових сполук $A^{III}B^V$

Сполука	$T_{\text{плавл.}},$ $^{\circ}C$	Густина, $Mг/M^3$	$\alpha_l \cdot 10^6,$ K^{-1}	$\Delta E,$ eВ	$\mu_n,$ $M^2/(B \cdot c)$	$\mu_p,$ $M^2/(B \cdot c)$
Фосфіди						
AlP	1596	2,4	-	2,45	0,008	0,003
GaP	1487	4,1	4,8	2,25	0,019	0,012
InP	1083	4,8	4,5	1,32	0,5	0,015
Арсеніди						
AlAs	1510	3,6	3,5	2,2	0,03	-
GaAs	1273	5,4	5,4	1,38	0,95	0,045
InAs	895	5,7	4,8	0,37	3,3	0,05
Антимоніди						
AlSb	1070	4,3	4,2	1,7	0,02	0,055
GaSb	723	5,7	6,2	0,72	0,4	0,14
InSb	505	5,8	5,0	0,2	10	0,1

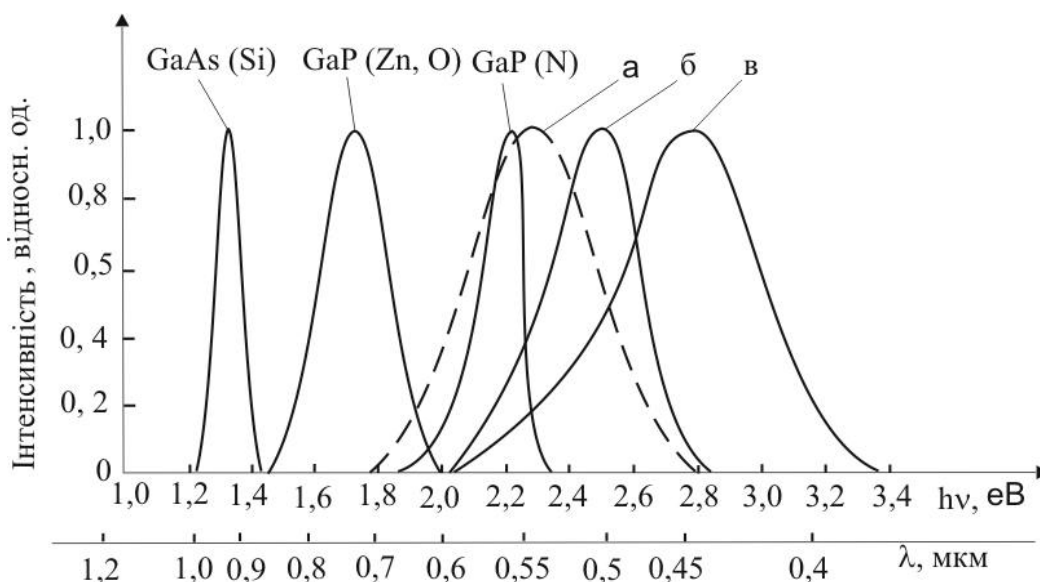
Більшість сполук $A^{III}B^V$ характеризується незначними відхиленнями від стехіометричного складу, тому вони відносно прості за механізмом легування, в них легко формуються електронно-діркові переходи.

Домішки заміщення в кристалічній решітці сполук $A^{III}B^V$ розподіляються таким чином, щоб не виникало центрів з великим надлишковим зарядом. Тому домішки елементів II групи – Be, Mg, Zn і Cd, що утворюють **тверді розчини заміщення**, завжди займають у решітці $A^{III}B^V$ вузли металевого компонента й при цьому є акцепторами, завдяки меншій валентності в порівнянні з валентністю атомів, що заміщаються. У той же час домішки елементів VI групи – S, Se, Te – завжди розташовуються у вузлах B^V і відіграють роль донорів. Атоми домішок IV групи можуть займати як вузли A^{III} , так і B^V , проявляючи при цьому донорні або акцепторні властивості, відповідно. В арсеніди й фосфіди галію спостерігається парне входження атомів кремнію й германія в кристалічну решітку сполуки з одночасним заміщенням вузлів A^{III} і B^V . Залежно від ступеня легування, температури росту й складу кристалізаційного середовища має місце переважне входження цих домішок у ту або іншу підрешітку.

Домішки елементів перехідної групи (Fe, Co, Ni і т.п.) створюють у напівпровідниках $A^{III}B^V$ глибокі енергетичні рівні

акцепторного типу і є ефективними рекомбінаційними пастками. Легування арсеніду галію залізом або хромом використовується для одержання кристалів з високим питомим опором (до 10^7 Ом·м). Такий матеріал називають напівізолюючим.

Перевагою багатьох напівпровідників типу $A^{III}B^V$ є висока ефективність випромінювальної рекомбінації нерівноважних носіїв заряду. Зі сполук $A^{III}B^V$, освоєних у технологічному відношенні, фосфід галію GaP і нітрид галію GaN мають ширину забороненої зони вище 1,7 еВ, тобто вони здатні генерувати випромінювання у видимій області спектра (рис. 3.14). Матеріали з більш вузькою забороненою зоною здатні ефективно випромінювати в інфрачервоній області, наприклад, арсенід галію, що має $\Delta E = 1,38$ еВ.



а – функція спектральної чутливості ока для денного зору; б – спектр електролюмінесценції GaN ($N_{Zn}=10^{26} \text{ м}^{-3}$); в – спектр електролюмінесценції GaN ($N_{Zn}=10^{25} \text{ м}^{-3}$)

Рисунок 3.14 - Спектри рекомбінаційного випромінювання напівпровідників типу $A^{III}B^V$, легованих різними домішками (300 K)

Різноманіття властивостей напівпровідників типу $A^{III}B^V$ обумовлює їхнє широке застосування в приладах і пристроях різного технічного призначення. Інжекційні лазери й світлодіоди на основі напівпровідників типу $A^{III}B^V$ характеризуються високою ефективністю перетворення електричної енергії в електромагнітне випромінювання. Істотними перевагами таких приладів є малі

габаритні розміри, простота конструкції, можливість внутрішньої модуляції випромінювання шляхом зміни керуючої напруги, сумісність із елементами інтегральних мікросхем за робочими параметрами і технологічними операціями.

Напівпровідникові лазери й світлодіоди з успіхом використовуються в обчислювальній, інформаційно-вимірвальній і оборонній техніці, у космонавтиці й техніці зв'язку, а також у побутових апаратах.

Великий набір значень ширини забороненої зони в напівпровідників типу $A^{III}B^V$ дозволяє створювати на їхній основі різні види фотоприймачів, що перекривають широкий діапазон спектра, зокрема фотодіоди й фотоелементи. Арсенід галію потенційно є одним із кращих фоточутливих матеріалів для застосування в сонячних батареях. Антимонід індію має важливе технічне значення для виготовлення приймачів інфрачервоного випромінювання, що мають фоточутливість аж до $\lambda = 7$ мкм. Напівпровідники $A^{III}B^V$ дозволяють створювати ефективні фотокатооди й емітери вторинних електронів.

Струмова нестійкість у сильних електричних полях, обумовлена міждолинними переходами електронів, використовується для створення генераторів НВЧ-коливань (генераторів Ганна), що працюють у діапазоні частот $10^9 \dots 10^{10}$ Гц. Крім арсеніду галію перспективними матеріалами для цих цілей є InP, InAs і тверді розчини на їхній основі.

Арсенід галію й антимонід індію застосовуються для виготовлення тунельних діодів. У порівнянні з германієвими діодами прилади з арсеніду галію характеризуються більш високою робочою температурою, а діоди з InSb мають кращі частотні властивості при низьких температурах.

На основі вузькозонних напівпровідників типу $A^{III}B^V$ (InSb, InAs), що мають високу рухливість електронів, виготовляють магніторезистори й перетворювачі Хола.

Прогрес у технології арсеніду галію, досягнутий за останнє десятиліття, обумовлює його застосування для створення польових транзисторів і швидкодіючих інтегральних мікросхем.

Тверді розчини на основі сполук $A^{III}B^V$ дозволяють істотно розширити набір електрофізичних параметрів, що визначають можливості застосування матеріалів у конкретних напівпровідникових приладах. Їх склад прийнято характеризувати

символами $A_xB_{1-x}C$ і AC_yD_{1-y} , де А и В позначають елементи III групи, а С и D – елементи V групи; індекс х визначає мольну частку елемента А у твердому розчині. Зі зміною складу твердого розчину спостерігається лінійна зміна періоду кристалічної решітки.

Створення твердих розчинів дає можливість плавного керування шириною забороненої зони напівпровідників та рухливістю носіїв заряду шляхом зміни їхнього складу, значенням теплопровідності, діелектричної проникності й показника переломлення світла. Наприклад, у твердих розчинів $GaAs_{0,5}P_{0,5}$ і $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ значення питомої теплопровідності приблизно на порядок менше, ніж у чистих кристалів GaAs. Тверді розчини дають широкі можливості створення гетеропереходів і приладів на їхній основі. Під гетеропереходом розуміють контакт двох напівпровідників з різною шириною забороненої зони (рис. 3.15). Інжекційні лазери на основі гетеропари $Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$ перспективні для застосування у волоконно-оптичних лініях зв'язку, оскільки спектральний діапазон їхнього випромінювання відповідає мінімальним оптичним втратам кварцового волокна.

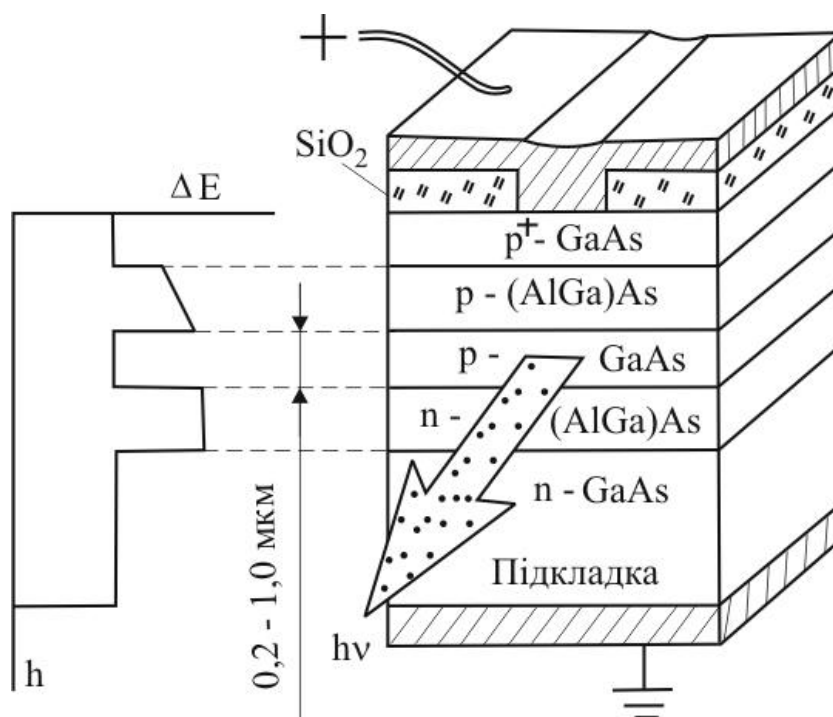


Рисунок 3.15 - Схема лазера з подвійною гетероструктурою

3.10 Напівпровідникові сполуки $A^{II}B^{VI}$

До сполук типу $A^{II}B^{VI}$ відносять халькогеніди цинку, кадмію й ртуті. Серед них можна виділити сульфід, селенід й телурид. До цієї групи не входять окисли зазначених металів. Сполуки типу $A^{II}B^{VI}$ є алмазоподібними напівпровідниками і кристалізуються в структурі цинкової обманки кубічного (сфалерит) або гексагонального (вюрцит) типу. Хімічний зв'язок - змішаний ковалентно-іонний. Більша частка іонного зв'язку в сполуках $A^{II}B^{VI}$ призводить до більших значень ширини забороненої зони й заниженим рухливостям носіїв заряду (табл. 3.5, С - сфалерит, В – вюрцит).

Таблиця 3.5 – Властивості напівпровідникових сполук $A^{II}B^{VI}$, $T=300\text{ K}$

Сполука	Структура	$T_{\text{плавл.}},$ $^{\circ}\text{C}$	Густина, $\text{Мг}/\text{м}^3$	$\Delta E,$ eV	Тип провідно- сті	$\mu_n,$ $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\mu_p,$ $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
ZnS	С	1020	4,09	3,67	п	-	-
ZnS	В	1780	4,10	3,74	п	0,014	0,0005
CdS	В	1750	4,82	2,53	п	$\perp\text{с } 0,034$ $\parallel\text{с } 0,035$	0,011 0,0015
HgS	С	1480	7,73	1,78	п	0,07	-
ZnSe	С	1520	5,42	2,73	п	0,026	0,0015
CdSe	В	1264	5,81	1,85	п	$\parallel\text{с } 0,072$	0,0075
HgSe	С	790	8,25	0,12	п	2,0	-
ZnTe	С	1239	6,34	2,23	р	0,053	0,003
CdTe	С	1041	5,86	1,44	п, р	0,12	0,006
HgTe	С	670	8,09	0,08	п, р	2,5	0,02

Атоми елементів I групи (Cu, Ag, Au), заміщаючи Zn або Cd у кристалічній решітці напівпровідника, проявляють акцепторні властивості, як правило, утворюючи глибокі енергетичні рівні. Атоми елементів III групи (Al, Ga, In), що також заміщають катіони, поведуться як донори з малими енергіями іонізації. Відповідно акцепторні й донорні властивості проявляють елементи V і VII груп Періодичної таблиці, що заміщають у решітках $A^{II}B^{VI}$ атоми халькогенів.

Особливість напівпровідників типу $A^{II}B^{VI}$ полягає в тому, що багато хто з них проявляють електропровідність лише одного типу незалежно від умов виготовлення й характеру легування кристалів.

Так, сульфід і селенід цинку, кадмію й ртуті завжди є напівпровідниками n-типу, а телурид цинку – р-типу (дивись табл. 3.5). Лише CdTe і HgTe можуть мати електропровідність як n-, так і р-типу, залежно від умов виготовлення й типу легуючих домішок. Відсутність інверсії типу електропровідності істотно обмежує можливості практичного використання напівпровідників типу $A^{II}B^{VI}$.

Із всіх сполук типу $A^{II}B^{VI}$ за масштабами використання виділяються **сульфід цинку ZnS** і **сульфід кадмію CdS**. Перший є основою для багатьох промислових люмінофорів, а другий широко використовується для виготовлення фоторезисторів, що мають високу чутливість у видимій області спектра. Дотепер люмінофори з ZnS перевершують інші матеріали по внутрішньому квантовому виходу. Недоліком електролюмінесцентних пристроїв на основі сульфиду цинку є відносно висока швидкість деградації приладів (погіршення їхніх властивостей), обумовлена процесами електролізу.

Високу фоточутливість мають також зразки CdS, легованого міддю. Крім сульфиду кадмію для виготовлення фоторезисторів, чутливих до видимого випромінювання, використовують плівки й зпечені порошкоподібні солі CdSe.

Вузькозонні напівпровідники типу $A^{II}B^{VI}$ становлять інтерес для створення приймачів далекого інфрачервоного випромінювання. Особливу увагу привертають тверді розчини $Cd_xHg_{1-x}Te$, спектр фоточутливості яких перекриває атмосферне «вікно прозорості» в області $\lambda = 8 \dots 14$ мкм.

Плівки із селеніду й телуриду ртуті, завдяки високій рухливості електронів, застосовують для виготовлення високочутливих датчиків Хола. Висока ефективність випромінювальної рекомбінації в напівпровідниках типу $A^{II}B^{VI}$ дозволяє використовувати монокристали цих сполук як робоче тіло напівпровідникових лазерів.

3.11 Напівпровідникові сполуки $A^{IV}B^{VI}$

Серед напівпровідникових сполук типу $A^{IV}B^{VI}$ (табл. 3.6) найбільш вивченими є халькогеніди свинцю. Ці вузькозонні напівпровідники давно застосовуються як детектори інфрачервоного випромінювання.

Таблиця 3.6 – Властивості халькогенідів свинцю

Сполука	$T_{\text{плавл.}}$, °C	Густина, Мг/м ³	ΔE , eV	μ_n , м ² /(В·с)	μ_p , м ² /(В·с)
PbS	1114	7,61	0,39	0,06	0,07
PbSe	1076	8,15	0,27	0,12	0,10
PbTe	917	8,16	0,32	0,18	0,09

Всі три сполуки кристалізуються в кубічній структурі типу NaCl. Хімічні зв'язки в цих кристалах мають яскраво виражену іонну складову. Електричні властивості халькогенідів свинцю багато в чому визначаються відхиленнями від стехіометрії. Надлишок атомів свинцю викликає електронну електропровідність, а надлишок халькогена – діркову. У випадку дуже великої кількості надлишкових атомів свинцю в PbS виникають металеві містки. Такі зразки в електричному відношенні поведуться як металевий свинець. Для них спостерігається надпровідність при температурі нижче 7,2 К.

Заміщення атомів свинцю елементами I групи (Na, Cu, Ag) утворює акцептори, а метали III групи (наприклад, Bi) або галогенами (VII група) - донори. При температурах вище 300 К настає власна електропровідність. Зі зниженням температури різко зростає рухливість носіїв заряду.

Тонкі плівки й полікристалічні шари халькогенідів свинцю мають високу фоточутливість у далекій інфрачервоній області спектра, причому «червона» границя внутрішнього фотоефекта зі зниженням температури зміщується в довгохвильову область.

Завдяки гарним фотоелектричним властивостям халькогеніди свинцю широко використовуються для виготовлення фоторезисторів.

При низьких температурах у цих матеріалах можлива ефективна випромінювальна рекомбінація, що дозволяє створювати на їхній основі лазери інжекційного типу. Крім того, з халькогенідів свинцю виготовляють термоелементи напівпровідникових термоелектричних генераторів. Перспективним є використання твердих розчинів $Pb_{1-x}Sn_xTe$ для інжекційних лазерів з випромінюванням у діапазоні до $\lambda = 30$ мкм. Це - максимальна довжина хвилі випромінювання для напівпровідникових лазерів.

3.12 Напівпровідникові матеріали для сонячних батарей

Сонячна батарея (сонячний модуль) – це устрій, що складається з декількох фотоелектричних перетворювачів (сонячних елементів), електрично і механічно з'єднаних для досягнення потрібної потужності та вихідної напруги. Фотоелектричним перетворювачем (ФЕП) називають напівпровідникову структуру з енергетичним бар'єром, що здатна перетворювати світлове випромінювання, яке падає на неї, в електричну енергію завдяки **фотовольтаїчному ефекту**. У більшості типів ФЕП енергетичний бар'єр створюється електронно-дірковим переходом (рис. 3.16).

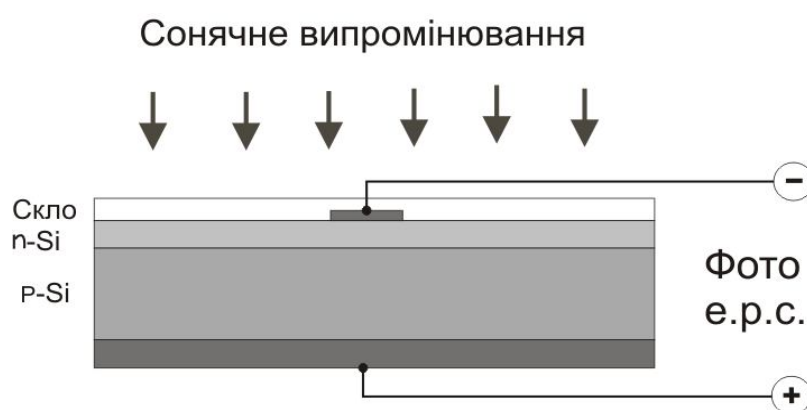


Рисунок 3.16 - Схема конструкції найпростішого сонячного елемента на монокристалічному кремнії

Ефективність перетворення випромінювання сонячним елементом залежить від електрофізичних характеристик неоднорідної напівпровідникової структури, а також оптичних властивостей ФЕП.

Для підвищення частки перетвореного в електрику світлового потоку необхідно використовувати напівпровідники з оптимальною для сонячного випромінювання шириною забороненої зони (табл. 3.6). Максимальний потік фотонів сонячного випромінювання має енергію близько 1 еВ, відповідно й максимальна ефективність фотоелектричного перетворення спостерігається у напівпровідниках із шириною забороненої зони 1,1...1,8 еВ.

Для зниження вартості сонячних елементів розробляються технології зменшення товщини монокристалічної кремнієвої пластини для сонячного елемента з 300...350 мкм до 200 мкм. Більш радикальні способи зниження вартості кремнію в складі сонячного елемента полягають в розробці різноманітних технологій

виробництва сонячних елементів на тонких плівках кремнію: виготовлення сонячної батареї на поновлюваній монокристалічній кремнієвій підкладці; вирощування епітаксійних плівок кремнію на дешевих підкладках з металургійного кремнію, ціна якого в десятки разів менше, ніж монокристалічного; осадження полікристалічних плівок кремнію на непровідних (скляних) підкладках, використання аморфного кремнію.

Таблиця 3.6 - Характеристики напівпровідників, використовуваних у сучасних фотоелектричних перетворювачах

Матеріал	Ширина забороненої зони, еВ	Червона границя поглинання $\lambda_{\text{чр}}$, мкм
Si	1,1	1,11
CdTe	1,44	0,86
GaAs	1,38	0,89
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2,2...1,38	0,56...0,89
$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	2,45...1,32	0,51...0,95
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	2,25...1,32	0,55...0,95
$\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{P}$	2,45...1,32	0,51...0,95

Найбільш перспективним матеріалом для виготовлення дешевих сонячних елементів вважається полікристалічний кремній зі стовпчастою структурою блоків (іноді називаний мультикремнієм). Ефективність сонячних елементів, виготовлених із мультикремнія, вже наближається до ефективності елементів на основі монокристалічного кремнію, а їхня собівартість значно нижче. В 2010 році вже $\approx 50\%$ ФЕП було виготовлено на основі мультикремнію.

Поряд з технологіями сонячних елементів на основі тонких плівок кремнію сьогодні розвиваються технології на основі плівок різних напівпровідникових сполук - структур Cd/CdTe і CuInSe₂. У телурида кадмію підходяща для фотоелектричного перетворювача ширина забороненої зони (1,44 еВ) і дуже висока здатність до поглинання випромінювання. Плівки CdTe досить дешеві у виготовленні. Вже реалізована модель фотоелемента на основі оксида алюмінію й CdS/CdTe переходу. Хоча ефективність його усього 6%, проте суттєвими перевагами є дешевина й еластичність.

Високу радіаційну стійкість та досить високу ефективність (к.к.д. близько 14...16 %) мають сонячні елементи на основі полікристалічних плівок напівпровідникової сполуки CuInSe_2 (диселенід міді) товщиною порядку декількох мікрометрів. Оптимальна для фотоелектричного перетворювача ширина забороненої зони диселеніда міді й індію (1,0 eВ) обумовлює надзвичайно високу здатність до поглинання сонячного випромінювання - 99 % світла поглинається в першому мікроні цього матеріала.

Великі можливості підвищення ефективності ФЕП пов'язані з переходом від гомогенних до гетерогенних й варизонних напівпровідникових структур. Це дозволить на 47% знизити втрати в сонячному елементі.

Технологічні можливості методу газофазної епітаксії з парів металорганічних сполук дозволили виготовляти широкозонне вікно AlGaAs нанорозмірної товщини. (рис. 3.17). Рекомбінаційні втрати носіїв до їхнього збирання р-n-переходом в такій гетероструктурі значно знижені. В умовах освітлення концентрованим сонячним світлом фотоелементи на основі гетероструктур $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ мають рекордне значення к.к.д. = 27,6 %, що є абсолютним рекордом для фотоелементів з одним р-n-переходом.

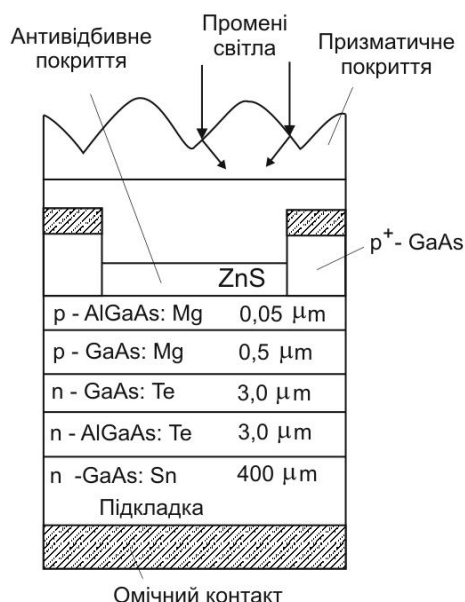


Рисунок 3.17 - Схема наногетероструктурного сонячного елемента

Ще більші значення к.к.д. досягнуті на каскадних фотоелектричних перетворювачах з декількома р-n-переходами, виготовленими на основі багат шарових гетероструктур в матеріалах,

що відрізняються шириною забороненої зони. Теоретичні оцінки показують, що в таких складних фотоперетворювачах можливе досягнення к.к.д. більше 40 %.

Застосування напівпровідникових органічних матеріалів створює перспективу виробництва гнучких сонячних елементів великої площі й малої вартості. Коефіцієнт корисної дії сонячних елементів на основі широкозонного напівпровідника (діоксида титану), вкритого органічним барвником (наприклад, рутенієм), досить високий – близько 11 %. Виготовлення подібних сонячних батарей ще пов'язане з певними технологічними труднощами, проте, вважається достатньо перспективним.

Питання для самоперевірки

1. Що таке власний напівпровідник? Які властивості він має?
2. Чи може домішковий напівпровідник мати власну електропровідність?
3. Які домішки в ковалентних напівпровідниках є донорами, а які - акцепторами?
4. Яким співвідношенням пов'язані між собою концентрації електронів і дірок у невиродженому напівпровіднику при термодинамічній рівновазі?
5. Поясніть температурну залежність концентрації носіїв заряду в напівпровіднику.
6. Які основні механізми розсіювання обмежують рухливість носіїв заряду в ковалентних напівпровідниках?
7. Яким чином у напівпровіднику можна створювати нерівноважні носії заряду?
8. Від яких факторів залежать час життя й дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду?
9. Назвіть основні механізми поглинання світла в напівпровідниках. Які з них є фотоактивними?
10. Що розуміють під фоторезистивним ефектом?
11. Назвіть основні види електролюмінесценції напівпровідника.
12. Як за допомогою ефекту Хола визначити тип електропровідності напівпровідника?
13. Які фізичні фактори обумовлюють порушення закону Ома в напівпровідниках при дії на них сильного електричного поля?
14. У яких напівпровідниках можна спостерігати ефект Гана?

15. Назвіть хімічні елементи, кристали яких є напівпровідниками. Які з них мають найбільше значення для електронної техніки?
16. Що служить сировиною при виготовленні напівпровідникових кремнію й германію?
17. Який метод має найбільше поширення для вирощування великих монокристалів кремнію?
18. Які домішкові елементи створюють у кремнії й германії дрібні акцепторні й донорні рівні?
19. У якому спектральному діапазоні чистий кремній оптично прозорий у нормальних умовах?
20. Як і чому змінюється рухливість носіїв заряду в кремнії й германії при збільшенні концентрації легуючих домішок?
21. Які переваги кремнію обумовлюють його широке застосування при виготовленні планарних транзисторів і інтегральних мікросхем?
22. Як використовуються особливі властивості карбїду кремнію?
23. Який тип хімічного зв'язку характерний для напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^{V}$?
24. Які матеріали використовуються для виготовлення інжекційних лазерів і світлодіодів?
25. Чому більшість напівпровідникових сполук $A^{II}B^{VI}$ проявляє лише один тип електропровідності, незалежно від характеру легування?
26. Для яких цілей перспективне використання напівпровідників $A^{IV}B^{VI}$ і твердих розчинів на їхній основі?
27. Які напівпровідникові матеріали використовуються для виготовлення сонячних батарей?
28. Чому кремній є базовим матеріалом для виготовлення сонячних батарей?

Задачі

1. Визначити власну питому провідність германію при кімнатній температурі. Прийняти власну концентрацію носіїв заряду при кімнатній температурі $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.
3. Оцінити дрейфову швидкість електронів при 300 К у германії n-типу з концентрацією донорів $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, якщо густина струму $j = 10^4 \text{ А/м}^2$.
4. Визначити, у скільки разів дрейфова швидкість електронів у германії n-типу з $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ відрізняється від дрейфової швидкості електронів у міді при проходженні через них електричного струму

однакової густини $j=10^4 \text{ А/м}^2$. Прийняти, що концентрація вільних електронів у міді $n = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

5. Визначити питомий опір напівпровідника n-типу, якщо концентрація електронів провідності в ньому дорівнює 10^{22} м^{-3} , а їхня рухливість $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

6. При напруженості електричного поля 100 В/м густина струму через напівпровідник $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Визначити концентрацію електронів провідності в напівпровіднику, якщо їхня рухливість $\mu_n = 0,375 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Дірковою складовою струму знехтувати.

7. До стрижня з арсеніду галію довжиною 50 мм прикладена напруга 50 В . За який час електрон пройде через весь зразок, якщо рухливість електронів $\mu_n = 0,9 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$?

8. При $T = 300 \text{ К}$ концентрація дірок у германії p-типу дорівнює $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а концентрація електронів в 100 разів менше. Рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, рухливість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Знайти власний питомий опір.

9. Обчислити відношення власної питомої провідності до мінімальної при $T = 300 \text{ К}$ для антимоніду індію, що має наступні параметри: $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 0,075 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

10. У германії при 300 К концентрація атомів $4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а концентрація власних носіїв заряду $2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Чому дорівнює концентрація дірок при цій температурі в домішковому германії, що містить один атом донорних домішок на 10^6 атомів основної речовини?

11. Найбільш чисті кристали кремнію мають концентрацію електронів 10^{19} м^{-3} , а їхня рухливість $0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Визначити, у скільки разів питомий опір цих кристалів менше власного питомого опору кремнію при 300 К .

12. Зразок кремнію містить $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ атомів домішки фосфору. Яку потрібно створити концентрацію атомів галію в цьому напівпровіднику, щоб тип електропровідності змінився на протилежний, а питомий опір дорівнював $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$? Прийняти рухливість дірок $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Глава 4 Діелектричні матеріали

До діелектриків відносять матеріали, в яких в нормальному стані присутня незначна кількість вільних носіїв заряду, що обумовлює їхні високі ізоляційні властивості. Для діелектриків характерна наявність дуже широкої забороненої зони на енергетичній діаграмі, тому переважаючим механізмом провідності в них є іонна провідність. Внаслідок дуже низької концентрації вільних носіїв заряду головним процесом, що відбувається в діелектрику під дією електричного поля є не електропровідність, а поляризація.

4.1 Поляризація діелектриків

Поляризацією називають стан діелектрика, що характеризується наявністю електричного моменту будь-якого елемента його об'єму.

Досвід показує, що незаряджений спочатку діелектрик в електричному полі здобуває полярність: на стороні діелектрика, у яку входять силові лінії електричного поля, виникають негативні заряди, а на протилежній - позитивні. Поляризаційні заряди – зв'язані, виникають при зсуві центрів позитивних і негативних зарядів у межах однієї молекули або комірки кристалічної решітки діелектрика, а індукційні заряди (електрони) – вільні і здатні переміщатися по провіднику.

Розрізняють поляризацію, що виникає під дією зовнішнього електричного поля, і спонтанну, що існує при відсутності поля. У деяких випадках поляризація діелектриків з'являється під дією механічних напруг.

Здатність різних матеріалів поляризуватися в електричному полі характеризується **відносною діелектричною проникністю** $\epsilon = C_d/C_0$, де C_d – ємність конденсатора з даним діелектриком, Ф; C_0 – ємність того ж конденсатора у вакуумі (тобто геометрична ємність між електродами), Ф.

Абсолютна діелектрична проникність ϵ_a , значення якої залежить від вибору системи одиниць, пов'язана з відносною діелектричною проникністю ϵ :

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \text{ де } \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} - \text{ електрична постійна.}$$

Кількісною характеристикою поляризації служить **поляризованість** діелектрика P - векторна фізична величина, що дорівнює відношенню електричного моменту dP елемента діелектрика до об'єму d цього елемента і виражається в Кл/м²: $P = dP/d$.

Поляризованість однорідного плоского діелектрика в рівномірному електричному полі дорівнює поверхневій густині зв'язаних зарядів. Для більшості діелектриків у слабких електричних полях поляризованість пропорційна напруженості поля:

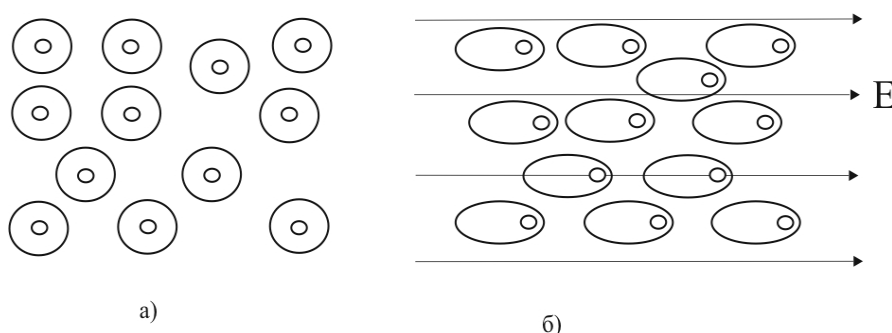
$$\bar{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1) \bar{E} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \bar{E}, \quad (4.1)$$

де \bar{E} – вектор напруженості електричного поля, В/м; χ - діелектрична сприйнятливість.

В ізотропних діелектриках напрямки векторів \bar{P} і \bar{E} збігаються. Для анізотропних середовищ (кристали, текстури) діелектрична сприйнятливість є тензорною характеристикою, тому напрямки \bar{P} і \bar{E} в загальному випадку виявляються різними. У сильних електричних полях порушується лінійна залежність між поляризованістю й напруженістю поля (нелінійні ефекти).

Значення ємності конденсатора з діелектриком і накопичений у ньому електричний заряд обумовлені декількома механізмами поляризації, які різні в різних діелектриків і можуть мати місце одночасно в одному матеріалі.

Електронна поляризація являє собою пружний зсув і деформацію електронних оболонок атомів і іонів під дією електричного поля (рис.4.1).



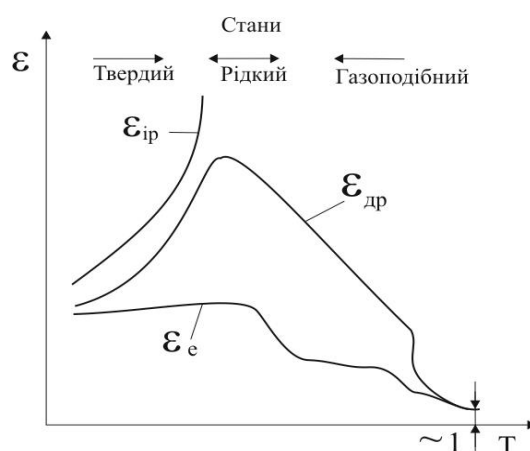
а - за відсутності зовнішнього електричного поля; б - при впливі поля

Рисунок 4.1 - Спрощена схема моделей атомів водню

Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (близько 10^{-15} с). Тому електронну поляризацію умовно називають миттєвою. Вона проявляється при всіх частотах, аж до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц.

Електронна поляризація спостерігається у всіх видів діелектриків і не пов'язана із втратами енергії аж до резонансних частот. Значення діелектричної проникності речовини із чисто електронною поляризацією мала і чисельно дорівнює квадрату показника переломлення світла.

Діелектрична проникність ϵ зменшується з підвищенням температури у зв'язку з тепловим розширенням діелектрика й зменшенням числа частинок в одиниці об'єму (рис. 4.2).



ϵ_e - електронна поляризація; $\epsilon_{др}$ - дипольно-релаксаційна;
 $\epsilon_{ір}$ - іонно-релаксаційна

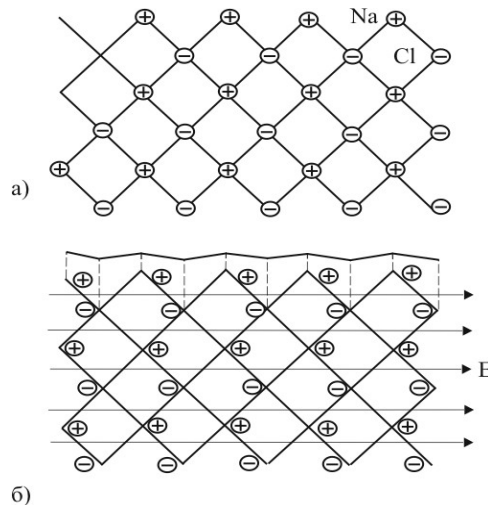
Рисунок 4.2 - Температурні залежності діелектричної проникності при різних механізмах поляризації

Зміна ϵ при зміні температури характеризується температурним коефіцієнтом діелектричної проникності, що виражають у K^{-1} :

$$\alpha_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}$$

Іонна поляризація характерна для твердих тіл з іонною будовою й обумовлена зсувом пружно зв'язаних іонів на відстані, менші за період кристалічної решітки.

На рис. 4.3 на моделі кристалічної решітки кам'яної солі показаний зсув іонів натрію з вузлів решітки в напрямку електричного поля й іонів хлору – проти напрямку поля.

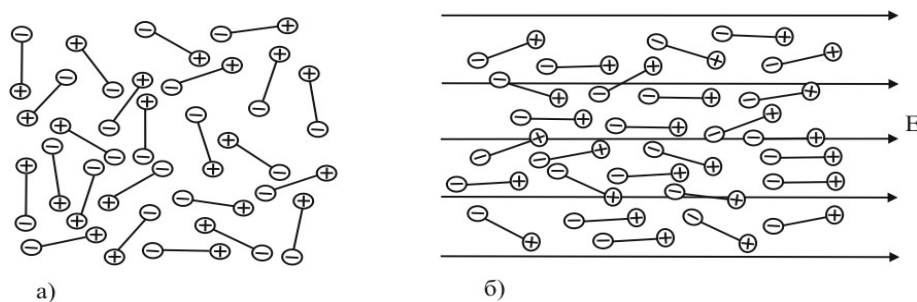


а - в вузлах решітки за відсутності електричного поля;
 б - зміщені з вузлів на невеликі відстані при впливі поля

Рисунок 4.3 - Ідеалізована схема розташування іонів кам'яної солі

З підвищенням температури відстані між іонами внаслідок теплового розширення матеріалу збільшуються, що супроводжується ослабленням сил пружного зв'язку між іонами й зростанням поляризованості діелектрика. Час встановлення іонної поляризації $\sim 10^{-13}$ с, тобто це – миттєва поляризація.

Дипольно-релаксаційна поляризація відрізняється від електронної й іонної тим, що дипольні молекули, що перебувають у хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля (рис. 4.4), що і є причиною поляризації.



а - за відсутності зовнішнього електричного поля; б - при впливі поля

Рисунок 4.4 - Схема розташування дипольних молекул

Зі збільшенням температури міжмолекулярні сили послабляються, що повинно підсилювати дипольно-релаксаційну поляризацію. Однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, що зменшує вплив поля. Тому температурна зміна

діелектричної проникності при дипольно-релаксаційній поляризації характеризується наявністю максимуму (дивись рис.4.2).

Поворот диполів у напрямку поля в середовищі вимагає подолання деякого опору, тому дипольно-релаксаційна поляризація пов'язана із втратами енергії й нагріванням діелектрика. Опір поворотам молекул може бути настільки великим, що при швидкозмінних полях диполі не встигають орієнтуватися в напрямку поля, і дипольно-релаксаційна поляризація зменшується зі збільшенням частоти прикладеної напруги.

Після зняття електричного поля орієнтація частинок поступово слабшає. Залежність дипольної складової поляризованості діелектрика від часу:

$$P_{op}(t) = P_{op}(0)\exp(-t/\tau_0), \quad (4.2)$$

де t – час, що пройшов після зняття поля, с; τ_0 – постійна часу (час релаксації), с.

Таким чином, час релаксації - це проміжок часу, протягом якого впорядкованість орієнтованих полем диполів після зняття поля зменшується внаслідок наявності теплового руху в 2,7 рази від первісного значення, тобто система з нерівноважного стану наближається до рівноважного. Час релаксації сильно залежить від температури. Чим вище температура, тим менше сили молекулярного опору повороту диполів і тим менше час релаксації.

Дипольно-релаксаційна поляризація властива полярним рідинам; цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах. Але в цьому випадку поляризація звичайно обумовлена вже поворотом не самої молекули, а наявних у неї полярних радикалів стосовно молекули.

Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в іонних діелектриках з нещільним упакуванням іонів, наприклад у неорганічних стеклах і в деяких кристалічних речовинах. При цьому слабо зв'язані іони речовини під впливом зовнішнього електричного поля серед хаотичних теплових перекидань одержують надлишкові перекидання в напрямку поля й зміщуються на відстані, що перевищують постійну решітки. Після зняття електричного поля іони поступово повертаються до центрів рівноваги. Цей механізм можна

віднести до релаксаційної поляризації, при якій має місце незворотне розсіювання енергії. Температурна залежність ϵ_{ip} показана на рис. 4.2.

Електронно-релаксаційна поляризація виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових електронів або дірок і аналогічна за механізмом іонно-релаксаційній.

Резонансна поляризація спостерігається в діелектриках при світлових частотах електричного поля. Вона обумовлена власними коливаннями електронів або іонів і залежить від фізико-хімічних особливостей речовини. При резонансі сильно збільшується поглинання електромагнітної енергії.

Міграційна поляризація є додатковим механізмом поляризації, що проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок. При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони й іони провідних і напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, яке стає подібним величезній поляризованій молекулі. У граничних шарах багат шарових матеріалів і в приелектродних шарах може відбуватися нагромадження зарядів повільно рухаючихся іонів, що створює ефект міграційної поляризації.

Спонтанна поляризація існує тільки у групи твердих діелектриків, що називаються сегнетоелектриками.

Класифікація діелектриків за механізмами поляризації

Залежно від виду залежності значення відносної діелектричної проникності матеріалу від напруженості електричного поля всі діелектрики підрозділяють на **лінійні** й **нелінійні**. Нелінійними є сегнетоелектрики.

Ємність конденсатора з лінійним діелектриком не змінюється при прикладенні різниці потенціалів. При нелінійному діелектрику вона стає керованою електричним полем. Тому нелінійні діелектрики називають **активними** (керованими) діелектриками.

Лінійні діелектрики можна підрозділити на кілька груп, поклавши в основу класифікації механізми поляризації.

Неполярними діелектриками є гази, рідини й тверді речовини в кристалічному й аморфному станах, які мають переважно електронну поляризацію. Такими є водень, бензол, парафін, сірка, поліетилен і ін. Саме вони мають найменше значення діелектричної проникності

Полярні (дипольні) діелектрики – це органічні рідкі, напіврідкі й тверді речовини, що мають одночасно дипольно-релаксаційну й електронну поляризацію. Такими є нітробензол, кремнійорганічні сполуки, феноло-формальдегідні смоли, епоксидні компаунди, капрон і ін. Діелектрична проникність полярних органічних діелектриків, що мають у твердому стані дипольно-релаксаційну поляризацію, залежить від температури й частоти прикладеної напруги.

Іонними діелектриками є тверді неорганічні сполуки з іонною, електронною, іонно- і електронно-релаксаційними поляризаціями, наприклад, кристалічні речовини з іонною решіткою, наприклад, кварц, слюда, корунд (Al_2O_3), рутил (TiO_2), а також неорганічне скло, кераміки.

Діелектрична проникність різних неорганічних стекел, що наближаються за будовою до аморфних діелектриків, лежить у порівняно вузьких межах – приблизно від 4 до 20.

4.2 Поляризаційні струми і електропровідність діелектриків

Поляризаційні процеси зсуву будь-яких зарядів у речовині, протікаючи в часі до моменту встановлення й одержання рівноважного стану, обумовлюють появу поляризаційних струмів або струмів зсуву в діелектриках. Струми зсуву пружно зв'язаних зарядів при електронній і іонній поляризаціях настільки короткочасні, що їх звичайно не вдається зафіксувати приладом.

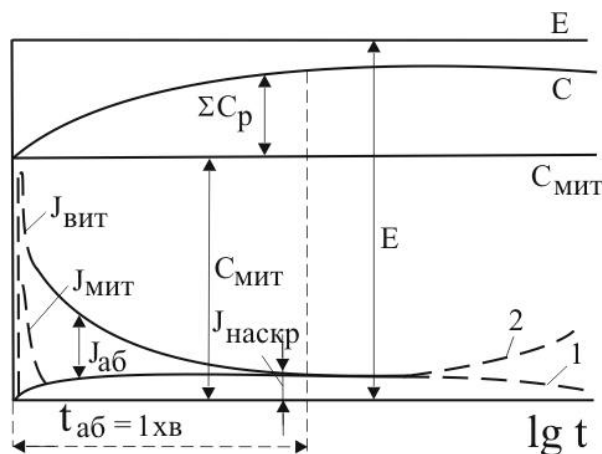
Струми зсуву при різних видах уповільненої поляризації, спостережувані в багатьох технічних діелектриках, називають абсорбційними струмами $I_{аб}$.

При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрямок, проходять тільки в періоди вмикання й вимикання напруги. При змінній напрузі вони існують протягом усього часу знаходження матеріалу в електричному полі. Наявність у технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів, а також інжекція їх з електродів призводять до виникнення невеликих струмів наскрізної електропровідності (або наскрізних струмів) $J_{ск}$.

Таким чином, повна густина струму в діелектрику, названого струмом витоку $J_{вит}$, являє собою суму густини струмів абсорбційного й наскрізного:

$$J_{вит} = J_{аб} + J_{ск}$$

Густина струму зсуву визначається миттєвими (електронним, іонним) і вповільненими зсувами зарядів. Густина струму і ємність конденсатора з діелектриком, що характеризується наявністю миттєвих і вповільнених (релаксаційних) механізмів поляризації залежність від часу (рис. 4.5). Видно, що після завершення процесів поляризації через діелектрик проходить тільки наскрізний струм.



ΣC_p – ємність, обумовлена релаксаційними механізмами поляризації; $C_{\text{мит}}$ – ємність від миттєвих механізмів поляризації

Рисунок 4.5 - Залежності ємності C й густини J струму від часу t в конденсаторі з діелектриком, що має декілька різних механізмів поляризації й наскрізну електропровідність (електричне поле прикладається миттєво й надалі із часом не змінюється)

У більшості випадків електропровідність діелектриків іонна, рідше - електронна. Опір діелектрика, покладеного між двома електродами, при постійній напрузі, тобто опір ізоляції $R_{\text{із}}$, можна обчислити за формулою

$$R_{\text{із}} = U / (I_{\text{вит}} - \Sigma I_{\text{пол}}),$$

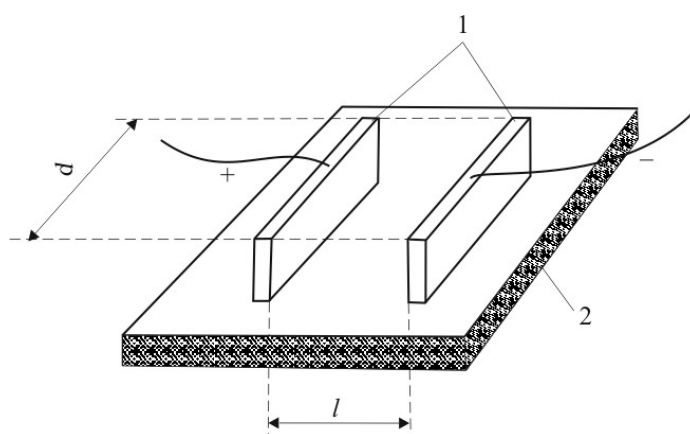
де U – прикладена напруга, В; $I_{\text{вит}}$ – струм витоку, А; $\Sigma I_{\text{пол}} = I_{\text{аб}}$ – сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації, А.

У твердих ізоляційних матеріалів розрізняють об'ємну й поверхневу електропровідності.

Питомий об'ємний опір ρ чисельно дорівнює опорі куба з ребром в 1 м, уявно виділеного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба; ρ виражають в Ом·м; 1 Ом·м = 100 Ом·см.

Для плоского зразка матеріалу при однорідному полі питомий об'ємний опір $\rho = R \frac{S}{h}$, де R – об'ємний опір, Ом; S – площа електрода, м²; h – товщина зразка, м.

Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), уявно виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні сторони цього квадрата (ρ_s виражають в Омах): $\rho_s = R_s \frac{d}{l}$, де R_s – поверхневий опір, Ом, зразка матеріалу між паралельно поставленими електродами шириною d , м, віддаленими один від одного на відстані l , м; (рис. 4.6).



1 – електроди, 2 - зразок з електроізоляційного матеріалу
Рисунок 4.6 – Схема виміру ρ_s

За питомим об'ємним опором можна визначити питому об'ємну провідність $\gamma = 1/\rho$, а питому поверхневу провідність - $\gamma_s = 1/(\rho_s)$.

Повна провідність твердого діелектрика, що відповідає його опору R_{i3} складається з об'ємної й поверхневої провідностей.

Постійна часу конденсатора τ_0 з ємністю C : $\tau_0 = R_{i3} \cdot C$.

Електропровідність діелектриків залежить від їхнього агрегатного стану, а також від вологості й температури навколишнього середовища.

При тривалій роботі під напругою наскрізний струм через тверді або рідкі діелектрики із часом може зменшуватися або збільшуватися. Зменшення наскрізного струму згодом свідчить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричного очищення зразка (див. рис. 4.5, криву 1). Збільшення струму згодом (рис. 4.5, крива 2)

свідчить про участь у ньому зарядів, які є структурними елементами самого матеріалу.

Незворотний процес нейтралізації іонів, що протікає в діелектрику, називають старінням під напругою; він здатний поступово привести до руйнування - проббою діелектрика.

Електропровідність газів. Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають дуже малу провідність. Струм у газах може виникнути тільки при іонізації нейтральних молекул газу, що виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень іонізованих частинок самого газу, прискорених електричним полем, з молекулами газу (ударна іонізація).

Зовнішніми факторами, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські, ультрафіолетові й космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильне нагрівання газу).

Одночасно із процесом іонізації, при якому відбувається утворення позитивних і негативних іонів або електронів, частина позитивних іонів, з'єднуючись із негативними частинками, утворюють нейтральні молекули. Цей процес називають **рекомбінацією**. Наявність рекомбінації перешкоджає безмежному зростанню кількості іонів у газі й обумовлює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора.

Електропровідність рідких діелектриків. У неполярних рідинах електропровідність визначається наявністю дисоційованих домішок, у тому числі вологи. У полярних рідинах електропровідність залежить не тільки від домішок; іноді вона викликається дисоціацією молекул самої рідини. Струм у рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням відносно великих заряджених колоїдних частинок.

Полярні рідини в порівнянні з неполярними завжди мають підвищену питому провідність. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою питомою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Зі збільшенням температури в результаті зменшення в'язкості рідини зростає рухливість іонів і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Ці фактори впливають на збільшення питомої провідності: $\gamma = A e^{\alpha/T}$ (де A , C м/м і α , K - постійні, що характеризують матеріал).

Електропровідність твердих діелектриків обумовлена як пересуванням іонів самого діелектрика, так і іонів випадкових домішок, або наявністю вільних електронів. Іонна електропровідність (на відміну від електронної) супроводжується переносом речовини на електроди.

У твердих діелектриках з іонною будовою електропровідність обумовлена головним чином переміщенням іонів. При низьких температурах пересуваються слабо закріплені іони, зокрема іони домішок, а при високих - власні іони, що покидають вузли решітки під впливом теплових флуктуацій.

У діелектриках з атомною або молекулярною решіткою електропровідність залежить від наявності домішок.

Питома провідність ($\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$) при температурі T : $\gamma = q N_T \mu_T$, де q — заряд носія; Кл; N_T — число носіїв в одиниці об'єму (концентрація), м^{-3} ; μ_T — рухливість, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

При відносно невисоких напруженостях електричного поля концентрація носіїв заряду й рухливість μ не залежать від \bar{E} , тобто швидкість дрейфу \bar{v} пропорційна напруженості поля: $\bar{v} = \bar{E}\mu$ і виконується закон Ома.

При іонній електропровідності $\gamma = A \exp(-b/T)$, де $b = (E_d + E_{\text{пер}})/k$, К; E_d - енергія дисоціації, Дж; $E_{\text{пер}}$ - енергія переміщення іону, Дж.

Звичайно $E_d \gg E_{\text{пер}}$, тому температурна залежність провідності визначається головним чином зміною концентрації носіїв. Величина b для твердих речовин лежить у межах 10000...22000 К.

Поверхнева електропровідність твердих діелектриків обумовлена наявністю вологи, забрудненнями й різними дефектами поверхні діелектрика.

Питома поверхнева провідність тим нижче, чим менше полярність речовини й чим чистіше поверхня діелектрика. Високу поверхневу провідність мають об'ємнопористі матеріали, тому що процес поглинання вологи вглиб матеріалу стимулює також і утворення її плівки на поверхні діелектрика.

4.3 Втрати в діелектриках

Діелектричними втратами називають електричну потужність, яка витрачається на нагрівання діелектрика, що перебуває в електричному полі.

Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі. При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного й поверхневого опорів, які визначають величину $R_{із}$. При змінній напрузі у діелектрику крім наскрізної електропровідності можуть проявлятися інші механізми перетворення електричної енергії в теплову. Тому якість матеріалу недостатньо характеризувати тільки опором ізоляції. В інженерній практиці найчастіше для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі використовують кут діелектричних втрат, а також тангенс цього кута.

Кутом діелектричних втрат δ називають кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз ϕ між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджає вектор напруги на кут 90° ; при цьому кут δ дорівнює нулю. Чим більша розсіювана в діелектрику потужність, тим менше кут зсуву фаз ϕ і тим більше кут діелектричних втрат δ і його функція $\text{tg}\delta$. **Тангенс кута діелектричних втрат** безпосередньо входить у формулу для потужності, що розсіюється в діелектрику, тому практично найчастіше користуються цією характеристикою. Вираз для потужності, що розсіюється в діелектрику:

$$P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta, \quad (4.3)$$

де P_a – активна потужність, Вт; U – напруга, В; ω – кругова частота, с^{-1} ; C – ємність, Ф.

Діелектричні втрати, віднесені до одиниці об'єму діелектрика, називають питомими втратами. Їх можна розрахувати за формулою

$$P = P / V = U^2 \omega C \text{tg}\delta / V = \omega \epsilon \epsilon_0 \text{tg}\delta E^2, \quad (4.4)$$

де V – об'єм діелектрика між плоскими електродами, м^3 ; E – напруженість електричного поля, В/м.

Великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання виготовленого з нього виробу й можуть призвести до його теплового руйнування. Якщо ж діелектрик використовується в коливальному контурі, то діелектричні втрати перешкоджають досягненню високої добротності (гострого

настроювання на резонанс), тому що зі збільшенням еквівалентного опору втрат підсилюється загасання коливань у контурі.

Діелектричні втрати за їхньою фізичною природою й особливостями підрозділяють на чотири основних види: 1) втрати на електропровідність; 2) релаксаційні втрати; 3) іонізаційні втрати;

4) резонансні втрати.

Втрати на електропровідність виявляються в діелектриках, що мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Діелектричні втрати цього виду не залежать від частоти прикладеної напруги; $\text{tg}\delta$ зменшується із частотою за гіперболічним законом. Значення тангенса кута діелектричних втрат при даній частоті може

бути обчислене за формулою $\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon f \rho}$.

Втрати наскрізної електропровідності зростають із ростом температури за експонентним законом $P_{\text{ат}} = A \exp(-b/T)$, де A , B та b , K - постійні матеріалу.

Релаксаційні втрати обумовлені активними складовими поляризаційних струмів. Вони характерні для діелектриків, що мають уповільнені види поляризації, і проявляються в області досить високих частот, коли позначається відставання поляризації від зміни поля. Температурна й частотна залежності $\text{tg}\delta$ мають максимуми. При низькій температурі через велику в'язкість діелектрика час релаксації поляризації великий ($\tau_0 \gg 1/\omega$), можливості повороту диполів у в'язкому середовищі вкрай обмежені. Тому тангенс кута діелектричних втрат є малим. З підвищенням температури в'язкість зменшується, а час релаксації наближається до часу періоду зміни поля. Дипольно-релаксаційна поляризація має більший розвиток, завдяки чому зростає $\text{tg}\delta$. При ще більш високих температурах час релаксації стає істотно меншим за час періоду зміни напруженості поля. Тому практично зникає запізнювання поляризації відносно поля і зменшуються релаксаційні втрати. Релаксаційні втрати спостерігаються й у лінійних діелектриків з іонно-релаксаційними і електронно-релаксаційними механізмами поляризації.

Втрати, обумовлені міграційною поляризацією, є в матеріалах з випадковими домішками або окремими компонентами, навмисно введеними в діелектрик для необхідної зміни його властивостей.

Іонізаційні втрати властиві діелектрикам у газоподібному стані.

Резонансні втрати спостерігаються в деяких газах при певній частоті й виражаються в інтенсивному поглинанні енергії електромагнітного поля. Резонансні втрати можливі й у твердих тілах, якщо частота змущених коливань, викликана електричним полем, збігається із частотою власних коливань частинок твердої речовини.

4.4 Пробій діелектриків

Діелектрик, перебуваючи в електричному полі, може втратити властивості ізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Явище утворення провідного каналу в діелектрику під дією електричного поля називають **пробоєм**.

Мінімальну, прикладену до діелектрика напругу, що призводить до його пробоя, називають **пробивною напругою** $U_{пр}$.

Передпробійний стан діелектрика характеризується різким зростанням струму, відступом від закону Ома у бік збільшення провідності. Значення пробивної напруги залежить від товщини діелектрика h і форми електричного поля, яка обумовлена конфігурацією електродів і самого діелектрика. Тому для порівняння властивостей різних матеріалів більш зручною характеристикою є електрична міцність.

Електричною міцністю називають мінімальну напруженість однорідного електричного поля, що призводить до пробоя діелектрика: $E_{пр} == U_{пр}/h$.

Якщо пробій відбувся в газоподібному діелектрику, то завдяки високій рухливості молекул пробита ділянка після зняття напруги відновлює свої електричні властивості. На противагу цьому, пробій твердих діелектриків закінчується руйнуванням ізоляції. Однак руйнування матеріалу можна попередити, обмеживши наростання струму при пробіі припустимою межею.

Пробій діелектриків може виникати в результаті чисто електричних, теплових, а в деяких випадках і електрохімічних процесів, обумовлених дією електричного поля.

Пробій газів. Повітря є ізоляційним середовищем для різних електронних приладів, для ліній електропередачі. У радіоелектроніці використовується повітря як при значному розрідженні, так і при підвищеному тиску.

Пробивна напруженість повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з більшістю рідких і твердих діелектриків і становить ≈ 4 МВ/м.

Пробій повітря й інших газів є наслідком розвитку процесів ударної й фотоіонізації.

Велику електричну міцність вакууму використовують у техніці при конструюванні високочастотних вакуумних конденсаторів, призначених для підвищених напруг.

Знижену порівняно з повітрям електричну міцність мають інертні гази, використовувані для заповнення електровакуумних приладів і джерел світла. Підвищеною електричною міцністю характеризуються деякі важкі гази з високою молекулярною масою, зокрема, елегаз (SF_6) і фреон (CCl_2F_2), у яких пробивна напруженість приблизно в 2,5 рази вище, ніж у повітря.

Пробій рідких діелектриків відбувається при більш високих значеннях електричної міцності, ніж газів в нормальних умовах завдяки меншій довжині вільного пробігу електронів.

Наявність домішок значно збільшує явище пробою рідких діелектриків.

Пробій рідини при радіочастотах обумовлений її розігрівом за рахунок діелектричних втрат, що може призводити до термічного руйнування рідини. Тому гранично припустимі робочі напруженості поля для рідких діелектриків на радіочастотах виявляються нижчими, ніж на промисловій частоті.

В твердих діелектриках можуть спостерігатися три основні механізми пробою: 1) електричний; 2) тепловий; 3) електрохімічний.

Електричний пробій твердих діелектриків протікає за час не більше за $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, він не обумовлений тепловою енергією і супроводжується у своїй початковій стадії руйнуванням діелектрика в дуже вузькому каналі. Це є чисто електронний процес, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Розвиток лавин супроводжується фотоіонізацією, що прискорює утворення провідного каналу. Прискорені полем електрони при зіткненнях передають свою енергію вузлам решітки й розігрівають діелектрик аж до плавлення. У розрядному каналі створюється значний тиск, pojawiaються тріщини або ізолятор повністю руйнується.

У випадку однорідного поля й повної однорідності структури в монокристалах багатьох окислів і деяких органічних полімерів $E_{пр}$

досягає більше як 1000 МВ/м. Електричний пробій спостерігається в більшості діелектриків при короткочасному (імпульсному) впливі напруги. Тонкі плівки можуть мати істотно більш високу електричну міцність, ніж масивні зразки.

Тепловий пробій виникає в тому випадку, коли тепла енергія, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, не встигає розсіюватися через його низьку теплопровідність; при цьому порушується тепла рівновага, а процес здобуває лавиноподібний характер. Матеріал розігрівається в електричному полі до температур, що відповідають розплавленню, обвуглюванню та ін.

Електрична міцність при тепловому пробіє є характеристикою не тільки матеріалу, але й виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробіє служить характеристикою самого матеріалу. Пробивна напруга, обумовлена нагріванням діелектрика, залежить від частоти, умов охолодження, температури навколишнього середовища та від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики (наприклад, полістирол) за інших рівних умов мають більш низькі значення електротеплових пробивних напруг, ніж неорганічні (кварц, кераміка), внаслідок їх малої нагрівостійкості.

Іонізаційний пробій є різновидом теплового пробіє. Він характерний для твердих пористих діелектриків і обумовлений іонізацією газу в порах.

Електрохімічний пробій електротехнічних матеріалів має істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробіє спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються процеси, що обумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції (електрохімічне старіння). Крім того, електрохімічний пробій може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, найчастіше - у кераміці, що містить окисли металів змінної валентності (наприклад, TiO_2) та у багатьох органічних матеріалах.

Поверхневий пробій - це пробій газу або рідини поблизу поверхні твердого діелектрика. При поверхневому пробіє електрична міцність твердого діелектрика не порушується, однак утворення провідного каналу на поверхні істотно обмежує робочі напруги ізолятора.

Ефективним заходом боротьби з поверхневим пробієм є заміна повітря рідким діелектриком, наприклад, трансформаторним маслом,

яке має більш високу електричну міцність і сприяє зниженню напруженості поля на поверхні твердого діелектрика. Тому зануренням ізолятора в рідкий діелектрик можна домогтися підвищення граничних робочих напруг.

4.5 Класифікація діелектричних матеріалів

В електронній техніці, радіотехніці й приладобудуванні застосовують безліч різних діелектриків. За функціями, виконуваними в апаратах і приладах, їх можна підрозділити на електроізоляційні й конденсаторні матеріали (пасивні діелектрики) і керовані матеріали (активні діелектрики) (рис. 4.7).

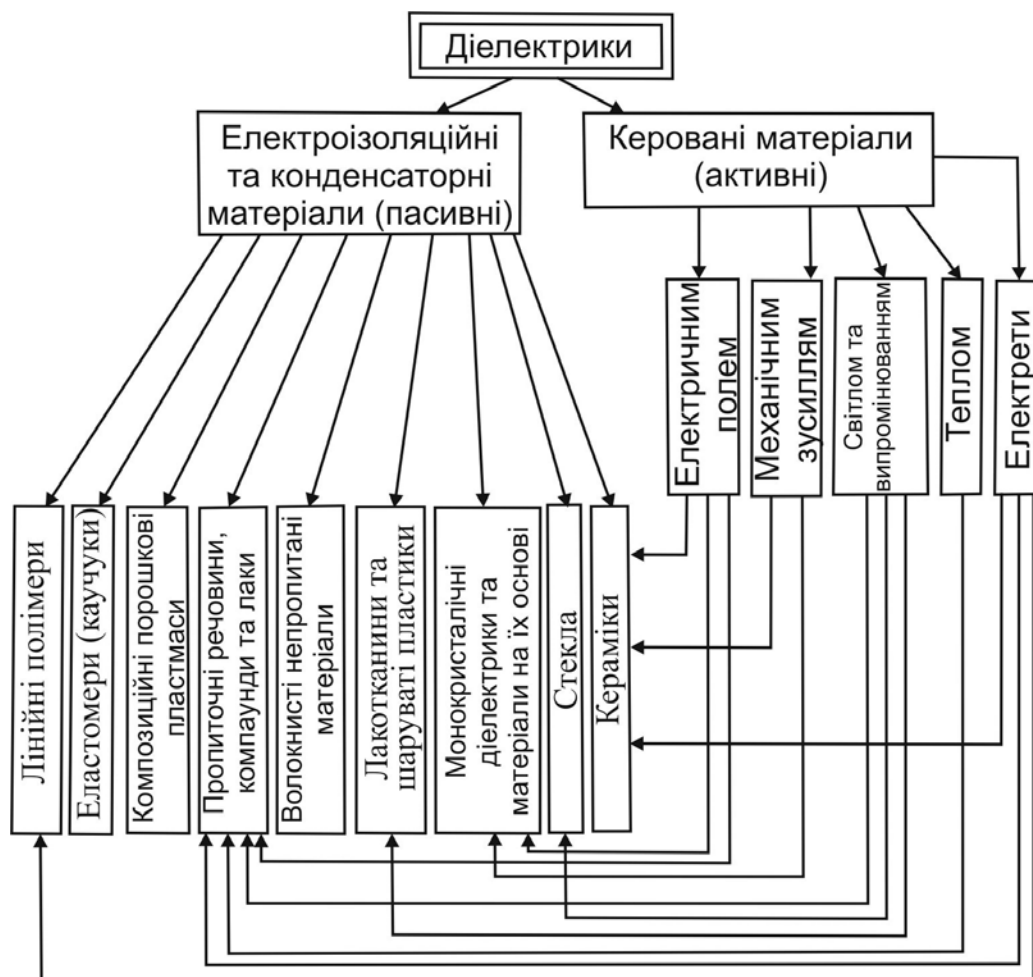


Рисунок 4.7 - Класифікація діелектричних матеріалів

Електроізоляційні матеріали використовують для створення електричної ізоляції, що оточує струмоведучі частини електричних пристроїв і відокремлює один від одного елементи схеми або

конструкції, що перебувають під різними електричними потенціалами.

Застосування діелектриків у конденсаторах дозволяє одержувати необхідні значення ємності, або забезпечує потрібний характер залежності цієї ємності від зовнішніх факторів.

Деякі діелектрики застосовують як для створення електричної ізоляції, так і як конденсаторні матеріали (наприклад, слюда, кераміка, скло, полістирольні й інші плівки). Проте, вимоги до електроізоляційних і конденсаторних матеріалів істотно розрізняються. Якщо від електроізоляційного матеріалу потрібні невисока відносна діелектрична проникність ϵ і великий питомий опір ρ , то діелектрик конденсатора, навпаки, повинен мати підвищену ϵ і мале значення $\text{tg}\delta$. Роль діелектрика в конденсаторі також не можна вважати активною, але сам конденсатор вже є функціональним елементом в електричній схемі.

Конденсатори з керованими (активними) діелектриками можуть бути використані для посилення сигналів за потужністю, створення різних перетворювачів, елементів пам'яті, датчиків ряду фізичних процесів і генерації коливань.

Через розмаїтість застосовуваних на практиці діелектриків, розходження їхніх властивостей і деяких історично сформованих традицій підрозділу матеріалів надану класифікацію не завжди вдається строго витримувати.

4.6 Електроізоляційні полімери

Полімерами називають високомолекулярні сполуки, молекули яких складаються з великого числа структурно повторюваних ланок – мономерів. Молекулярна маса полімерів досягає 10^6 , а геометричні розміри молекул можуть бути настільки великими, що розчини цих речовин за властивостями наближаються до колоїдних систем.

За структурою макромолекул полімери розподіляють на два основних типи – лінійні й просторові.

У **лінійних полімерах** макромолекули – це ланцюжкові послідовності повторюваних ланок. Відношення довжини лінійної молекули до її поперечних розмірів дуже велике, наприклад, молекула полістиролу має довжину близько $1,5 \cdot 10^{-6}$ м при поперечнику $1,5 \cdot 10^{-9}$ м, а каучуку й целюлози – мають довжину $(4 \dots 8) \cdot 10^{-7}$ м при поперечнику $(3 \dots 7,5) \cdot 10^{-10}$ м.

В просторових полімерах (феноло-формальдегідні й епоксидні смоли, ебоніт, ескапон) макромолекули зв'язані в загальну сітку, що призводить до необмеженого зростання молекулярної маси, яка характеризує вже не окрему макромолекулу, а деяку область полімеру. У таких просторово-структурованих матеріалах окремі макромолекули втрачають індивідуальність. Тому іноді просторові полімери називають полімерними тілами.

Лінійні полімери порівняно гнучкі й еластичні, більшість із них при помірному підвищенні температури легко розм'якшується й розплавляється. Просторові полімери мають велику твердість, розплавлення їх відбувається при високих температурах, а багато які з них до досягнення температури плавлення руйнуються хімічно (згоряють, обвуглюються й т.п.). Тому лінійні полімери в практиці називають термопластичними, а просторові – термореактивними.

Завдяки слабкій міжмолекулярній взаємодії лінійні полімери в більшості випадків набухають й розчиняються в органічних розчинниках з утворенням в'язких розчинів, з яких потім виготовляють міцні плівки й волокна. Значна частина просторових полімерів нерозчинна, а при високій стадії полімеризації ще й повністю інертні до змін температури навколишнього середовища.

Електричні властивості. Будова макромолекул багато в чому визначає електричні властивості полімерів. Всі хімічні зв'язки вуглецю з іншими елементами певною мірою полярні. Якщо молекула має симетричну будову, то дипольні моменти окремих зв'язків можуть урівноважувати один одного, завдяки чому сумарний дипольний момент дорівнює нулю. Речовини з несиметрично побудованими ланками полімерних молекул є дипольними і характеризуються гігроскопичністю, невисокими або середніми електричними характеристиками. Високомолекулярні вуглеводні із симетричними молекулами практично неполярні або слабкополярні, гігроскопичність їх мізерно мала, тому вони мають малі діелектричні втрати й низьку питому провідність.

Нагрівостійкість. Більшість органічних полімерів може довгостроково працювати лише при температурах нижче 100 °С. Вище цієї температури, як правило, відбувається швидке теплове старіння матеріалу. Промисловістю виробляються й досить нагрівостійкі високомолекулярні матеріали, наприклад, фтормісткі полімери, кремнійорганічні сполуки, поліаміди.

Полімери з малими діелектричними втратами (неполярні) - це такі полімери, у яких мономерні ланки макромолекул не мають дипольного моменту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Основні властивості неполярних полімерів

Властивості	Поліетилен	Полістирол	Фторопласт-4
Питомий опір, Ом·м	$10^{14} \dots 10^{15}$	$10^{14} \dots 10^{16}$	$10^{14} \dots 10^{16}$
Відносна діелектрична проникність	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
Тангенс кута діелектричних втрат при 10^6 Гц	0,0002... 0,0005	0,0002... 0,0004	0,0002...0,0003
Електрична міцність, МВ·м ⁻¹	40...150	20...110	40...250
Нагрівостійкість, °С	105...130	75...80	300

Примітка: Верхні границі значень властивостей відносяться до тонких плівок

Поліетилени виготовляються полімеризацією при різних тисках і відрізняються один від одного механічною міцністю. Поліетилен має порівняно велику еластичність й високу стійкість до дії кислот і лугів. Але він добре розчиняється в органічних розчинниках – бензині, маслах та ін.

Полістирол порівняно з поліетиленом є менш гнучким і більш стійким до органічних розчинників.

Політетрафторетилен залежно від виробника називають фторопластом-4, фторлоном-4, тефлоном. Це продукт полімеризації тетрафторетилена $F_2C=CF_2$. Серед всіх органічних полімерів політетрафторетилен виділяється високою нагрівостійкістю (близько 300 °С) і дуже високою стійкістю до дії хімічних реагентів - на нього зовсім не діють сірчана, соляна, азотна й плавикова кислоти, луги й т.п. Деякою мірою на нього діють лише розплавлені лужні метали й атомарний фтор при підвищених температурах. За стійкістю до хімічно активних речовин політетрафторетилен перевершує золото й платину. Він не горючий, не розчиняється в жодному з відомих розчинників, практично негігроскопічний і не змочується водою й іншими рідинами.

При нагріванні до температури 415 °С політетрафторетилен розкладається з виділенням отрутного газу – фтору. Але навіть при такій температурі цей полімер не переходить у текучий стан.

Як видно з табл. 4.1, всі неполярні полімери характеризуються невеликою діелектричною проникністю, малими діелектричними втратами, а в діапазоні радіочастот - високою електричною міцністю й досить високим питомим опором. Значення ϵ не залежить від частоти й слабо зменшується з підвищенням температури, що відповідає зменшенню густини полімеру при нагріванні. Температурний коефіцієнт діелектричної проникності неполярних полімерів приблизно дорівнює подвоєному коефіцієнту лінійного розширення. Завдяки високому питомому опору втрати на електропровідність у розглянутих матеріалах при нормальних умовах дуже малі, головними в них є релаксаційні втрати, хоча вони теж малі - $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$. Завдяки малим втратам неполярні полімери широко застосовують у техніці високих і надвисоких частот.

Поліетилен використовують як ізоляцію телевізійних і радіочастотних кабелів. Тонкі плівки з полістиролу й політетрафторетилена застосовують для виготовлення термостабільних високочастотних конденсаторів з досить великою ємністю й досить високим опором ізоляції. Важливою властивістю таких плівок є висока електрична міцність, що досягає 200...250 МВ/м.

Полімери з підвищеними діелектричними втратами (полярні) мають знижені електроізоляційні властивості в порівнянні з неполярними полімерами, особливо на високих частотах. Найпоширенішими матеріалами цієї групи є полівінілхлорид, поліетилентерефталат (лавсан), поліметилметакрилат (органічне скло) і поліамідні смоли. Їхні властивості можна охарактеризувати наступними усередненими параметрами:

питомий опір, Ом·м	3...6
відносна діелектрична проникність	$10^{11} \dots 10^{14}$
тангенс кута діелектричних втрат при 10^6 Гц	0,01...0,06
електрична міцність, МВ·м ⁻¹	15...50.

У всіх полярних полімерів діелектрична проникність зменшується з ростом частоти, а у температурній залежності $\text{tg}\delta$ наявні максимуми. При підвищених температурах істотну роль починають грати втрати, обумовлені електропровідністю. Полярні полімери у порівнянні з неполярними мають на два порядки більший $\text{tg}\delta$ і помітно менший питомий об'ємний опір. Тому вони

використовуються в основному як ізоляційні й конструкційні матеріали в діапазоні низьких частот.

Полівінілхлоридний пластикат широко застосовується у виробництві монтажних проводів завдяки гнучкості, достатній міцності й високій продуктивності накладення ізоляції. З непластифікованого ПВХ виготовляють вироби, здатні працювати в хімічно агресивних середовищах.

З плівок з **лавсану** можна виготовляти міжшарову ізоляцію в обмотках трансформаторів і дроселів, розрахованих на робочу температуру $-60...+150$ °С. Плівки з лавсану з найбільш високою механічною міцністю мають товщину близько 6,5 мкм. Конденсатори з таких плівок мають більшу робочу температуру (до 150 °С) у порівнянні з паперовими й менше останніх за розмірами.

Органічне скло в основному застосовується як декоративний матеріал в електро- і радіоапаратурі.

Капрон, завдяки хорошим термопластичним властивостям і високій механічній міцності, використовують у виробництві різних конструкційних деталей радіоапаратури (корпуси приладів, ручки й кнопки керування, клавіші перемикачів діапазонів, каркаси індуктивних котушок і т.п.). На основі поліамідів виготовляють емальлаки, що утворюють міцні еластичні діелектричні покриття на металевих проводах.

4.7 Композиційні пластмаси і шаруваті пластики

Композиційні порошкові пластмаси, призначені для виготовлення виробів методом гарячого пресування або лиття під тиском, складаються зі зв'язувальної речовини (штучні смоли) і наповнювачів (деревне борошно, відходи бавовни, каолін, кварцовий пісок, азбестове або скляне волокно й т.д.). Крім того, у масу додають барвники і пластифікатори. Наповнювач здешевлює пластмасу і поліпшує механічні характеристики виробу, а також поліпшує електричні властивості діелектриків.

При масовому виробництві виробів однакової форми й розмірів застосування пластичних мас забезпечує високу продуктивність праці.

Як зв'язувальну речовину використовують формальдегідні, фурфурольні, кремнійорганічні й інші смоли.

З композиційних пластмас у радіоелектроніці виготовляють корпуси радіоприймачів, телевізорів, вимірювальних приладів, навушники, лампові панельки, клемні щитки, голівки кнопок, рукоятки, штепсельні роз'єми й ін. Пресування пластмаси дозволяє виготовити їх за одну технологічну операцію.

Різновидом композиційних пластмас є шаруваті пластики з наповнювачем з листових волокнистих матеріалів - гетинакс і текстоліт.

Гетинакс виготовляють пресуванням при температурі 160 °С під тиском 10...12 МПа паперу, просоченого водною суспензією формальдегідної смоли. У результаті волокниста основа зв'язується в міцний монолітний матеріал. Шарувата будова гетинаксу призводить до анізотропії властивостей. Так, питомий об'ємний опір гетинаксу вздовж шарів в 50...100 разів нижче, ніж поперек; електрична міцність вздовж шарів в 5...8 разів нижче, ніж поперек.

Гетинакс є сильнополярним діелектриком, його електрична міцність (перпендикулярно шарам) становить близько 30 МВ/м, $\epsilon = 6...7$, $\text{tg}\delta = 0,04...0,08$ (на частоті 10^6 Гц).

Для виготовлення друкованих схем радіоапаратури використовують **фольгований гетинакс**. Це - гетинакс, облицьований з однієї або із двох сторін електропровідною фольгою з червоної міді товщиною 0,035...0,05 мм. Необхідний малюнок схеми виготовляють шляхом вибіркового травлення.

Текстоліт – пластик, аналогічний гетинаксу, але його виготовляють із просоченої бавовняної тканини, або тканини зі стекловолокна (**стеклотекстоліт**).

4.8 Електроізоляційні компаунди

Компаундами називають суміші різних ізоляційних речовин (смола, бітумів, ефірів, целюлози й т.д.), які переводять у рідкий стан найчастіше шляхом розігріву до досить високої температури; затвердіння ж відбувається при охолодженні розплавленого компаунду. Для електронної апаратури, чутливої до впливу підвищеної температури, використовують компаунди, що твердіють при невисокій температурі шляхом полімеризації, що протікає завдяки вводу в їхній склад спеціальних отверджувачів.

За призначенням розрізняють дві основні групи компаундів: просочувальні й заливальні. Останні використовують для заповнення

порівняно великих порожнин, проміжків між різними деталями, для захисту ізоляції від зволоження, для збільшення пробивної напруги, для поліпшення тепловідвода, підвищення механічної міцності й т.д.

За властивостями компаунди підрозділяють на термопластичні й термореактивні. **Термопластичні компаунди** розм'якшуються при нагріванні (для просочення або заливання) і тверднуть при охолодженні. До їхнього числа належать бітумні компаунди. Бітумами називають групу нафтових аморфних термопластичних матеріалів, які являють собою складні суміші вуглеводнів.

Термореактивні компаунди незворотно отверджуються в результаті хімічних реакцій, що відбуваються в рідкому стані, і при нагріванні вже не розм'якшуються. Заливання термореактивним компаундом практично виключає можливість ремонту деталі або приладу у випадку їхнього ушкодження. До термореактивних належать компаунди на основі поліефірних, кремнійорганічних і епоксидних смол. Епоксидні компаунди мають малу усадку при затвердінні, виняткову міцність й досить високі вологозахисні властивості.

Компаунди широко застосовують для просочення й заливання окремих вузлів трансформаторів, дроселів, конденсаторів, а також для герметизації й обпресування дискретних напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем. Різновиди епоксидних компаундів, які мають високу оптичну однорідність і прозорість до випромінювання у видимій і ближній інфрачервоній областях спектра, застосовуються в якості погоджувальних оптичних (імерсійних) середовищ при виводі випромінювання зі світлодіодів.

4.9 Неорганічні стекла

Стекла - неорганічні квазіаморфні тверді речовини, у яких при наявності ближнього порядку відсутній далекий порядок у розташуванні частинок.

Найбільш поширеними є силікатні стекла (тобто на основі SiO_2) завдяки їх високій хімічній стійкості, а також дешевині й доступності сировини. Для додання певних фізичних властивостей, а також з технологічних міркувань до складу силікатних стекел вводять окисли різних металів. Силікатні стекла стійкі до дії кислот, за винятком плавикової кислоти HF , що їх розчиняє; стійкість цих стекел до лугів значно менше.

Кварцове скло (плавлений кварц) можна розглядати як неорганічний просторовий полімер (полімерне тіло). Воно має найменше значення температурного коефіцієнта лінійного розширення α_l із усіх відомих речовин, дуже високу межу міцності на стиск (до 2100 МПа) і 60 МПа - при розтяганні. Висока механічна міцність разом з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення обумовлюють високу стійкість кварцового скла до теплових імпульсів. Кварцове скло високо прозоре для випромінювання в ультрафіолетовій, видимій і інфрачервоній областях спектра аж до довжини хвилі порядку 4 мкм. Тому воно є хорошим оптичним матеріалом; з нього виготовляють лінзи, призми, оптичні вікна, балони ламп ультрафіолетового випромінювання й ін. За електричними властивостями кварцове скло є хорошим високочастотним діелектриком ($\epsilon = 3,8$; $\rho > 10^{16}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ – на частоті 10^6 Гц).

Недоліком кварцового скла є важка технологія його виготовлення.

При введенні до складу скла окислів лужних металів технологія його варіння та виготовлення виробів полегшується. Однак, істотно погіршуються електричні властивості: знижується питомий опір, зростають діелектричні втрати внаслідок підсилення іонно-релаксаційної поляризації, зменшується питомий опір матеріалу. Стекла, що містять у великих кількостях окисли важких металів (барію, титану, свинцю) характеризуються малими діелектричними втратами.

Діелектрична проникність всіх стекол збільшується з підвищенням температури. Температурний коефіцієнт діелектричної проникності різних технічних стекол перебуває в межах $(30 \dots 500) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

В однорідному електричному полі електрична міцність скла дуже велика (до 500 МВ/м), а у неоднорідному полі - значно нижча.

При високих частотах (а при високих температурах, при низьких частотах і при постійній напрузі) пробій скла має тепловий характер.

За технічним призначенням стекла поділяють на електровакуумні, ізоляторні, кольорові та лазерні стекла, скловолокно, світловоди.

Електровакуумні стекла призначені для виготовлення балонів, ніжок і інших деталей електровакуумних приладів. Їх температурний коефіцієнт лінійного розширення має бути приблизно таким самим,

як і у матеріалів, що з'єднують із ним. Інакше при зміні температури може відбутися порушення герметичності в місці введення металевого дроту в скло. Крім того, для високочастотних приладів використовують стекла з низькими діелектричними втратами. Електровакуумні стекла підрозділяють і маркують за назвою метала, в якого співпадає чисельне значення температурного коефіцієнта лінійного розширення зі значенням цього коефіцієнта скла:

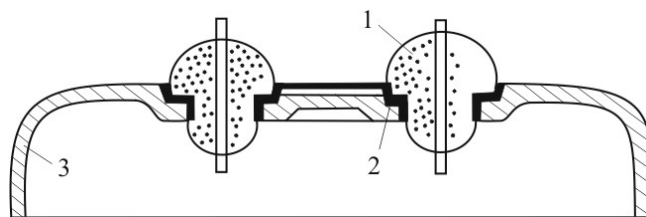
платинове $\alpha_l = (85 \dots 92) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$;

молібденове $\alpha_l = (46 \dots 52) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$;

вольфрамове $\alpha_l = (35 \dots 42) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

За хімічним складом електровакуумні стекла належать до групи боросилікатних ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) або алюмосилікатних ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) матеріалів з добавками лужних окислів.

Ізоляторні стекла легко металізуються й використовуються в якості герметизованих ввідів у металеві корпуси різних приладів (конденсаторів, діодів, транзисторів і ін., рис. 4.8).



1 - скляні ізолятори; 2 - шар впеченого срібла; 3- металева кришка

Рисунок 4.8 – Герметизовані вводи у металевому корпусі герметизованого конденсатора

Іншим елементом ізоляції, що часто зустрічається в дискретних напівпровідникових приладах, є скляне намисто, що ізолює металеві виводи приладу від фланця корпусу, на якому розташовується напівпровідниковий кристал з р-п-переходами. Скляні намиста виготовляють із капілярів, нарізаних у вигляді трубок і кілець певних розмірів. Звичайно як матеріал таких прохідних ізоляторів використовують лужне силікатне скло.

Лазерні стекла використовують як робоче тіло у твердотільних лазерах. Генеруючими центрами є активні іони, рівномірно розподілені в діелектричній прозорій матриці. У практиці найбільш часто застосовують баритовий крон ($\text{BaO-K}_2\text{O-SiO}_2$), активований іонами неодиму Nd^{+3} .

Скловолокно виготовляють з розплавленого лужного алюмосилікатного, безлугового або малолугового алюмоборо-силікатного скла. Тонкі скляні волокна (діаметром 4...7 мкм) мають настільки високу гнучкість, що можуть оброблятися способами текстильної технології. Зі скляних ниток, скручених з окремих волокон, виготовляють скляні тканини, стрічки й шланги. Перевагами скляної волокнистої ізоляції перед ізоляцією з органічних волокон є висока нагрівостійкість, значна механічна міцність, відносно мала гігроскопічність і хороші електроізоляційні властивості.

Для передачі світла між джерелом і приймачем випромінювання використовують **світловоди** - тонкі скляні волокна. Окремі волокна можуть бути з'єднані у світлові кабелі (джгути) із внутрішніми міжволоконними світлоізолюючими покриттями. Сукупність методів і засобів передачі світлової інформації за допомогою найтонших волокон одержала назву **волоконної оптики**, що є важливою складовою частиною оптоелектроніки.

Волоконні пристрої (рис.4.9) відрізняються компактністю й надійністю. З їхньою допомогою передача зображення можлива по скривленому шляху. Істотним моментом є скритність передачі інформації й висока перешкодозахищеність оптичного каналу зв'язку. Світловоди служать напрямними системами - каналізують світло від джерела до приймача інформації за рахунок ефекту багаторазового повного внутрішнього відбиття.

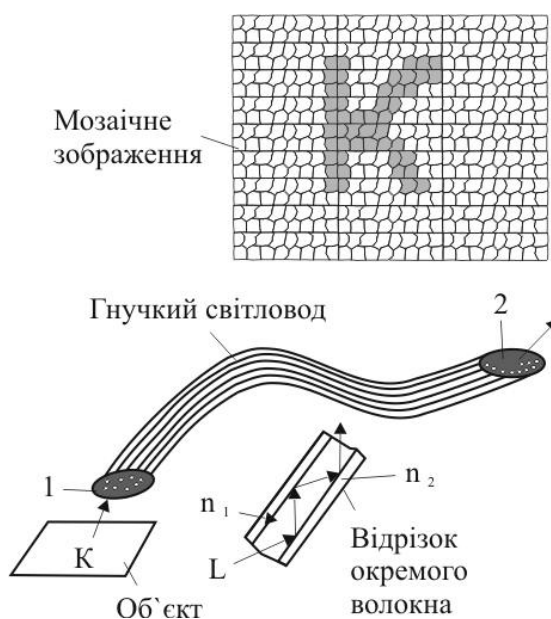


Рисунок 4.12 - Принцип дії світловоду

За допомогою волоконних джгутів легко здійснити перетворення оптичного зображення, його кодування й дешифрування. Світлові кабелі з волокон можуть підсилювати освітленість об'єктів за рахунок концентрації світлового потоку, зменшувати або збільшувати зображення.

Спеціальні технологічні прийоми (осадження плівок на підкладку, іонне легування, іонний обмін) дозволяють виготовити плоскі світловоди, які є основою оптичних інтегральних схем.

4.10 Ситали

Ситали - це склокристалічні матеріали, що виготовляють шляхом стимульованої кристалізації стекел спеціально підібраного складу. Вони займають проміжне положення між звичайними стеклами й керамікою. Ситали відрізняються від стекел тим, що в основному мають кристалічну будову, а від кераміки - значно меншим розміром кристалічних зерен. Ситали мають підвищену механічну міцність, можуть мати як дуже маленький, так і великий коефіцієнт лінійного розширення, високу теплопровідність і задовільні електричні характеристики (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Властивості ситалів

Властивість	Значення
Густина, Мг·м ³	2,3...2,8
Водопоглинання, %	0,01
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, К ⁻¹	(12...120) · 10 ⁻⁷
Питома теплопровідність, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	0,8...2,5
Температура текучості, °С	750...1350
Границя міцності при вигині, МПа	50...260
Питомий об'ємний опір, Ом·м	10 ⁸ ...10 ¹²
Електрична міцність, МВ·м	25...75
Тангенс кута діелектричних втрат при 10 ⁶ Гц	(10...800) · 10 ⁻⁴

Діелектричні втрати в ситалах визначаються властивостями залишкової склоподібної фази. Ситали досить нагрівостійкі. Механічна міцність їх мало змінюється при нагріванні до температури 700...800 °С. Деякі ситали мають високу хімічну

стійкість до дії сильних кислот (крім HF) і лугів. Доступність сировини й проста технологія забезпечують невисоку вартість виробів.

Ситали широко використовують як підкладки гібридних інтегральних мікросхем і дискретних пасивних елементів (наприклад, тонкоплівкові резистори), деталей НВЧ-приладів і деяких типів електронних ламп.

4.11 Кераміка

Під керамікою розуміють велику групу діелектриків з різноманітними властивостями, об'єднаних спільністю технологічного циклу. При виготовленні з них виробів потрібен високотемпературний випал.

В сучасній радіоелектроніці використовують керамічні діелектрики, яким властиві висока нагрівостійкість, мала гігроскопічність, хороші електричні характеристики при достатній механічній міцності, стабільність характеристик і надійність, стійкість до впливу випромінювання високої енергії та ураженню пліснявою й ушкодженню комахами. Сировина для виробництва основних радіокерамічних виробів є доступною й дешевою. Перевагою кераміки є можливість досягнення заздалегідь заданих характеристик шляхом зміни складу й технології виробництва.

Керамічні матеріали, що належать до діелектриків, за технічним призначенням можна підрозділити на установочні й конденсаторні.

Установочну кераміку застосовують для виготовлення різного роду ізоляторів і конструкційних деталей опорних, прохідних, підвісних, антенних ізоляторів радіоприладів, підкладок інтегральних мікросхем, лампових панелей, внутрішньолампових ізоляторів, корпусів резисторів, каркасів індуктивних котушок, основи електричних печей і ін. Крім того, з кераміки виготовляють понад 50 % усіх конденсаторів.

За електричними властивостями установочну й конденсаторну кераміку підрозділяють на низькочастотну й високочастотну.

Ізоляторний фарфор характеризується високими електричною й механічною міцністю та густиною. Але високі діелектричні втрати ($\text{tg}\delta \sim 10^{-2}$) обмежують його використання низькими частотами.

Радіофарфор відрізняється великою пластичністю маси, що дозволяє виготовляти з нього як дрібні, так і великогабаритні вироби.

Ультрафарфор є високочастотним діелектриком, у якому поєднуються низькі діелектричні втрати з високою механічною міцністю й задовільними для промислового виробництва технологічними параметрами.

Корундова кераміка (алюмініоксид) має низькі діелектричні втрати в діапазоні радіочастот і при підвищених температурах, нагрівостійкість до 1600 °С, а також велику механічну міцність й високу питому теплопровідність - в 10...20 разів вище, ніж в ізоляторного фарфора. Однак вона є нетехнологічною, має велику абразивність, непластична, відрізняється високою температурою спікання (до 1750 °С). Використовується в якості вакуумгерметичних ізоляторів у корпусах напівпровідникових приладів і підкладок інтегральних мікросхем, а також як внутрішньолампові ізолятори з пористою структурою.

Різновидом алюмініоксиду є **полікор**, що має особливо щільну структуру, є прозорим. Його застосовують для виготовлення колб спеціальних джерел світла та для осадження пасивних елементів гібридних інтегральних мікросхем.

Істотною перевагою керамічних підкладок у порівнянні зі скляними й ситаловими є їхня висока теплопровідність, що визначає припустимі значення розсіюваної електричної потужності. Найбільш високу теплопровідність [200...250 Вт/(м·К)] має **брокерит** - кераміка на основі окису берилія (95...99 % BeO). Її теплопровідність в 200...250 разів перевищує теплопровідність стекл і ситалів. До того ж вона має високі електричні параметри: $\rho = 10^{16}$ Ом·м, $\text{tg}\delta \leq 3 \cdot 10^{-4}$ (на частоті 1 МГц). Металізація виробів із брокериту забезпечує одержання вакуумних спаїв кераміки з міддю й коваром. Брокеритову кераміку застосовують як підкладки для інтегральних мікросхем, в потужних приладах НВЧ.

Недоліком цього матеріалу є токсичність порошкоподібного BeO, що вимагає дотримання строгих мір техніки безпеки на всіх етапах технологічного циклу виготовлення керамічних виробів.

Конденсаторна кераміка може бути з підвищеним ($\epsilon = 10...230$) і високим ($\epsilon > 900$) значеннями діелектричної проникності. У першому випадку при частоті 1 МГц $\text{tg}\delta \leq 0,0006$, тобто кераміка належить до високочастотних діелектриків, у другому - при частоті 1000 Гц $\text{tg}\delta = 0,002...0,025$, і таку кераміку відносять до низькочастотних діелектриків.

Конденсаторну кераміку використовують для виробництва низькочастотних і високочастотних конденсаторів відповідно низької й високої напруги.

Спеціальними матеріалами для високочастотних конденсаторів є **тиконди** - кераміки на основі рутилу (TiO_2), перовскиту (CaTiO_3), титанату стронцію (SrTiO_3).

Основа низькочастотної конденсаторної кераміки - титанат барію BaTiO_3 і тверді розчини із сегнетоелектричними властивостями. Завдяки властивості сегнетоелектрикам доменній поляризації конденсаторна сегнетокераміка має досить високу діелектричну проникність ($\epsilon = 900 \dots 8000$), значення якої однак температурно нестабільне й залежить також від частоти й напруженості електричного поля.

4.12 Активні діелектрики

Активними називають діелектрики, властивостями яких можна управляти за допомогою зовнішніх енергетичних впливів і використовувати ці впливи для створення функціональних елементів електроніки.

Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, посилення, модуляцію електричних і оптичних сигналів, запам'ятовування або перетворення інформації. З переходом до функціональної електроніки роль і значення активних матеріалів при рішенні найважливіших наукових і технічних завдань безупинно зростають. До числа активних діелектриків відносять сегнето-, п'єзо- і піроелектрики; електрети; матеріали квантової електроніки; рідкі кристали; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями й ін.

Властивості активних діелектриків можуть мати не тільки тверді, але також рідкі й навіть газоподібні речовини (наприклад, активне середовище газових лазерів). За хімічним складом це можуть бути органічні й неорганічні матеріали. За будовою й властивостями їх можна поділити на кристалічні й аморфні, полярні й неполярні діелектрики. Ряд матеріалів проявляє свою активність лише завдяки наявності в них спонтанної або стійкої залишкової поляризації. Строга класифікація активних діелектриків, що охоплює багато ознак цих матеріалів, є складною, різкої границі між активними й пасивними діелектриками не існує. Той самий матеріал у різних

умовах його експлуатації може виконувати або пасивні функції ізолятора чи конденсатора, або активні функції управляючого або перетворюючого елемента.

У більшості випадків активні діелектрики класифікують за родом фізичних ефектів, які можна використати для керування властивостями матеріалів, хоча така класифікація і не дозволяє чітко відокремити одну групу матеріалів від іншої. Наприклад, сегнетоелектрики поєднують у собі властивості п'єзо- і піроелектриків, електрооптичних і нелінійно-оптичних матеріалів.

1.12.1 Сегнетоелектрики

Сегнетоелектриками називають речовини, що мають **спонтанну поляризацію**, напрямок якої може бути змінений за допомогою зовнішнього електричного поля. При відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики, як правило, мають доменну структуру (рис. 4.13).

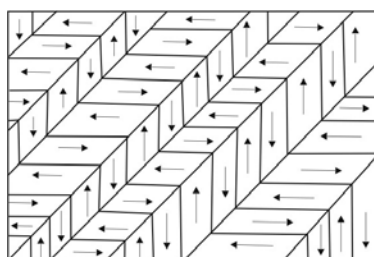


Рисунок 4.13 - Схема розташування доменів у кристалі титанату барію тетрагональної модифікації

Домени є макроскопічними областями, що мають спонтанну поляризацію, яка виникає під впливом внутрішніх процесів у діелектрику. Напрямок електричних моментів у різних доменах різний. Тому сумарна поляризованість зразка в цілому може дорівнювати нулю.

Кристал, що має малі розміри, може складатися лише з одного домена. Однак великі зразки завжди розбиваються на безліч доменів, оскільки однодомений стан енергетично не вигідний. Розбивка на домени зменшує електростатичну енергію сегнетоелектрика. Встановлено, що лінійні розміри доменів $10^{-4} \dots 10^{-1}$ см.

Зовнішнє електричне поле змінює напрямки електричних моментів доменів, що створює ефект дуже сильної поляризації. Цим пояснюються властиві сегнетоелектрикам надвисокі значення

діелектричної проникності (до сотень тисяч). Процес зсуву доменних границь викликає переорієнтацію вектора спонтанної поляризованості в напрямку зовнішнього електричного поля. Наслідком є нелінійна залежність вектора електричної індукції \bar{D} від напруженості електричного поля \bar{E} (рис. 4.14).

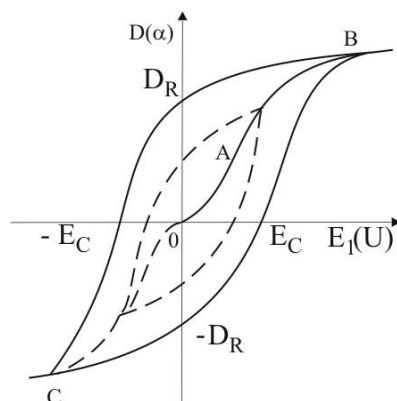


Рисунок 4.14 - Основна крива поляризації сегнетоелектрика й петля діелектричного гістерезису

При впливі слабого електричного поля переважають процеси оборотного зсуву (флуктуації) доменних границь, зв'язок між \bar{D} і \bar{E} має приблизно лінійний характер (ділянка OA). В області більш сильних полів (ділянка AB) зсув доменних границь має необоротний характер. При напруженості поля, що відповідає точці B, всі домени виявляються орієнтованими по полю - стан технічного насичення. В монокристалах такий стан відповідає однодоменній структурі. Подальше деяке зростання індукції в сегнетоелектрику обумовлено процесами індукованої (тобто електронної й іонної) поляризації.

Криву OAB називають основною кривою поляризації сегнетоелектрика. Якщо в поляризованому до насичення зразку зменшити напруженість поля до нуля, то індукція в нуль не повернеться, а прийме деяке залишкове значення D_r . При впливі полем протилежної полярності індукція швидко зменшується й при деякій напруженості поля змінює свій напрям. Подальше збільшення напруженості поля знову переводить зразок у стан технічного насичення (точка C). Таким чином, переполіаризація сегнетоелектрика в змінних полях супроводжується **діелектричним гістерезисом**. Напруженість поля E_c , при якій індукція проходить через нуль, називається **коерцитивною силою**.

Діелектричний гістерезис обумовлений необоротним зсувом доменних границь під дією поля. Площа гістерезисної петлі

пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Внаслідок втрат на гістерезис сегнетоелектрики характеризуються досить великими діелектричними втратами, у типових випадках $\text{tg } \delta \approx 0,1$.

Статична діелектрична проникність $\epsilon_{ст}$ визначається по основній кривій поляризації сегнетоелектрика:

$$\epsilon_{ст} = \frac{D}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \approx \frac{P}{\epsilon_0 E}.$$

Реверсивна діелектрична проникність ϵ_r характеризує зміну поляризації сегнетоелектрика в змінному електричному полі при одночасному впливі постійного поля.

Ефективну діелектричну проникність $\epsilon_{эф}$, як і ефективну ємність конденсатора, визначають за діючим значенням струму I (несинусоїдального), що проходить у ланцюзі з нелінійним елементом при заданій діючій напрузі U з кутовою частотою ω :

$$\epsilon_{эф} = \frac{I}{\omega U}.$$

Діелектричну проникність, вимірювану в дуже слабких електричних полях, називають **початковою**.

Специфічні властивості сегнетоелектриків проявляються лише в певному діапазоні температур. У процесі нагрівання вище деякої температури відбувається розпад доменної структури й сегнетоелектрик переходить у параелектричний стан. Температуру T_K такого фазового переходу називають **сегнетоелектричною точкою Кюрі**. У точці Кюрі спонтанна поляризованість зникає, а діелектрична проникність досягає свого максимального значення. Перехід сегнетоелектрика в параелектричний стан супроводжується різким зменшенням $\text{tg} \delta$, оскільки зникають втрати на гістерезис.

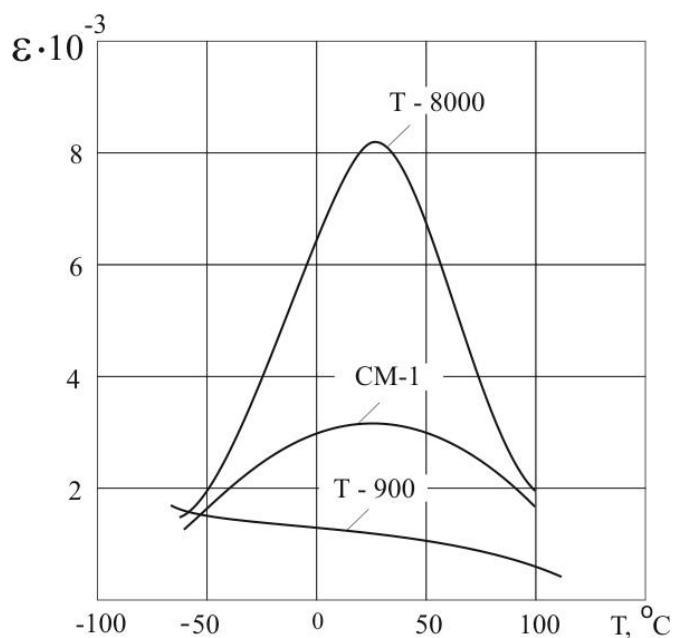
В деяких кристалах електричні моменти сусідніх елементарних комірок орієнтовані у взаємно протилежних напрямках. Такі речовини з антипаралельними електричними моментами називають **антисегнетоелектриками**. Вони також мають доменну будову, однак спонтанна поляризованість кожного домена дорівнює нулю. У параелектричному стані (тобто вище температури Кюрі) антисегнетоелектрики можуть мати високу діелектричну проникність. Прикладами антисегнетоелектриків є цирконат свинцю (PbZrO_3), ніобат натрію NaNbO_3 , дигідрофосфат амонію ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).

Основні напрямки технічного застосування сегнетоелектриків:

- 1) виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю;
- 2) використання матеріалів з великою нелінійністю поляризації для діелектричних підсилювачів, модуляторів і інших керованих пристроїв;
- 3) використання сегнетоелементів у лічильно-обчислювальній техніці як комірки пам'яті;
- 4) використання кристалів сегнето- і антисегнетоелектриків для модуляції й перетворення лазерного випромінювання;
- 5) виготовлення п'єзоелектричних і піроелектричних перетворювачів.

Конденсаторна сегнетокераміка повинна мати найбільшу величину діелектричної проникності з малою залежністю від температури, незначні втрати, найменшу залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ від напруженості електричного поля, високі значення питомого об'ємного й поверхневого опорів і електричної міцності.

Приклади найбільш використовуваних видів конденсаторної сегнетокераміки наведені на рис.4.15.



T-900 - матеріал зі слабо вираженою залежністю $\epsilon(T)$; CM-1 - матеріал зі згладженою залежністю $\epsilon(T)$; T-8000 - матеріал з максимальним значенням ϵ

Рисунок 4.15 - Залежність діелектричної проникності ϵ конденсаторних сегнетокерамічних матеріалів від температури

Матеріали для варікондів мають різко виражені нелінійні властивості; застосовуються для виготовлення нелінійних конденсаторів – варікондів. Основною кристалічною фазою в таких матеріалах є тверді розчини системи $Ba(Ti,Sn)O_3$ або $Pb(Ti,Zr,Sn)O_3$.

Сегнетоелектрики із ППГ. Для запам'ятовувальних пристроїв необхідний матеріал з можливо більш прямокутною петлею гістерезису (ППГ), що характерно для монокристалів (наприклад, **тригліцинсульфату**). За відсутністю зовнішнього поля сегнетоелектрик із ППГ має два стійких стани, що відповідають різним напрямкам залишкової електричної індукції. Один із цих станів у запам'ятовувальній комірці означає зберігання одиниці, а інший - зберігання нуля. Подаючи зовнішню напругу різної полярності, сегнетоелектрик можна переводити з одного стану в інший. На цьому засновані запис, зчитування й стирання інформації. Зчитування інформації можна здійснити без її руйнування, наприклад, оптичним методом або виміром опору тонкої напівпровідникової плівки, нанесеної на поверхні сегнетоелектрика.

Електрооптичні кристали. Кристали деяких сегнето- і антисегнетоелектриків мають сильно виражений електрооптичний ефект, під яким розуміють зміну показника переломлення світла в середовищі, викликану зовнішнім статичним електричним полем.

Електрооптичні властивості сегнетоелектричних кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання. Дія такого модулятора ґрунтується на залежності площини поляризації світлового променя, що проходить через кристал, від напруженості електричного поля, прикладеного до кристала.

Різноманітні конструкції електрооптичних модуляторів світла створені на базі кристалів **ніобату літію** ($LiNbO_3$), **дігдрофосфату калію** (KH_2PO_4) і його дейтерієвого аналога KD_2PO_4 (дідейтерофосфат калію). Досить перспективне застосування в якості електрооптичного матеріалу прозорої сегнетокераміки системи ЦТСЛ - тверді розчини цирконату-титанату свинцю з окисом лантану.

У сегнетоелектриках електрооптичний ефект підсилюється з наближенням до точки фазового переходу (точки Кюрі). Це дає можливість досягнення ефективної модуляції світла невеликими напругами, якщо підтримувати температуру кристала поблизу точки Кюрі.

Матеріали нелінійної оптики. При впливі потужних світлових пучків, створюваних за допомогою лазерів, у багатьох сегнето- і

антисегнетоелектриках проявляється нелінійна поляризація середовища, тобто залежність показника переломлення від напруженості поля самої світлової хвилі. Нелінійність оптичних властивостей дозволяє здійснити генерацію гармонік лазерного випромінювання, змішування й перетворення частот оптичних сигналів, перетворення інфрачервоного випромінювання лазерів (звичайно з $\lambda=1,06$ мкм) у видиме світло. Високу ефективність такого перетворення забезпечують кристали KN_2PO_4 , LiNbO_3 , LiIO_3 (йодат літію), $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ і ін.

4.12.2 П'єзоелектрики

До п'єзоелектриків відносять діелектрики, які мають сильно виражений п'єзоелектричний ефект.

Прямим п'єзоелектричним ефектом називають явище поляризації діелектрика під дією механічних напруг. Це явище було відкрито братами Кюрі в 1880 р. Виникаючий на кожній з поверхонь діелектрика електричний заряд змінюється за лінійним законом залежно від механічних зусиль (рис. 4.16,а):

$$Q = d \cdot F; Q/S = d \cdot F/S = q_s = P = d \cdot \sigma, \quad (4.5)$$

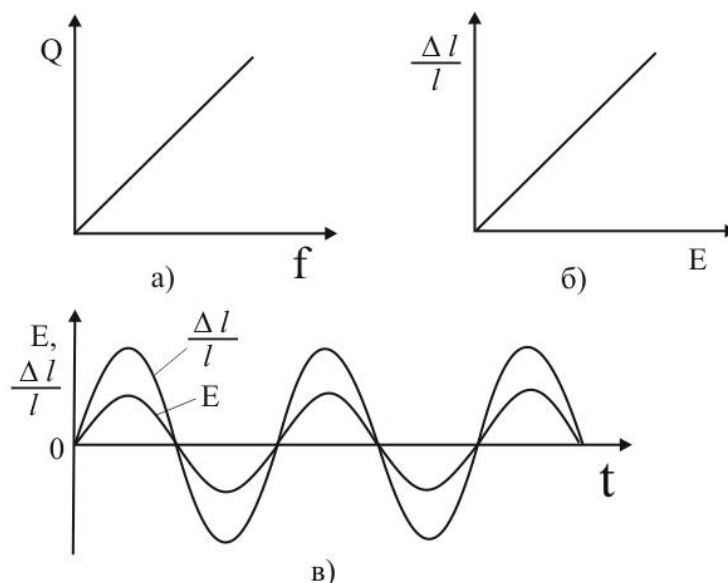
де Q – заряд, Кл; d – п'єзомодуль, Кл/Н; F – сила, Н; S – площа, м^2 ; q_s – заряд, що доводиться на одиницю площі, Кл/ м^2 ; P – поляризованість, Кл/ м^2 ; σ – механічна напруга в перетині діелектрика, Н/ м^2 .

П'єзомодуль d чисельно дорівнює заряду, що виникає на одиниці поверхні п'єзоелектрика при прикладенні до нього одиниці тиску. Значення п'єзомодуля використовуваних у практиці п'єзоелектриків $\approx 10^{-10}$ Кл/Н.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті відбувається зміна розмірів діелектрика $\Delta l/l$ залежно від напруженості електричного поля E за лінійним законом (рис. 4.16,б):

$$\Delta l/l = \delta = d \cdot E, \quad (4.6)$$

де δ - відносна деформація.



а – залежність електричного заряду від прикладеної механічної напруги; б - залежність розмірів діелектрика $\Delta l/l$ від напруженості електричного поля E ; в – деформації п'єзоелектрика під дією синусоїдального електричного поля

Рисунок 4.16 - Закономірності при п'єзоелектричному ефекті в діелектриках

В термодинаміці доводиться, що п'єзомодулі d прямого й зворотного п'єзо ефектів для того самого матеріалу рівні між собою.

Рівняння (4.5) і (4.6) мають лише якісний характер. Реально механічна напруга є тензором другого рангу, що має у загальному випадку шість незалежних компонентів. П'єзомодуль, що встановлює зв'язок між вектором поляризації й механічною напругою, є тензором третього рангу. Він має 18 незалежних компонентів.

Деформація п'єзоелектрика залежить від напрямку електричного поля й змінює знак при зміні напрямку поля. На рис. 4.16,в показано, що при прикладенні до п'єзоелектрика синусоїдального електричного поля в нього виникають синусоїдальні деформації тієї ж частоти.

Відомо більше тисячі речовин, що мають п'єзоелектричні властивості, у тому числі – всі сегнетоелектрики. Однак практичне застосування в п'єзотехніці знаходить переважно монокристалічний **β -кварц** - одна з модифікацій двоокису кремнію, стійка до температури $573\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вище цієї температури змінюється тип структури, і п'єзовластивості зникають.

Плоскопаралельна полірована кварцова пластинка з електродами й тримачем є п'єзоелектричним резонатором, тобто коливальним

контуром з певною резонансною частотою коливань. Перевагами кварцових резонаторів є малий $\text{tg}\delta$ і висока механічна добротність $Q \sim 10^6 \dots 10^7$ (тобто дуже слабкі механічні втрати). Це забезпечує високу частотну вибірковість кварцових резонаторів. Якщо в такому резонаторі збудити коливання на резонансній частоті, то їхнє загасання буде відбуватися протягом тривалого часу. Кварцовий п'єзоелемент, поставлений у вхідний ланцюг електричного генератора, нав'язує йому власну резонансну частоту.

Завдяки високій добротності кварцові резонатори використовуються як фільтри з високою виборчою здатністю, а також для стабілізації й еталонування частоти генераторів (наприклад, у радіолокаційних станціях, в електронних годинниках і т.п.).

Через обмежені запаси природного кварцу основні потреби п'єзотехніки задовольняються кристалами, штучно вирощуваними за гідротермальним методом.

Крім кварцу в різних п'єзоперетворювачах застосовують кристали **сульфату літію** $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, **сегнетової солі**, **дігідрофосфату амонію**, а також **ніобату** LiNbO_3 і **танталату літію** LiTaO_3 . Останні перевершують кварц за добротністю в діапазоні високих і надвисоких частот.

Найбільш широке застосування як п'єзоелектричний матеріал знаходить **поляризована сегнетоелектрична кераміка**. За своїми властивостями поляризований сегнетокерамічний зразок близький до однодоменого кристала, тобто має високу п'єзоактивність. Сегнетокераміку, призначену для використання в п'єзоелектричних перетворювачах, називають **п'єзокерамікою**.

П'єзокераміка має перед монокристалами ту перевагу, що з неї можна виготовити активний елемент практично будь-якого розміру й будь-якої форми (наприклад, порожній циліндр, що є частиною гідролокатора). Основним матеріалом для виготовлення п'єзокерамічних елементів є тверді розчини $\text{PbZrO}_3\text{--PbTiO}_3$ (**цирконат-титанат свинцю** - ЦТС). Ця кераміка широко використовується для створення потужних ультразвукових випромінювачів у широкому діапазоні частот для цілей гідроакустики, дефектоскопії, механічної обробки матеріалів. Такі ультразвукові генератори застосовуються також у хімічній промисловості для прискорення різних процесів і в напівпровідниковій технології для ефективного відмивання й знежирення напівпровідникових пластин за допомогою

ультразвукової ванни. З п'єзокераміки виробляють малогабаритні мікрофони, телефони, гучномовці (високочастотні), слухові апарати, детонатори (для зброї), різні пристрої підпалювання в газових системах. П'єзокерамічні елементи можна використати як датчики тисків, деформацій, прискорень і вібрацій. Подвійне перетворення енергії (електричної в механічну й навпаки) покладено в основу роботи п'єзорезонансних фільтрів, ліній затримки й п'єзотрансформаторів.

Крім кераміки ЦТС для виготовлення різних п'єзоелектричних перетворювачів застосовують керамічні матеріали на основі твердих розчинів $\text{BaNb}_2\text{O}_6\text{--PbNb}_2\text{O}_6$ і $\text{NaNbO}_3\text{--KNbO}_3$. Останні розроблені спеціально для високочастотних перетворювачів (10...40 МГц).

4.12.3 Піроелектрики

Піроелектричним ефектом називають зміну спонтанної поляризованості діелектриків при зміні температури.

Рівняння піроелектричного ефекту записують у вигляді $-d\bar{P}_{cn} = \bar{p} \cdot dT$, де \bar{P}_{cn} – вектор спонтанної поляризованості діелектрика, Кл/м²; \bar{p} – вектор піроелектричного коефіцієнта, Кл/(м²·К).

При незмінній температурі спонтанний електричний момент діелектрика скомпенсований вільними зарядами протилежного знака за рахунок процесів електропровідності або адсорбції заряджених частинок з навколишньої атмосфери. Зміна спонтанної поляризованості супроводжується звільненням деякого заряду на поверхні діелектрика, завдяки чому в замкнутому ланцюзі виникає електричний струм.

Якість піроелектричного матеріалу характеризують параметром $R_v = p/(\epsilon C)$, де ϵ - діелектрична проникність; C - питома об'ємна теплоємність, Дж/(К·м³). Чим більше значення R_v , тим більшу різницю потенціалів можна одержати на зразку при одній і тій самій потужності, що поглинається.

Піроелектричні властивості мають деякі лінійні діелектрики (наприклад, **турмалін, сульфат літію**) і всі сегнетоелектричні матеріали. Особливість лінійних піроелектриків полягає в тому, що в них, на відміну від сегнетоелектриків, напрямок спонтанної поляризованості не може змінюватися за допомогою зовнішнього електричного поля.

Сегнетоелектрики проявляють піроелектричні властивості тільки в монодоменизованому стані, тобто при однаковій орієнтації спонтанної поляризованості всіх доменів. У полідоменизованому зразку сумарна поляризованість дорівнює нулю, і тому піроефект відсутній. Монодоменизація сегнетоелектрика здійснюється шляхом витримки його в постійному електричному полі при температурі трохи нижче точки Кюрі.

Значний піроефект у сегнетоелектриках використовується для створення теплових датчиків і приймачів променистої енергії, призначених, зокрема, для реєстрації інфрачервоного й НВЧ випромінювання. Специфічною властивістю таких теплових фотоприймачів є відсутність вибіркості по спектрі випромінювання. Істотна перевага їх полягає в тому, що вони не вимагають охолодження при детектуванні випромінювання навіть у далекій інфрачервоній області спектра. Поряд із цим вони мають досить високу швидкодію (здатні працювати в частотному інтервалі до 10 МГц), однак за чутливістю уступають напівпровідниковим фотоприймачам.

Максимальні значення піроелектричних коефіцієнтів мають сегнетоелектрики із точкою Кюрі, близькою до кімнатної температури: кристали **ніобату барію-стронцію** ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$), у яких $\rho = (4 \dots 28) \cdot 10^{-4}$ Кл/(м²·К). Однак через їхню високу діелектричну проникність чутливість по напрузі R_v виявляється незначною.

Найбільш високі значення R_v ($8,5 \cdot 10^{-12}$ м/В) мають кристали **тригліцинсульфату** (ТГС). Цей матеріал широко використовується в низькочастотних детекторах випромінювання. Недоліком ТГС є його гігроскопічність, що обумовлює необхідність його спеціальної герметизації в практичних пристроях.

Підвищеною чутливістю на високих частотах характеризуються кристали LiNbO_3 і LiTaO_3 , що відрізняються стабільністю піроелектричних властивостей. Завдяки високій температурі Кюрі вони не вимагають спеціальних прийомів закріплення монодоменизованого стану й можуть стійко працювати до температур порядку 500 °С.

Піроелектричний ефект проявляється й у поляризованій сегнетокераміці, хоча її піроелектричні властивості помітно гірші, ніж у монокристалів. Для виготовлення фотоприймачів можна використовувати всі види п'єзокераміки, однак найбільш придатним матеріалом для цих цілей є кераміка ЦТСЛ.

Піро- і п'єзоелектричні властивості виявлені в деяких полімерів, зокрема, у поляризованих плівок **полівінілденфториду** й **полівінілденхлориду**. Вони характеризуються простотою технології, невисокою вартістю, малою інерційністю піроефекта на високих частотах.

4.12.4 Електрети

Електретом називають тіло з діелектрика, що довгостроково зберігає поляризацію й електричне поле, яке воно створює в навколишнім просторі, тобто електрет є формальним електричним аналогом постійного магніту.

Електрети, що виготовляють з охолодженого в сильному електричному полі розплаву полярних діелектриків (наприклад, пальмового воску й каніфолі) називають **термоелектретами**. Термоелектрети здатні створювати електричне поле в навколишньому просторі протягом багатьох місяців і навіть років.

Фотоелектрети виготовляються з матеріалів, що мають фотоелектропровідність (сірка, сульфід кадмію й ін.), при одночасному впливі світла й електричного поля. Фотоелектрети можуть довгостроково зберігати заряди в темряві й швидко розряджаються на світлі.

Електроелектрети утворюються при впливі на діелектрик тільки електричного поля без нагрівання або опромінення. Поверхнева густина зарядів може становити $10^{-6} \dots 10^{-4}$ Кл/м², а час життя - десятки років.

Найбільше практичне застосування знаходять електрети на основі полімерних плівок (політетрафторетилен, полікарбонат і ін.). В умовах підвищеної вологості найбільш стабільними є електрети з політетрафторетилена. У перетворювачах звичайно застосовують полімерні плівки товщиною 3...20 мкм, металізовані з однієї сторони.

Електрети можуть бути використані для виготовлення мікрофонів і телефонів, виміру механічних вібрацій, як пиловловлювачі, для дозиметрів радіації, вимірників атмосферного тиску й вологості, електрометрів, у клавішних обчислювальних машинах, в електрофотографії, в медичних сенсорах і т. д.

4.12.5 Рідкі кристали

Рідкими кристалами називають такі речовини, які перебувають у проміжному (мезоморфному) стані між ізотропною рідиною й твердим кристалічним тілом. З одного боку, вони мають плинність, здатність перебувати в краплевидному стані, а з іншого боку - для них характерна анізотропія властивостей, насамперед, оптична анізотропія. Сильна залежність властивостей рідких кристалів від зовнішніх факторів (температури, тиску, електричного поля й ін.) використовується при розробці індикаторних пристроїв.

Рідиннокристалічний стан утворюють в основному органічні сполуки, наприклад, сполуки ароматичного ряду, молекули яких містять бензольні кільця.

Якщо плоский шар рідкого кристала освітлювати білим світлом, то у відбитому світлі він буде здаватися забарвленим, причому колір може змінюватися залежно від кута спостереження.

При зміні температури змінюється відстань між молекулярними шарами рідкого кристала, відповідно змінюється довжина хвилі λ_0 максимального розсіювання при заданому куті спостереження. В результаті виходить колірний термометр, що знайшов різні застосування. Зміну кольорів текстури при зміні температури називають **термохромним ефектом**.

За допомогою деяких рідиннокристалічних індикаторів можна зареєструвати зміни температури в тисячні частки градуса. Колірні термоіндикатори з успіхом застосовуються для цілей технічної й медичної діагностики. Вони дозволяють дуже просто відтворити картину теплового поля у вигляді кольорової діаграми. Цей же принцип використовується для візуалізації інфрачервоного випромінювання й полів НВЧ.

Для управління світловим променем і для візуального відображення інформації використовують електрооптичні ефекти в деяких рідких кристалах. Як і в сегнетоелектриках, весь об'єм такого рідкого кристала розбивається на невеликі домени, що розрізняються напрямком переважної орієнтації, внаслідок чого виникає оптична неоднорідність середовища й спостерігається сильне розсіювання світла. Такий рідкий кристал у відбитому й проходячому світлі виглядає мутним.

За електричними властивостями багато з рідких кристалів є полярними діелектриками з невисоким питомим опором ($\rho =$

$10^6 \dots 10^{10}$ Ом·м), значення якого можна легко регулювати розчиненням дисоціюючих іонних сполук.

Властивості рідких кристалів використовуються в електрооптичних комірках для управління світловим потоком, для створення пристроїв відображення інформації

Для створення кольорових зображень у рідкі кристали вводять молекули барвника, спектр поглинання яких є функцією їхньої орієнтації щодо напрямку поляризації падаючого світла. Зовнішнє поле змінює статичну орієнтацію молекул, відповідно змінюється спектр поглинання лінійно поляризованого світла й обумовлений їм колірний контраст електрооптичної комірки.

Індикаторні пристрої на рідких кристалах - це дисплеї, крупноформатні табло, цифрові індикатори для мікрокомп'ютерів, циферблати електронних годинників і цифрових вимірювальних приладів. Основними перевагами таких індикаторів є: а) хороший контраст при яскравому освітленні; б) низька споживана потужність; в) сумісність із інтегральними схемами за робочими параметрами і конструктивному виконанню; г) порівняльна простота виготовлення й низька вартість.

Перевагою рідких кристалів є те, що для індикації використовується навколишнє світло, завдяки чому їхня споживана потужність значно менше, ніж в інших індикаторних пристроях і становить $10^{-4} \dots 10^{-6}$ Вт/см². Це на кілька порядків нижче, ніж у світлодіодах, порошкових і плівкових електролюмінофорах, а також у газорозрядних індикаторах. Принциповими недоліками пристроїв на рідких кристалах є невисока швидкодія, а також схильність до процесів електро- і фотохімічного старіння.

4.12.6 Матеріали для твердотільних лазерів

Лазер (Light amplification by stimulated emission of radiation – laser) є джерелом оптичного когерентного випромінювання, що характеризується високою спрямованістю й великою густиною енергії.

В основі принципу дії лазерів лежить відкрите А. Ейнштейном явище змушеного (стимульованого) випромінювання. Воно полягає в практично одночасному випусценні погоджених за частотою й напрямком електромагнітних хвиль (фотонів) величезною кількістю атомів (або молекул) під дією зовнішнього електромагнітного поля.

Основними елементами лазерів на твердих діелектриках є активне середовище (робоче тіло), оптичний резонатор і система оптичного накачування. Активним середовищем служить кристалічна або скловидна матриця, у якій рівномірно розподілені активні іони (активатори люмінесценції).

Всі процеси поглинання й випромінювання світла пов'язані з переходами електронів між рівнями активного іона; при цьому матриця відіграє пасивну роль. Спектр випромінювання лазера в основному визначається типом активного іона - найчастіше тривалентними іонами Nd^{3+} (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Властивості матеріалів для твердотільних лазерів

Активний матеріал	Матриця	Активатор	Концентрація активатора, мол. %	λ генерації, мкм	Показник переломлення світла	К.к.д., %
Рубін	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Cr^{3+}	0,03...0,05	0,694	1,76	1
Ітрій-алюмінієвий гранат з неодимом	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Nd^{3+}	1...3	1,06	1,83	5...7
Алюмінат ітрію з неодимом	YAlO_3	Nd^{3+}	3	1,06	1,95	1
Натрій-лантан-молібдат з неодимом	$\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$	Nd^{3+}	2	1,06	1,82	2,5
Флюорит з діспрозієм	CaF_2	Dy^{2+}	0,02	2,36	1,42	2
Шеєліт з неодимом	CaWO_4	Nd^{3+}	2	1,06	1,92	1,7
Скло з неодимом	скло	Nd^{3+}	2...6	1,06	1,55	5...6

Незважаючи на те, що матриця не бере участь у процесах генерації коливань, багато фізичних властивостей активного середовища визначаються саме матрицею.

Одним з найбільш освоєних матеріалів лазерної техніки є **рубін** (табл. 4.3). Саме на рубіні в 1960 р. був створений перший твердотільний лазер.

Рубінами називають кристали α -корунду (Al_2O_3), у яких частина іонів алюмінію замінена іонами хрому - зі вмістом $\text{Cr}_2\text{O}_3 \approx 0,05$ мас. % (концентрація іонів хрому $1,6 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, рожеві рубіни), та більше 0,5 мас. % (червоний рубін). Чисті монокристали α -корунду оптично прозорі в діапазоні 0,17...6,5 мкм. Кристал рубіна має оптичну анізотропію, симетрія кристала - ромбоєдрична. Перевагами рубіна є високі механічна міцність і теплопровідність.

Штучні кристали рубіна звичайно вирощують у печах за методом Вернейля. Високоякісні кристали рубіна можуть бути виготовлені за методом витягування з розплаву або за гідротермальним методом.

Поряд з рубіном найважливішим матеріалом лазерної техніки є **ітрій-алюмінієвий гранат** (табл. 4.3), у кристалічній решітці якого частина іонів ітрію замінена іонами неодиму (скорочений запис ІАГ: Nd^{3+}). Низька гранична енергія збудження при кімнатній температурі, висока механічна міцність і висока теплопровідність дають можливість застосовувати цей матеріал у лазерах, що працюють у безперервному й високочастотному режимах. Досить важливі високі експлуатаційні характеристики ІАГ:Nd-лазерів - температурна й радіаційна стійкість. Кристали ІАГ оптично ізотропні й прозорі в спектральному діапазоні 0,2...4 мкм.

Основні переваги **стекла** (табл. 4.3), використовуваних у лазерах, перед монокристалами полягають у їхній високій технологічності, оптичній однорідності, ізотропності властивостей. Зі скла порівняно легко виготовити однорідні стрижні великого розміру, що необхідно для досягнення високої вихідної потужності лазерного випромінювання. Однак скла в порівнянні з монокристалами мають невисоку теплопровідність, що створює додаткові труднощі для здійснення безперервного режиму генерації. Тому лазери на склі краще підходять для генерації імпульсів з високою енергією випромінювання.

Подвійне перетворення енергії (електрика - світло - когерентне випромінювання) практично виключає досягнення високого

коефіцієнта корисної дії твердотільних лазерів, тим більше, що джерела накачування мають розмитий спектр і збудження активних іонів відбувається лише в невеликій частині цього спектра.

Лазери знаходять застосування в системах оптичної локації, у телебаченні, голографії, інформаційно-вимірювальній техніці, у медицині. З їхньою допомогою здійснюється далекий космічний зв'язок. Широко поширена лазерна обробка оптично непрозорих матеріалів: імпульсне зварювання, плавлення, паяння, відпал, свердлення отворів, різання й ін.

Питання для самоперевірки

1. Що називають поляризацією діелектрика? Які види поляризації можна вважати миттєвими, а які є вповільненими?

2. У чому полягає розходження між іонною й іонно-релаксаційною поляризаціями? Що розуміють під лінійними й нелінійними, полярними й неполярними діелектриками?

3. У яких одиницях вимірюють питомий об'ємний й питомий поверхневий опори діелектриків? Дайте визначення цим фізичним величинам.

5. Який механізм електропровідності твердих діелектриків? Як впливає температура на їхню питому провідність?

6. Що називають діелектричними втратами? Які механізми діелектричних втрат вам відомі?

7. У яких діелектриках і при яких умовах важливу роль відіграють втрати на іонізацію?

8. Чому ударна іонізація молекул газу в сильному електричному полі визначається головним чином електронами, а не іонами?

9. Які механізми пробою твердих діелектриків вам відомі? Які умови прояву кожного з них?

10. Яким чином можна класифікувати діелектрики за властивостями і технічному призначенню?

11. Чим розрізняються властивості лінійних і просторових полімерів?

12. Які полімери використовуються на високих частотах й чому?

13. Як і для яких цілей роблять вироби з композиційних пластмас?

14. Які види стекол знайшли найбільш широке застосування в електронній техніці й для яких цілей?

15. У чому подібність і розходження між ситалом і склом, для яких цілей ситали застосовуються?

16. Наведіть приклади установочних і конденсаторних керамічних діелектриків. Назвіть найбільш характерні області їхнього застосування.

17. Які діелектрики називають активними? У чому розходження вимог до активних і пасивних діелектриків?

18. Яка електрична впорядкованість властива сегнетоелектрикам?

19. Як пояснити діелектричний гістерезис і нелінійність залежності заряду від напруги в сегнетоелектриках?

20. Що називають сегнетоелектричною точкою Кюрі?

21. Назвіть найбільш важливі застосування сегнетоелектриків.

22. Що таке прямий і зворотний п'єзо ефект? У яких діелектриках можна спостерігати ці явища?

23. У чому переваги п'єзокераміки перед монокристалічними п'єзоелектриками?

24. Що таке піроелектричний ефект? Як застосовуються піроелектрики?

25. Що таке електрети? Як вони використовуються?

26. В чому розходження між рідкою речовиною й «рідким кристалом»?

27. Для яких цілей застосовуються рідкі кристали в електронній техніці?

28. Які основні вимоги ставлять до діелектрика як лазерного матеріала?

29. Які переваги та недоліки мають твердотільні лазери порівняно з напівпровідниковими?

Задачі

1. Нормально вектору напруженості однорідного електричного поля $E_0 = 100$ В/м розташована пластина ізотропного діелектрика з діелектричною проникністю $\epsilon = 2$. Визначити: а) напруженість поля E и електричний зсув (електричну індукцію) D всередині пластини; б) поляризованість діелектрика P й поверхневу густину зв'язаних зарядів σ .

Розв'язання

а) Середнє макроскопічне електричне поле E в діелектрику в ε раз менше зовнішнього: $E = 100/2 = 50$ В/м. Для більшості діелектриків поляризованість пропорційна напруженості поля:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon-1)E = 8,85 \cdot 10^{-12}(2-1) \cdot 50 = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

В ізотропних діелектриках вектори напруженості електричного поля й поляризованості збігаються за напрямком, а електричний зсув

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E + P = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 50 + 4,42 \cdot 10^{-10} = 8,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

б) Поляризованість однорідного плоского діелектрика в рівномірному електричному полі дорівнює поверхневій густині зв'язаних зарядів:

$$\sigma = P = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

2. При зміні температури від 60 до 127 °С питомий опір радіофарфору зменшується від $\rho_1 = 10^{13}$ Ом·м до $\rho_2 = 10^{11}$ Ом·м. Визначити температурний коефіцієнт питомого опору α_p , вважаючи його постійним у розглянутому діапазоні температур і питомий опір матеріалу при кімнатній температурі.

Розв'язання

Постійність температурного коефіцієнта питомого опору означає експоненційну залежність

$$\rho(T): \rho = a^\alpha \rho_0 / T.$$

$$\alpha_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{127 - 60} \ln \frac{10^{11}}{10^{13}} = -0,0687 \text{ К}^{-1};$$

$$\rho_2 = \rho_1 / e^{\alpha_p \Delta T} = 10^{13} / e^{-0,0687(60-20)} = 1,56 \cdot 10^{14} \text{ Ом·см.}$$

3. У дисковому керамічному конденсаторі ємністю $C = 100$ пФ, включеному на змінну напругу $U = 100$ В частотою $f = 1$ МГц, розсіюється потужність $P_a = 10^{-3}$ Вт. Визначити реактивну потужність, тангенс кута діелектричних втрат і добротність конденсатора.

4. За тих самих умов, що й у попереднім завданні, визначити питомі втрати в діелектрику, якщо його діелектрична проникність $\varepsilon = 150$, електрична міцність $E_{пр} = 10$ МВ/м і запас по електричній міцності $K = 10$.

Розв'язання

Питомі втрати: $p = P_a / (Sh)$, де S і h - площа обкладок і товщина діелектрика, відповідно. Товщину діелектрика знаходимо з умови забезпечення електричної міцності:

$$h = U \sqrt{2} K / E_{пр} = 100 \sqrt{2} \cdot 10 / (10 \cdot 10^6) = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Площа обкладок:

$$S = \frac{Ch}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}}{8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot 150 = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2,$$

$$p = 10^{-3} / (1,07 \cdot 10^{-5} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}) = 6,58 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3.$$

5. Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ неполярного діелектрика на частоті 50 Гц дорівнює 10^{-3} . Обчислити активну потужність розсіювання P_a у конденсаторі із цього діелектрика на частоті $f = 1$ кГц при напрузі 1 кВ, якщо ємність конденсатора C дорівнює 1000 пФ.

6. Визначити питомі діелектричні втрати в плоскому конденсаторі, виготовленому із плівки полістиролу товщиною 20 мкм, якщо на конденсатор подана напруга 2 В частотою 2 МГц (для полістиролу $\epsilon = 2,5$; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$).

7. Плівка полівінілхлориду при електричному пробі руйнується при напрузі 1,5 кВ. Визначити товщину плівки, якщо її електрична міцність дорівнює 50 МВ/м.

8. Як і чому зміниться пробивна напруга повітря при нормальному атмосферному тиску, якщо температуру підвищити від 20 до 100 °С?

Розв'язання

Відомо, що пробивна напруга повітря поблизу нормального атмосферного тиску ($p_0 = 0,1$ МПа) $U_{пр} = U_{пр0} \cdot \delta$, де $U_{пр0}$ - пробивна напруга в нормальних умовах ($p = 0,1$ МПа; $T_0 = 293$ К).

З іншого боку, з рівняння Менделєєва - Клапейрона випливає:

$$p = \frac{m}{M}, \text{ звідки } \frac{m}{V} = d = \frac{pM}{RT}, \text{ де } m - \text{ маса; } M - \text{ молярна маса;}$$

R - універсальна газова константа.

Зміна відносної густини газу $\delta = d_1/d_0 = T_0/T_1 = 293/373 = 0,785$, тобто якщо підвищити температуру від 293 до 373К, то при нормальному атмосферному тиску пробивна напруга повітря зменшиться в 1,27 рази.

5 Магнітні матеріали

5.1 Класифікація речовин за магнітними властивостями

Будь-яка речовина, будучи поміщеною у магнітне поле, здобуває деякий магнітний момент \bar{M} . Магнітний момент одиниці об'єму J_M речовини називають **намагніченістю** $\bar{J}_M = \bar{M}/V$, де V - об'єм, m^3 .

При нерівномірному намагнічуванні тіла $\bar{J}_M = d\bar{M}/dV$.

Намагніченість є векторною величиною; в ізотропних тілах вона спрямована або паралельно, або антипаралельно напруженості магнітного поля \bar{H} . Намагніченість виражається в одиницях напруженості магнітного поля (А/м) і пов'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням $\bar{J}_M = \chi_M \cdot \bar{H}$, де χ_M – безрозмірна величина, що характеризує здатність даної речовини намагнічуватися в магнітному полі й називана **магнітною сприйнятливістю**. Магнітна сприйнятливість чисельно дорівнює намагніченості при одиничній напруженості поля. Крім об'ємної магнітної сприйнятливості χ_M іноді використовують поняття питомої й молярної магнітних сприйнятливостей, які відносять відповідно до одиниці маси або до моля речовини.

Намагнічене тіло, що перебуває в зовнішнім полі, створює власне магнітне поле, що в ізотропних матеріалах спрямовано паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. Тому сумарна магнітна індукція \bar{B} в речовині визначається алгебраїчною сумою індукції зовнішнього й власного полів:

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_i = \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \bar{J}_M, \quad (5.2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна.

З (5.1) і (5.2) знаходимо

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} (1 + \chi_M) = \mu_0 \mu \bar{H} \quad (5.3)$$

де $\mu = 1 + \chi_M$ – **відносна магнітна проникність**, що показує у скільки разів магнітна індукція \bar{B} поля в даному середовищі більше, ніж магнітна індукція \bar{B}_0 у вакуумі.

Першопричиною магнітних властивостей речовини є внутрішні приховані форми руху електричних зарядів, які є елементарними

круговими струмами, що мають магнітні моменти. Такими струмами є електронні спини й орбітальне обертання електронів в атомах. Магнітні моменти протонів і нейтронів приблизно в тисячу разів менші за магнітний момент електрона. Тому магнітні властивості атома визначаються цілком електронами, а магнітним моментом ядра можна знехтувати.

За реакцією на зовнішнє магнітне поле й характером внутрішнього магнітного впорядкування всі речовини в природі можна підрозділити на п'ять груп: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики й феримагнетики.

До **діамагнетиків** відносять речовини, у яких магнітна сприйнятливість негативна й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнетизм обумовлений невеликою зміною кутової швидкості орбітального обертання електронів при внесенні атома в магнітне поле. Діамагнітний ефект є проявом закону електромагнітної індукції на атомному рівні.

До діамагнетиків належать інертні гази, водень, азот, багато рідин (вода, нафта і її похідні), ряд металів (мідь, срібло, золото, цинк, ртуть, галій і ін.), більшість напівпровідників (кремній, германій, сполуки $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$) і органічних сполук, лужно-галоїдні кристали, неорганічні стекла й ін. Діамагнетиками є всі речовини з ковалентним хімічним зв'язком і речовини в надпровідному стані. Чисельне значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків становить $-(10^{-6} \dots 10^{-7})$ Оскільки діамагнетики намагнічуються проти напрямку поля, для них $\mu < 1$. Однак відносна магнітна проникність дуже незначно відрізняється від одиниці (за винятком надпровідників). Магнітна сприйнятливість діамагнетиків дуже слабо змінюється з температурою, тому що діамагнітний ефект обумовлений внутрішньоатомними процесами, на які тепловий рух частинок не впливає. Зовнішнім проявом діамагнетизму є виштовхування діамагнетиків з неоднорідного магнітного поля.

До **парамагнетиків** відносять речовини з позитивною магнітною сприйнятливістю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках атоми мають елементарний магнітний момент навіть при відсутності зовнішнього поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, тому намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле утворює переважну орієнтацію магнітних моментів атомів в одному напрямку. Теплова енергія протидіє

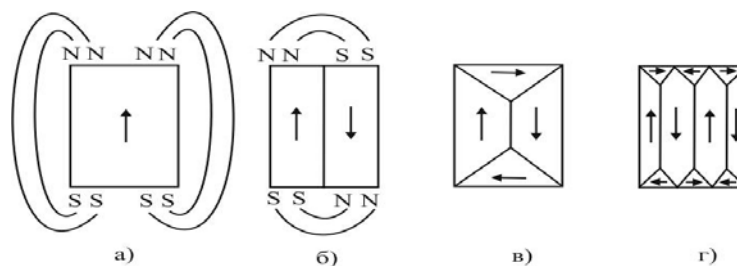
створенню магнітної впорядкованості. Тому парамагнітна сприйнятливість сильно залежить від температури.

При кімнатній температурі магнітна сприйнятливість парамагнетиків дорівнює $10^{-3} \dots 10^{-6}$. Тому їхня магнітна проникність незначно відрізняється від одиниці. Завдяки позитивній намагніченості парамагнетики, поміщені в неоднорідне магнітне поле, втягуються в нього. У дуже сильних полях і при низьких температурах у парамагнетиках може наступати стан магнітного насичення, при якому всі елементарні магнітні моменти орієнтуються паралельно вектору \vec{H} .

Парамагнетиками є кисень, окис азоту, лужні й луго-земельні метали, деякі перехідні метали, солі заліза, кобальту, нікелю й рідкоземельних елементів. Парамагнітний ефект за фізичною природою багато в чому аналогічний дипольно-релаксаційній поляризації діелектриків.

Феромагнетиками є речовини з великою позитивною магнітною сприйнятливістю (до 10^6), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Феромагнетикам властива внутрішня магнітна впорядкованість, що виражається в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів – **магнітних доменів**.

Однодоменний стан енергетично не вигідний, тому що в цьому випадку на кінцях феромагнетика виникають магнітні полюси, що створюють зовнішнє магнітне поле, яке має певну потенційну енергію (рис. 5.1,а). Однодоменну структуру можна розглядати як сукупність декількох магнітів, що стикаються однойменними полюсами.



а – однодоменна; б – дводоменна; в, г - багатодоменні

Рисунок 5.1 - Різні доменні структури феромагнетиків

Кристали малих розмірів можуть складатися з одного домена (утворення границі енергетично не вигідно). Лінійні розміри доменів

$\sim 10^{-1} \dots 10^{-4}$ мм. У межах доменної границі, що розділяє два домена, намагнічені в протилежних напрямках, відбувається плавна зміна орієнтації спинів.

Найважливіша особливість феромагнетиків - їхня здатність намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

З елементарних речовин феромагнетиками є залізо, кобальт, нікель, а також шість рідкоземельних елементів: гадоліній, диспрозій, гольмій, ербій, тербій і тулій. Рідкоземельні елементи проявляють феромагнітні властивості при знижених температурах. Феромагнетиками є багато сплавів на основі магнітних елементів, а також сплави магнітних елементів з немагнітними. Феромагнітні властивості виявлені в деяких сплавах, що складаються цілком з немагнітних елементів – так називані сплави Гейслера (наприклад, Cu_2MnAl).

Антиферомагнетиками є речовини, у яких нижче деякої температури спонтанно виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічної решітки. Для антиферомагнетиків характерна невелика позитивна магнітна сприйнятливність ($\chi_m = 10^{-3} \dots 10^{-5}$), яка сильно залежить від температури. При нагріванні в антиферомагнетику відбувається фазовий перехід у парамагнітний стан. Температура такого переходу, при якій зникає магнітна впорядкованість, називається точкою Нееля (або антиферомагнітною точкою Кюрі).

Антиферомагнетизм виявлений у хрому, марганцю й ряду рідкоземельних елементів (Ce, Nd, Sm і ін.). Типовими антиферомагнетиками є найпростіші хімічні сполуки на основі металів перехідної групи типу окислів, галогенідів, сульфідів, карбонатів і т.п. Усього відомо біля тисячі сполук із властивостями антиферомагнетиків.

Феримагнетиками є речовини, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферомагнетизмом. Подібно феромагнетикам вони мають високу магнітну сприйнятливність, що істотно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Поряд із цим феримагнетики характеризуються й рядом істотних відмінностей від феромагнітних матеріалів.

Феримагнетики дістали свою назву від феритів, під якими розуміють хімічні сполуки окису заліза Fe_2O_3 з окислами інших металів. Властивості феримагнетиків мають деякі впорядковані

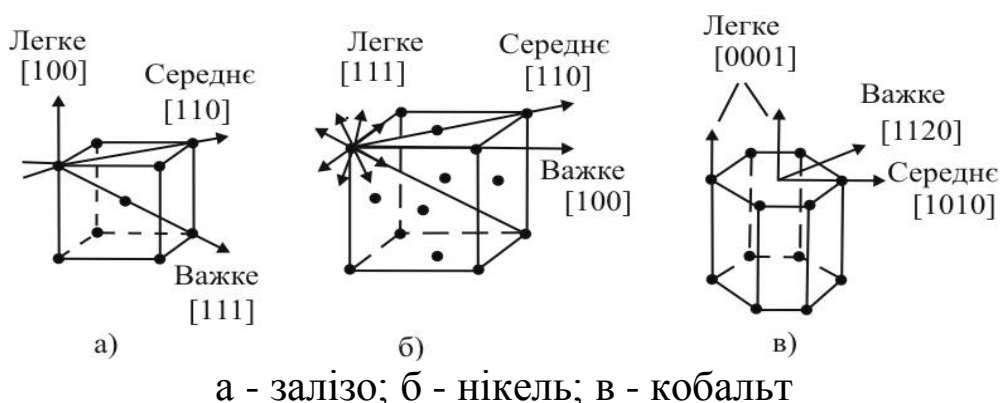
металеві сплави, але, головним чином, - різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес представляють ферити.

Від парамагнетиків ферити відрізняються нелінійними магнітними властивостями й високою магнітною сприйнятливістю, що є наслідком їхньої доменної будови, а в порівнянні з феромагнетиками ферити мають істотно меншу індукцію насичення.

Діа-, пара- і антиферомагнетики можна об'єднати в групу слабкомагнітних речовин, тоді як феро- і феримагнетики є сильномагнітними матеріалами.

5.2 Процеси при намагнічуванні феро- і феримагнетиків

Магнітна анізотропія. У монокристалах феро- і феримагнітних речовин існують напрямки легкого й важкого намагнічування. Число таких напрямків визначається симетрією кристалічної решітки. При відсутності зовнішнього поля магнітні моменти доменів спонтанно орієнтуються вздовж однієї з осей легкого намагнічування (рис. 5.2)



а - залізо; б - нікель; в - кобальт

Рисунок 5.2 - Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалах феромагнетиків

У монокристалі заліза (рис. 5.2,а), що має структуру об'ємноцентрованого куба, можна виділити шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування типу [100]. Напрямок просторової діагоналі куба [111] відповідає напрямку важкого намагнічування.

У нікелю, що має структуру гранецентрованого куба, 8 еквівалентних напрямків по діагоналям [111], навпаки, є напрямками легкого намагнічування (рис. 5.2,б). Кобальт, що кристалізується в гексагональній структурі (рис. 5.2,в), має лише два напрямки легкого намагнічування, тобто магнітні моменти доменів при відсутності

зовнішнього поля можуть бути орієнтовані лише у двох антипаралельних напрямках.

Крива намагнічування. Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають кривою намагнічування (рис. 5.3).

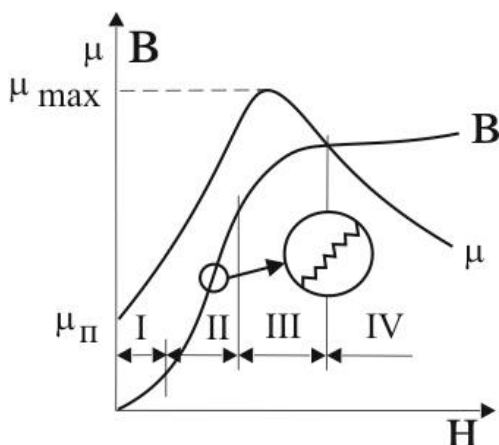


Рисунок 5.3 - Залежність магнітної індукції B и магнітної проникності μ феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля H

За вихідний приймають розмагнічений стан зразка, коли за відсутності зовнішнього поля індукція $B = 0$ внаслідок рівномірного розподілу магнітних моментів доменів по всіх можливих напрямках легкого намагнічування. Розмагнічування феромагнетика здійснюють шляхом впливу на нього змінним магнітним полем, амплітуду напруженості якого поступово зменшують до нуля.

Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів. На ділянці I відбувається оборотний (пружний) зсув доменних границь. Об'єм тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля, збільшується і, навпаки, зменшуються розміри доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. В разі зняття слабкого поля доменні границі повертаються в колишнє положення; залишкова намагніченість у зразку не виникає. При більш сильних полях (область II) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний, характер, а крива намагнічування має найбільшу крутизну. У міру подальшого збільшення напруженості магнітного поля зростає роль механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямком легкого намагнічування, що утворює невеликий

кут з полем, поступово повертаються в напрямку поля, тобто в напрямку більш важкого намагнічування (область III). Коли всі магнітні моменти доменів вже орієнтовані вздовж поля, відбувається технічне насичення намагніченості (область IV). Незначне зростання індукції на ділянці насичення обумовлено складовою рівняння (5.2) $\mu_0 \bar{H}$, а також «істинним намагнічуванням», тобто збільшенням намагніченості самого домена. На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок процесів зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів часто називають технічним намагнічуванням феромагнетика. Основні стадії технічного намагнічування схематично показані на рис. 5.4.

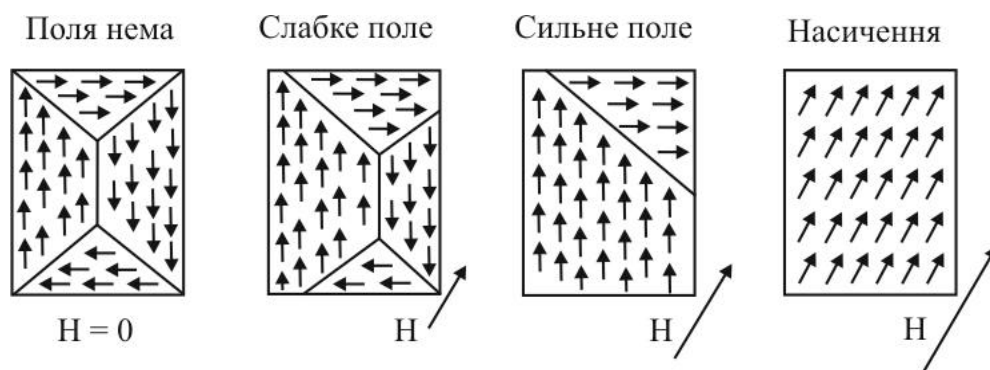


Рисунок 5.4 - Схема орієнтації спинів у доменах феромагнетика

Магнітний гістерезис. Якщо феромагнетик намагнітити до насичення B_s , а потім відключити зовнішнє поле, то індукція в нуль не повернеться, а буде мати деяке значення B_r , називане залишковою індукцією (рис. 5.5).

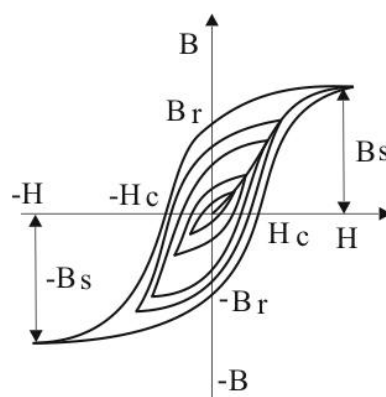


Рисунок 5.5 - Петлі гістерезису при різних значеннях амплітуди змінного магнітного поля й основна крива намагнічування феромагнетика

Щоб позбутися залишкової індукції, необхідно прикласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість

розмагнічуючого поля $-H_c$, при якій індукція у феромагнетика, попередньо намагніченому до насичення, повертається в нуль, називають **коерцитивною силою**.

Збільшення напруженості поля до значень, більших $-H_c$, викликає перемагнічування феромагнетика аж до насичення ($-B_s$). Таким чином, зміна магнітного стану феромагнетика при його циклічному перемагнічуванні характеризується явищем **гістерезису**, тобто відставання індукції від напруженості поля. Магнітний гістерезис обумовлений необоротними процесами намагнічування. Для різних амплітудних значень напруженості зовнішнього поля можна одержати сімейство петель гістерезису. Петлю гістерезису, отриману при індукції насичення, називають граничною. При подальшому зростанні поля площа гістерезисної петлі залишається незмінною.

Залишкова індукція B_r і коерцитивна сила H_c є параметрами граничної петлі гістерезису. Сукупність вершин петель гістерезису утворює **основу криву намагнічування** феромагнетика. Основна крива намагнічування для магнітом'яких матеріалів (з малою H_c) практично не відрізняється від початкової кривої.

Магнітна проникність. Магнітну проникність, визначену за формулою $\mu = B/(\mu_0 H)$, називають **статичною магнітною проникністю**. Вона пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування. Залежність $\mu(H)$ було показано на рис. 5.3. Граничне значення магнітної проникності μ_n при напруженості магнітного поля, близькій до нуля, називають **початковою магнітною проникністю**. Ця характеристика має найважливіше значення при технічному використанні багатьох магнітних матеріалів. Експериментально її визначають у слабких полях з напруженістю порядку 0,1 А/м.

Крутість окремих ділянок кривої намагнічування характеризують **диференційною магнітною проникністю**:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

У тому самому зразку максимальне значення диференціальної проникності $(\mu_{\text{диф}})_{\text{max}}$ завжди перевищує максимальне значення статичної проникності μ_{max} .

Магніострикція. Зміна магнітного стану феромагнітного зразка супроводжується зміною його лінійних розмірів і форми; це явище називають магніострикцією. Розрізняють лінійну й спонтанну магніострикцію.

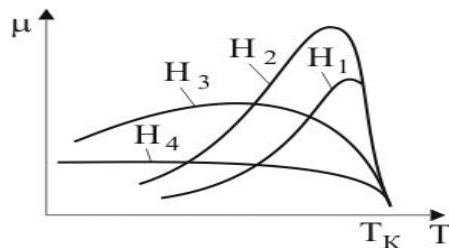
Спонтанна магніострикція виникає при переході речовини з парамагнітного у феромагнітний стан в процесі охолодження до температури нижче точки Кюрі.

Лінійна (індукована) магніострикція пов'язана з деформаціями кристалічної решітки під дією зовнішнього поля. Лінійну магніострикцію оцінюють значенням відносної деформації зразка в напрямку магнітного поля: $\lambda = \Delta/l$. Чисельне значення **коефіцієнта магніострикції** λ залежить від типу структури, кристалографічного напрямку, напруженості магнітного поля й температури. Лінійна магніострикція може бути як позитивною, так і негативною, тобто розміри зразка в напрямку поля при намагнічуванні можуть як збільшуватися, так і зменшуватися.

Відносну магніострикційну деформацію, що виникає при магнітному насиченні зразка, називають **константою магніострикції** λ_s .

Зміна розмірів феромагнетика при намагнічуванні супроводжується появою в ньому внутрішніх напружень і деформацій, які перешкоджають зсуву доменних границь. Тому магніострикція, як і кристалографічна анізотропія, утрудняє процес намагнічування феромагнетика в слабких полях і зменшує магнітну проникність матеріала. Різний знак коефіцієнта магніострикції заліза й нікелю у слабких полях використовується для виготовлення залізонікелевих сплавів типу пермалой з великою початковою магнітною проникністю. У пермалоях зі вмістом нікелю $\approx 80\%$ коефіцієнти магніострикції у всіх основних кристалографічних напрямках ≈ 0 .

Константа магніострикції зменшується при нагріванні феромагнетика й досягає нуля при температурі переходу речовини в парамагнітний стан (точка Кюрі). При нагріванні поступово відбувається теплова дезорієнтація спинових магнітних моментів і зменшення спонтанної намагніченості (рис. 5.6).



$H_4 > H_3 > H_2 > H_1$; H_1 - відповідає $\mu_{ц}$, H_4 - відповідає області технічного насичення

Рисунок 5.6 - Температурна залежність магнітної проникності феромагнетика при різних напруженостях зовнішнього магнітного поля

Вище деякої температури доменна структура розпадається, тобто спонтанна намагніченість зникає й феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Температуру такого фазового переходу називають **магнітною точкою Кюрі**. Із усіх феромагнетиків найбільш високу точку Кюрі ($T_K = 1131 \text{ }^\circ\text{C}$) має кобальт. Для чистого нікелю вона відповідає температурі $358 \text{ }^\circ\text{C}$. Поблизу точки Кюрі намагніченість насичення різко падає, магнітна проникність феромагнетика стає приблизно рівній одиниці, а також змінюються питомий опір, теплоємність, температурний коефіцієнт лінійного розширення й ін.

У більшості феритів, як і у феромагнетиків, намагніченість насичення J_{MS} монотонно зменшується при нагріванні й дорівнює нулю при температурі переходу в парамагнітний стан, коли повністю зникає магнітна впорядкованість. Температуру такого переходу називають **точкою Нееля**, або антиферомагнітною точкою Кюрі.

Поряд із цим у деяких феритів намагніченість J_{MS} може досягати нуля при температурі нижче точки Кюрі - появляється точка компенсації $T_{КОМ}$, при якій ферит перетворюється в антиферомагнетик.

5.3 Поводження феромагнетиків у змінних магнітних полях

Магнітні втрати. Перемагнічування феромагнетиків у змінних полях супроводжується втратами енергії, що призводить до нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із втрат на гістерезис, на вихрові

струми й магнітну післядію. Звичайно внеском механізму магнітної післядії в розігрів феромагнетика можна знехтувати.

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування (тобто за один період зміни поля), віднесені до одиниці об'єму речовини, визначаються площею статичної петлі гістерезису, тобто петлі, отриманої при повільній зміні магнітного потоку.

Втрати на гістерезис обумовлені необоротними процесами перемагнічування. Енергію цих втрат E_{Γ} (Дж/м³) можна обчислити за емпіричною формулою $E_{\Gamma} = \eta B_m^n$, де η – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу; B_m – максимальна індукція, Тл, що досягається в даному циклі; n – показник ступеня, що приймає значення від 1,6 до 2 залежно від B_m .

Вихрові струми виникають у провідному середовищі за рахунок е.р.с. самоіндукції, пропорційній швидкості зміни магнітного потоку. Статичні петлі гістерезису характеризують лише втрати на гістерезис, а динамічні – є сумарними втратами на гістерезис і вихрові струми, тобто при намагнічуванні змінним полем петля гістерезису розширюється. При цьому втрати на гістерезис E_{Γ} за один період зміни зовнішнього поля залишаються постійними в досить широкому діапазоні частот, а втрати на вихрові струми $E_{\text{стр}}$ зростають пропорційно частоті.

Для практичних цілей більш важливою характеристикою є активна потужність, що виділяється у феромагнетик при його перемагнічуванні, тобто енергія, що витрачається в одиницю часу. Потужність, що обумовлена втратами на вихрові струми:

$$P_{\text{стр}} = E_{\text{стр}} fV = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (5.4)$$

де V – об'єм зразка, м³; ξ – коефіцієнт, пропорційний питомій провідності речовини й залежний від геометричної форми й розмірів поперечного переріза зразка, що намагнічується.

Потужність, що обумовлена втратами на гістерезис:

$$P_{\Gamma} = \eta B_m^n fV. \quad (5.5)$$

Оскільки величина $P_{\text{стр}}$ залежить від другого ступеня частоти, а величина P_{Γ} – від першого ступеня, при високих частотах враховують у першу чергу величину $P_{\text{стр}}$, тобто втрати на вихрові струми. Вихрові

струми завжди виникають у площині, розташованій перпендикулярно магнітному полю.

Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно використовувати магнітний матеріал з підвищеним питомим опором, або збирати сердечник з тонких аркушів, ізольованих один від одного. Потужність, що витрачається на вихрові струми в одиниці маси й виражена у Вт/кг, пов'язана з товщиною аркуша h співвідношенням $P_{стр} = \frac{P_{стр}}{V\gamma}$, де γ - густина матеріалу, кг/м^3 .

Втрати на магнітну післядію обумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля на час від часток мілісекунди до декількох хвилин. Однією з основних причин магнітної післядії є теплова енергія, що допомагає слабо закріпленим доменним границям переборювати енергетичні перешкоди (бар'єри), що заважають їхньому вільному зсуву при зміні поля. Фізична природа втрат на магнітну післядію багато в чому аналогічна релаксаційній поляризації діелектриків.

Кут магнітних втрат. У слабких полях і на високих частотах динамічна петля гістерезису внаслідок відставання індукції від напруженості поля має форму еліпса через δ_μ . Кут відставання δ_μ називають кутом магнітних втрат (рис. 5.7).

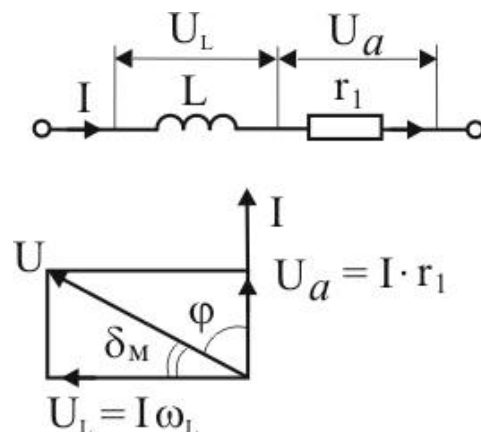


Рисунок 5.7 - Еквівалентна схема й векторна діаграма індуктивної котушки з магнітним сердечником

З векторної діаграми видно, що $\text{tg} \delta_m = \frac{r_1}{\omega L}$. Звідси активна потужність:

$$P_a = I^2 \omega L \text{tg} \delta_m.$$

Величину, зворотну $\text{tg}\delta_{\mu}$, називають **добротністю сердечника**.

Поверхневий ефект. Відповідно до закону Ленца власне магнітне поле вихрових струмів прагне послабити зміну основного магнітного потоку, тобто вихрові струми розмагнічують сердечник. Змінний магнітний потік нерівномірно розподіляється по перетині магнітопровода; магнітна індукція має найменше значення в центральних частинах перетину, тобто вихрові струми екранують центральний об'єм сердечника від проникнення в нього магнітного струму. **Витиснення магнітного поля на поверхню** проявляється тим сильніше, чим більше частота, магнітна проникність і питома провідність намагнічуваного середовища.

Коли поверхневий ефект є сильно вираженим, зміна магнітної індукції по перетині сердечника вздовж нормалі z до його поверхні характеризується рівнянням

$$B \approx B_{m0} \exp\left(-\frac{z}{\Delta}\right),$$

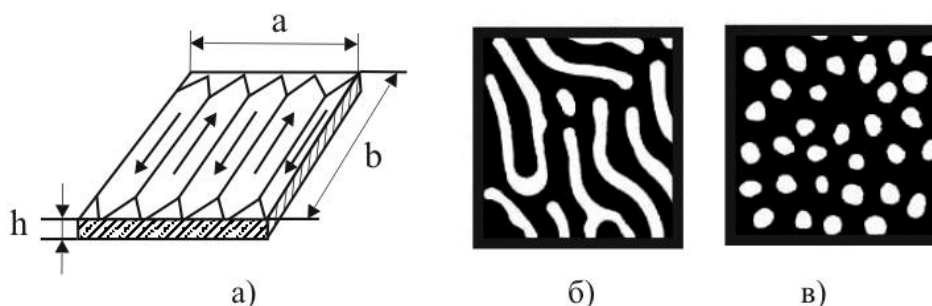
де B_{m0} – магнітна індукція на поверхні сердечника, Тл; Δ – глибина проникнення електромагнітного поля в речовину, м.

Загасання електромагнітної хвилі при її поширенні в провідному середовищі використовується при створенні електромагнітних екранів, які служать для захисту електронних схем і електровимірювальних приладів від зовнішніх наведень, а також для захисту радіоефіра від перешкод, створюваних генераторними пристроями. Для ефективного захисту товщина стінок екрана повинна перевищувати, принаймні, глибину проникнення Δ електромагнітного поля в речовину. На радіочастотах практично непроникними є екрани з добре провідних металів (міді, латуні й алюмінію). Однак на низьких частотах такі екрани неефективні, оскільки необхідні дуже товсті стінки (у міді на частоті 50 Гц - 1 см). У цих випадках краще використовувати екрани з феромагнітних матеріалів, особливо з пермалоя, що має досить високу магнітну проникність.

5.4 Доменні структури в тонких магнітних плівках

При малій товщині плівки напрямок легкого намагнічування виявляється розташованим у площині плівки. Утворюються плоскі домени (рис. 5.8,а).

Дуже тонкі плівки мають однодоменну структуру, а плівки товщиною $\sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм - багатодоменну з довгих вузьких доменів (шириною від часток мікрметра до декількох мікрметрів), намагнічених у протилежних напрямках.



а – довгі вузькі домени; б- лабіринтова структура доменів;
в - циліндричні магнітні домени

Рисунок 5.8 - Доменні структури в тонких магнітних плівках

Під впливом зовнішнього поля вся система смуг може переміщатися й повертатися, і її використовують як керовану дифракційну решітку для світла й найближчого діапазону хвиль електромагнітного спектра.

Особливими є монокристалічні плівки деяких феритів, що мають лише одну вісь легкого намагнічування. Якщо площина плівки є перпендикулярною осі легкого намагнічування, то при відсутності зовнішнього поля плівка має лабіринтову доменну структуру. Тобто внаслідок одноосьової анізотропії утворюються домени із протилежним напрямком спонтанної намагніченості (світлі й темні місця на рис. 5.8,б). Зовнішнє поле, перпендикулярне площині плівки, змінює геометрію доменної структури. У міру збільшення напруженості поля спочатку відбувається розрив лабіринтової структури, а потім утворюються стійкі **циліндричні магнітні домени** (ЦМД), або «магнітні пухирці» (рис. 5.8,в). При подальшому збільшенні напруженості поля діаметр ЦМД поступово зменшується й при деякому значенні H вся плівка намагнічується однорідно - циліндричні домени зникають.

Стійкі циліндричні магнітні домени можливі в ортоферитах, що мають орторомбічну структуру і хімічний склад $MeFe_3$, де Me – тривалентний іон ітрія або рідкоземельного елемента, а також у феритах зі структурою граната, гексаферитах і деяких металевих магнітних плівках.

При виготовленні плівок у ферогранатах може наводитися одноосьова магнітна анізотропія за рахунок пружних напружень, пов'язаних, наприклад, з невідповідністю періодів решіток підкладки й плівки. Лінійні розміри ЦМД в ортоферитах становлять десятки або навіть сотню мікрометрів, а в плівках ферогранатів - одиниці мікрометрів.

Циліндричні магнітні домени, керовані зовнішнім полем і існуючі в певному інтервалі H , можна використати для створення запам'ятовувальних і логічних пристроїв. Значенню «1» відповідає наявність домена в певній точці інформаційного середовища, а значенню «0» – його відсутність. Якщо в площині плівки створити неоднорідне магнітне поле, то можна спостерігати переміщення ЦМД під дією цього поля. Високою рухливістю доменних границь характеризуються ортоферити [$\mu_r = v_r/H = 10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ м}^2/(\text{А}\cdot\text{с})$].

Генерувати домени, управляти їхнім переміщенням, фіксувати їхню наявність або відсутність у заданій точці (тобто зчитувати інформацію) можна шляхом керування дискретним переміщенням ЦМД у заданому напрямку. Змінюючи напрямок керуючого поля, що діє в площині плівки, можна змінювати полярність магнітних зарядів на елементах аплікації. Зчитування інформації може бути здійснено, наприклад, за допомогою датчиків Хола або магніторезисторів. У холловському датчику індукується е.р.с. під дією магнітного поля домена, а в магніторезисторах використовується ефект зміни електричного опору матеріалу в магнітному полі.

Пристрої на ЦМД характеризуються великою інформаційною ємністю й малою споживаною потужністю.

5.5 Класифікація магнітних матеріалів

Застосовувані в електронній техніці магнітні матеріали підрозділяють на дві основні групи: магнітом'які й магнітотверді; в окрему групу виділяють матеріали спеціалізованого призначення (рис.5.9).

До **магнітом'яких** відносять магнітні матеріали з малою коерцитивною силою й високою магнітною проникністю. Вони мають здатність намагнічуватися до насичення в слабких магнітних полях, характеризуються вузькою петлею гістерезису й малими втратами на перемагнічування. Магнітом'які матеріали використовуються в основному в якості різних магнітопроводів:

сердечників дроселів, трансформаторів, електромагнітів, магнітних систем електровимірювальних приладів і т.п.

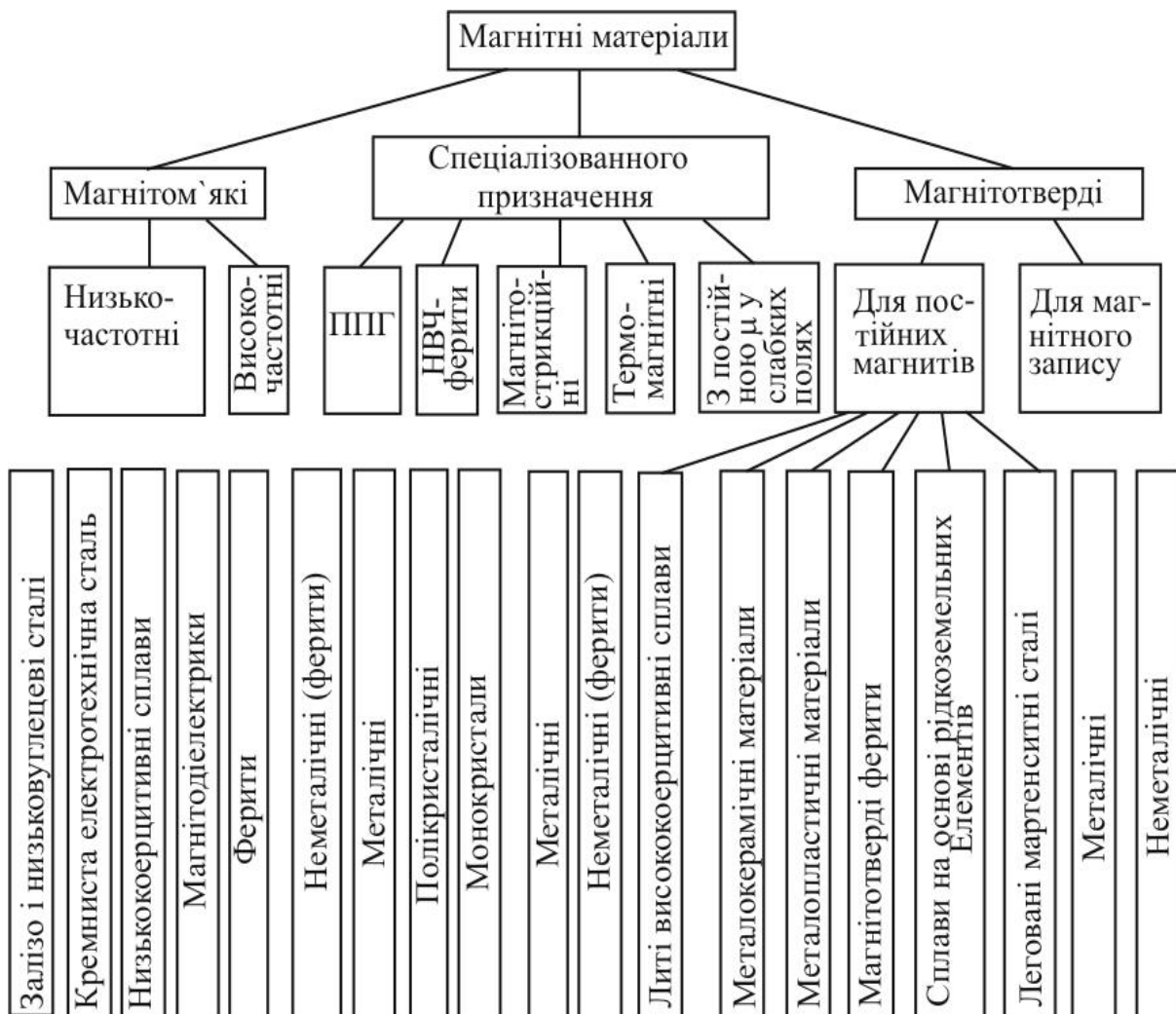


Рисунок 5.9 - Класифікація магнітних матеріалів

До **магнітотвердих** відносять матеріали з великою коерцитивною силою H_c . Вони перемагнічуються лише в дуже сильних магнітних полях і служать в основному для виготовлення постійних магнітів.

Умовно магнітом'якими вважають матеріали, у яких $H_c < 800$ А/м, а магнітотвердими – із $H_c > 4$ кА/м. В кращих магнітом'яких матеріалах коерцитивна сила може досягати 1 А/м, а в кращих магнітотвердих матеріалах її значення перевищує 500 кА/м.

Матеріали спеціалізованого призначення - це матеріали із прямокутною петлею гістерезису (ППГ), ферити для пристроїв надвисокочастотного діапазону й магнітострикційні матеріали. Усередині кожної групи розподіл магнітних матеріалів за родами і

видами відбиває розходження в їхній будові й хімічному складі, технології й деякі специфічні властивості.

5.6 Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів

Основні вимоги. Крім високої магнітної проникності й малої коерцитивної сили магнітом'які матеріали повинні мати велику індукцію насичення, що дозволяє зменшити габаритні розміри й масу магнітної системи.

Магнітний матеріал, використовуваний у змінних полях, повинен мати можливо менші втрати на перемагнічування, які складаються в основному із втрат на гістерезис і вихрові струми. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах обирають магнітом'які матеріали з підвищеним питомим опором. Часто магнітопроводи збирають із окремих ізольованих тонких листів. Стрічкові сердечники навивають із тонкої стрічки з міжвитковою ізоляцією з діелектричного лаку. Важливою вимогою до магнітом'яких матеріалів є забезпечення стабільності їхніх властивостей, як у часі, так і стосовно зовнішніх впливів, таких, як температура й механічні напруги.

Залізо й низьковуглецеві сталі. Основним компонентом більшості магнітних матеріалів є залізо (табл. 5.1).

Саме залізо в елементарному вигляді є типовим магнітом'яким матеріалом. Серед елементарних феромагнетиків залізо має найбільшу індукцію насичення (близько 2,2 Тл). Властивості заліза залежать від вмісту домішок, структури матеріалу, розміру зерен, наявності механічних напруг.

Технічно чисте залізо звичайно містить невелику кількість домішок вуглецю, марганцю, кремнію й інших елементів, що погіршують його магнітні властивості. Через порівняно низький питомий опір його використовують, в основному, для виготовлення магнітопроводів постійного магнітного потоку. Звичайне технічно чисте залізо має сумарний вміст домішок 0,08...0,1 %.

Кремниста електротехнічна сталь (тонколистова) є основним магнітом'яким матеріалом масового споживання. Домішка кремнію підвищує питомий опір, що знижує втрати на вихрові струми, збільшує $\mu_{\text{п}}$ і $\mu_{\text{мах}}$, зменшує коерцитивну силу і втрати на гістерезис.

Таблиця 5.1 – Властивості магнітом'яких матеріалів

Матеріал	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
Монокристал найчистішого заліза	>20 000	1 430 000	0,8	-	0,097
Електротехнічна сталь	200...600	3000...8000	10...65	1,95...2,0 2	0,25... 0,6
Низьконікелеві й пермалой	1500...4000	15 000... 60 000	5...32	1,0...1,6	0,45... 0,9
Високонікелеві пермалої	7 000... 100 000	50 000... 300 000	0,65...5	0,65... 1,05	0,16... 0,85
Суперпермалой 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe, 0,5% Mn	100 000	До 1 500 000	0,3	0,8	0,6

Використання листових і стрічкових сердечників з електротехнічної сталі на частотах вище 1 кГц можливе лише при істотному обмеженні магнітної індукції, так, щоб сумарні втрати не перевищували допустимої межі. За умовами нагрівання й тепловідводу гранично допустимими прийнято вважати питомі втрати 20 Вт/кг.

Низькокоерцитивні сплави

Пермалої – залізонікелеві сплави, що мають досить велику магнітну проникність в області слабких полів і дуже маленьку коерцитивну силу. Високонікелеві пермалої містять 72...80 % нікелю, а низьконікелеві - 40...50 % .

Найбільша початкова й максимальна магнітна проникність є у суперпермалою (див. табл. 5.1), що містить 78,5 % Ni. Дуже легке намагнічування цього сплаву в слабких полях є наслідком практичної відсутності в нього магнітної анізотропії і явища магнітострикції.

Магнітні властивості пермалоїв дуже чутливі до зовнішніх механічних напруг, залежать від хімічного складу й наявності сторонніх домішок у сплаві, а також дуже різко змінюються залежно від режимів термообробки матеріалу (температури, швидкості нагрівання й охолодження, навколишнього середовища й т.д.).

Індукція насичення високонікелевих пермалоїв майже у два рази нижче, ніж у електротехнічної сталі, і в півтора рази нижче, ніж у низьконікелевих пермалоїв. Магнітні проникності високонікелевих пермалоїв у кілька разів вище, ніж у низьконікелевих, і набагато перевершують проникності електротехнічних сталей, питомий опір - майже в три рази менше. Тому при підвищених частотах доцільніше використовувати низьконікелеві пермалої. Магнітна проникність пермалоїв сильно знижується зі збільшенням частоти внаслідок виникнення у матеріалі помітних вихрових струмів через невеликий питомий опір.

Вартість пермалоїв визначається вмістом у їхньому складі нікелю. У марках пермалоїв буква Н означає нікель, К - кобальт, М - марганець, Х - хром, С - кремній (сіліцій), Д - мідь; додаткова буква У - сплав з поліпшеними властивостями, П - із прямокутною петлею гістерезису. Цифра в марці вказує процентний вміст нікелю.

Низьконікелеві сплави 45Н и 50Н застосовують для виготовлення сердечників малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, реле й деталей магнітних ланцюгів, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням. Зі сплаву 50НХС виготовляють сердечники імпульсних трансформаторів і апаратури зв'язку звукових і високих частот у режимі без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням.

Високонікелеві сплави 79НМ, 80НХС, 76НХД використовують для виготовлення сердечників малогабаритних трансформаторів, реле й магнітних екранів, а при товщині 0,02 мм - сердечників імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів і безконтактних реле.

Альсіфери – потрібні сплави заліза із кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсіфера: 9,5 % Si, 5,6 % Al, інше - Fe. Такий сплав відрізняється твердістю й крихкістю, але може бути виготовлений у вигляді фасонних виливків. Властивості альсіфера: $\mu_{\text{п}} = 35400$; $\mu_{\text{max}} = 117000$; $H_c = 1,8 \text{ А/м}$; $\rho = 0,8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Вироби з альсіфера (магнітні екрани, корпуси приладів і т.п.) виготовляють методом лиття з товщиною стінок не менш як 2...3 мм через крихкість

сплаву. Завдяки крихкості альсіфера, його можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих сердечників.

5.7 Магнітом'які високочастотні матеріали

Під високочастотними магнітом'якими матеріалами розуміють речовини, які повинні виконувати функції магнетиків при частотах $\geq 10^2 \dots 10^3$ Гц.

За фізичною природою високочастотні магнітом'які матеріали поділяють на **магнітодіелектрики** й **ферити**. При звукових, ультразвукових і низьких радіочастотах можна використовувати також тонколистові рулонні холоднокатані електротехнічні сталі й пермалої. Товщина сталей досягає 30...25 мкм, а пермалої - товщиною до 3...2 мкм.

Ферити - це оксидні магнітні матеріали, у яких спонтанна намагніченість доменів обумовлена некомпенсованим антиферомагнетизмом.

Великий питомий опір ρ , що перевищує ρ заліза в $10^3 \dots 10^{13}$ разів, а отже, і відносно незначні втрати енергії в області підвищених і високих частот поряд з досить високими магнітними властивостями забезпечують феритам широке застосування в радіоелектроніці.

Ферити виготовляють у вигляді кераміки й монокристалів. Завдяки невисокій вартості й відносній простоті технологічного циклу керамічні матеріали займають провідне місце серед високочастотних магнетиків. Найбільш широко застосовують **нікель-цинкові** й **марганець-цинкові** ферити. Вони кристалізуються в структурі шпінелі і є твердими розчинами заміщення, утвореними двома простими феритами, один із яких (NiFe_2O_4 або MnFe_2O_4) є феримагнетиком, а інший (ZnFe_2O_4) – немагнітний. Збільшення концентрації немагнітного компонента призводить до збільшення намагніченості насичення (а отже, і B_s) твердого розчину і монотонного зниження температури Кюрі (T_K).

Марганець-цинкові ферити із грубозернистою структурою (із середнім розміром кристалітів ~ 40 мкм) можуть мати початкову магнітну проникність $\mu_n \sim 20000$, майже як у кращих марок пермалою.

В маркуванні магнітом'яких феритів (табл. 5.2) на першому місці позначено чисельне значення μ_n , потім ідуть букви, що

визначають частотний діапазон застосування, що обмежується зверху значенням критичної частоти $f_{кр}$. Ферити для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот позначають буквою Н (низькочастотні), критична частота для них частота - 0,1...50 МГц. Високочастотні ферити маркуються ВЧ, критична частота - 50...600 МГц. Далі в маркуванні стоять букви, що означають склад матеріалу: М – марганець-цинковий ферит, Н – нікель-цинковий і т.д. Ферити марок ВЧ за складом є нікель-цинковими.

Таблиця 5.2 – Властивості феритів

Марка	$\mu_{п}$	$\frac{tg \delta}{\mu_{п}} 10^6, при$ $f, МГц$	μ_{max}	$H_c,$ А/м	$B_r,$ Тл	$f_{кр},$ МГц	$f_{гр},$ МГц	$T_k, ^\circ C$ (не нижче)	$\rho,$ Ом·м	$d,$ Мг/м ³	Примітка
20000НМ	15000	25 (0,01)	35000	0,24	0,11	0,01	0,1	110	0,001	5,0	Загальна
6000 НМ	4800-8000	40 (0,02)	10000	8	0,11	0,02	0,5	130	0,1	4,7	
1000 НМ	800-1200	15 (0,1)	1800	28	0,11	1,0	5	200	0,5	4,5	
1000 НН	800...1200	85 (0,1)	3000	24	0,10	0,4	3	110	10	4,9	
600 НН	500...800	25 (0,1)	1500	40	0,12	1,2	5	110	100	4,8	
2000 НМ1	1700...500	15 (0,1)	3500	25	0,12	0,5	1,5	200	5	5	Термоста- більні, для апаратури з підвище- ними вимо- гами(фери- ти марок ВЧ –нікель- цинкові)
700 НМ1	550...850	8 (0,1)	1800	25	0,05	5	8	200	4	4,8	
100 ВЧ	80...120	135 (18)	280	300	0,15	35	80	400	10^5	4,8	
20 ВЧ2	16...24	280 (30)	45	1000	0,1	120	300	450	10^6	4,7	
300 НН	280...350	170 (4)	600	80	0,13	5	20	20	10^6	4,8	Для кон- турів, що перебудову- ються підмагні- чуванням
9 ВЧ	9...13	850(15)	30	1500	0,06	250	600	500	10^7	4,4	
200 ВЧ	180...220	90 (10)	360	70	0,11	20	-	360	10^3	4,7	Для широко- смугових транс- форматорів
50 ВЧ3	45...65	120 (30)	200	100	0,14	85	-	480	10^4	4,6	

У змінних полях, крім початкової магнітної проникності однією з найважливіших характеристик феритів є тангенс кута втрат $tg\delta$. Завдяки низькій провідності складова втрат на вихрові струми у феритах й нею можна знехтувати. У слабких магнітних полях незначними виявляються й втрати на гістерезис. Тому значення $tg\delta$ у феритах на високих частотах в основному визначається магнітними

втратами, обумовленими релаксаційними й резонансними явищами. Для оцінки допустимого частотного діапазону, у якому може використовуватися даний матеріал, вводять поняття критичної частоти $f_{кр}$ - частоту, при якій $\operatorname{tg}\delta$ досягає значення 0,1. Частоту $f_{гр}$, при якій початкова магнітна проникність зменшується до 0,7 від її значення в постійному магнітному полі, називають **граничною**. Як правило, $f_{кр} < f_{гр}$. В області частот до 1 МГц марганець-цинкові ферити мають істотно менший відносний тангенс кута втрат, ніж нікель-цинкові ферити, а також підвищену індукцію насичення й більш високу температуру Кюрі. У той же час нікель-цинкові ферити мають більш високий питомий опір і кращі частотні властивості.

Магнітна проникність феритів μ_n підвищується з ростом температури до точки Кюрі й потім різко падає. Щоб не було погіршення магнітних характеристик, ферити слід оберігати від механічних навантажень.

За електричними властивостями ферити належать до класу напівпровідників. Їхня електропровідність обумовлена процесами електронного обміну між іонами змінної валентності («стрибковий» механізм). Електрони, що беруть участь в обміні, можна розглядати як носії заряду, концентрація яких практично не залежить від температури. Але при підвищенні температури зростає рухливість носіїв заряду. Найменший серед феритів питомий опір має магнетит Fe_3O_4 (ферит заліза), у якого $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. У ферогранатів питомий опір може досягати високих значень (до 10^9 Ом·м). Ферити з високою магнітною проникністю, як правило, мають невисокий питомий опір.

Для феритів характерна відносно велика діелектрична проникність ϵ , що зменшується з підвищенням частоти. Так, нікель-цинковий ферит з початковою проникністю $\mu_n = 200$ на частоті 1 кГц має $\epsilon = 400$, а на частоті 10 МГц $\epsilon = 15$. Найбільш високе значення ϵ властиве марганець-цинковим феритам, у яких вона досягає сотень або тисяч. Магнітом'які ферити з початковою магнітною проникністю 400...20000 у слабких полях у багатьох випадках ефективно замінюють листові феромагнітні матеріали - пермалой і електротехнічну сталь.

Магнітом'які ферити широко застосовуються як сердечники контурних котушок постійної й змінної індуктивностей, фільтрів в апаратурі радіо- і дротового зв'язку, сердечників імпульсних і

широкосмугових трансформаторів, трансформаторів розгортання телевізорів, магнітних модуляторів і підсилювачів. З них виготовляють також стрижневі магнітні антени, індуктивні лінії затримки та інші деталі й вузли електронної апаратури.

Монокристали магнітом'яких феритів досить широко застосовуються при виготовленні магнітних голівок запису й відтворенні сигналів звукового й відеодіапазонів у магнітофонах. У порівнянні з металевими феритові голівки мають високий питомий опір (що важливо для зменшення втрат) і велику твердість. Через високу швидкість руху магнітної стрічки при відеозапису до матеріалу голівки ставляться підвищені вимоги відносно зносостійкості.

Магнітодіелектрики

Магнітодіелектрики виготовляють пресуванням порошкоподібного феромагнетика з ізолюючою органічною або неорганічною зв'язкою. Як основу застосовують карбонільне залізо, альсіфер і молібденовий пермалой. Ізолюючою зв'язкою служать фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло й ін. Магнітодіелектрик повинен мати малі втрати та достатню стабільність магнітної проникності в часі й при коливаннях температури. Магнітодіелектрики характеризуються відносно невисокою магнітною проникністю ($\mu_{\text{п}} = 10 \dots 250$), яка істотно менше за магнітну проникність монолітних феромагнетиків.

Пресовані сердечники застосовують в індуктивних котушках фільтрів, генераторів, частотомірів, контурів радіоприймачів і т.д. Введення такого сердечника в котушку збільшує її індуктивність у більшій мірі, ніж зростає активний опір, у зв'язку із чим добротність котушки підвищується.

Індуктивні котушки із сердечником з магнітодіелектрика можуть мати змінну індуктивність, що забезпечує можливість настроювання контурів за допомогою переміщення рухомих сердечників (підлаштовувачів). Сердечники на основі карбонільного заліза відрізняються досить високою стабільністю, малими втратами, позитивним температурним коефіцієнтом магнітної проникності й можуть бути використані в широкому діапазоні частот.

Альсіфер, крім хороших магнітних властивостей, вигідно відрізняється від інших сплавів невисокою вартістю й недефіцитністю сировини. Залежно від вмісту кремнію й алюмінію його температурний коефіцієнт магнітної проникності може бути

позитивним, негативним або дорівнювати нулю. Змішанням порошків зі сплавів з позитивним і негативним α_{μ} можна створювати сердечники з термостабільними властивостями.

Магнітодіелектрики на основі молібденового пермалою мають найбільшу початкову магнітну проникність; втрати на гістерезис і вихрові струми для цих магнітодіелектриків при рівних значеннях μ менше, ніж в альсіферових сердечників, а стабільність параметрів вище. Верхня межа робочих температур магнітодіелектриків 100...120 °С. Зміна початкової магнітної проникності з часом становить від 0,2 до 2 % у рік. Висока стабільність магнітних властивостей є важливою перевагою магнітодіелектриків перед іншими магнітом'якими матеріалами.

5.8 Магнітні матеріали спеціалізованого призначення

Ферити й металеві сплави із прямокутною петлею гістерезису (ППГ)

Магнітні матеріали із ППГ (табл. 5.3) широко застосовуються в пристроях автоматики, обчислювальної техніки, в апаратурі телеграфного зв'язку.

Таблиця 5.3 - Властивості сердечників і матеріалів із ППГ

Матеріал або сердечник	H_c , А/м	B_r , Тл	$K_{пк}$, не менше	S_q , мкКл/м	T_K , °С	Примітка
Ферити різних марок	10...1200	0,15...0,25	0,9	25...55	110...630	Є понад 25 різних марок
Мікронні сердечники з пермалоїв (товщина стрічки 2...10 мкм)	8...50	0,6...1,5	0,85...0,9	25...100	300...630	Сплави 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ

До матеріалів і виробів цього типу ставлять ряд специфічних вимог, а для їхньої характеристики залучають деякі додаткові параметри. Основним з таких параметрів є коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису $K_{пк}$, що є відношенням залишкової індукції B_r до

максимальної індукції B_{\max} : $K_{nk} = \frac{B_r}{B_{\max}}$. Бажано, щоб K_{nk} був можливо ближчим до одиниці. Для забезпечення швидкого перемагнічування сердечників вони повинні мати невеликий коефіцієнт перемикання S_q , що чисельно дорівнює кількості електрики на одиницю товщини сердечника, яка є необхідною для перемагнічування його з одного стану залишкової індукції в протилежний стан максимальної індукції. Крім того, матеріали із ППГ повинні забезпечувати малий час перемагнічування, можливо більшу температурну стабільність магнітних характеристик, а, отже, мати високу температуру Кюрі й деякі інші властивості.

Сердечники з матеріалу із ППГ мають два стійких магнітних стани, що відповідають різним напрямкам залишкової магнітної індукції. Тому їх можна використати як елементи для зберігання й переробки двійкової інформації. Запис і зчитування інформації здійснюються перемиканням сердечника з одного магнітного стану в інший за допомогою імпульсів струму, що створюють необхідну напруженість магнітного поля. Двійкові елементи на магнітних сердечниках із ППГ характеризуються високою надійністю, малими габаритами, низькою вартістю, відносною стабільністю характеристик. Вони мають практично необмежений термін служби, зберігають записану інформацію при відключених джерелах живлення.

Ферити із ППГ. Специфічна форма петлі реалізується при виборі певного хімічного складу й умов спікання ферита, а не є результатом якої-небудь спеціальної обробки матеріалу, що призводить до утворення текстури.

При зростанні температури 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 сердечників з феритів із ППГ проста й економічна. З феритів із ППГ найбільш широке застосування знаходять **магній-марганцеві й літєві ферошпінелі**.

В запам'ятовувальних пристроях ЕОМ застосовують або кільцеві феритові сердечники малого розміру (є сердечники із зовнішнім діаметром (0,3...0,4 мм), або багатоотворні феритові плати, в яких область навколо кожного отвору виконує функції окремого

сердечника. При використанні сердечників досягається більш висока швидкодія.

Стрічкові мікронні сердечники з пермалоїв мають кращі магнітні властивості (дивись табл. 5.3) у порівнянні з феритами й більш високу температурну стабільність. У тому ж інтервалі температур ($-20\dots+60$ °C) властивості їх практично не змінюються. В мікромініатюрних електронних приладах використовують магнітні плівки, нанесені на підкладки методами розпилення у вакуумі.

Ферити для пристроїв НВЧ. Діапазон НВЧ відповідає довжинам хвиль від 1 м до 1 мм.

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 матеріалами металевими трубами. Як тверді матеріали для керування потоком енергії у хвилеводах використовують ферити НВЧ, магнітними характеристиками яких можна управляти за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Ферити використовуються в ряді НВЧ-пристроїв – в антенних перемикачах й циркуляторах, що служать для розподілу енергії між окремими хвилеводами; в фазообертачах; фільтрах; модуляторів, обмежниках потужності й ін.

До феритів НВЧ пред'являють ряд специфічних вимог:

- 1) досягнення вузької лінії резонансу;
- 2) висока чутливість матеріалу до керуючого поля (можливість керування відносно слабким зовнішнім полем);
- 3) високий питомий об'ємний опір ($10^6\dots10^8$ Ом·м) і можливо менший тангенс кута діелектричних втрат ($10^{-3}\dots10^{-4}$), а також можливо менше значення магнітних втрат поза областю резонансу, що забезпечує мале загасання у фериті;
- 4) температурна стабільність властивостей і можливо більш високе значення точки Кюрі.

Більшість вимог задовольняється при використанні **магній-маргацевих феритів** з великим вмістом окису магнію. Для деяких цілей застосовують **літій-цинкові** й **нікель-цинкові** ферити й ферити складного складу (поліферити).

Монокристали ферогранату ітрія $Y_3Fe_5O_{12}$ характеризуються досить низькими діелектричними й магнітними втратами, слабкою анізотропією, найбільш вузькою резонансною кривою, $H = 10 \dots 100$ А/м. Вони є найпоширенішими серед феритів, застосовуваних у низькочастотній частині діапазону НВЧ.

Магніострикційні матеріали – це матеріали, застосування яких засновано на явищі магніострикції й магнітопружному ефекті, тобто зміні розмірів тіла в магнітному полі й зміні магнітних властивостей матеріалу під дією механічних впливів. Магніострикційними матеріалами для високих частот є ферити. Магніострикційні коливання невеликої амплітуди в намагніченому середовищі за своїм зовнішнім проявом аналогічні п'єзоелектричним. Тому їх іноді називають п'єземагнітними.

В минулому найбільш широко застосовуваним магніострикційним матеріалом був **нікель**. Цінними властивостями нікелю є висока стійкість до корозії й малий температурний коефіцієнт модуля пружності. Сплав **платини із залізом** має велику константу магніострикції, однак він дуже дорогий й тому має досить обмежене застосування. Недоліком **залізокобальтових і залізоалюмінієвих сплавів** є крихкість, що утрудняє механічну обробку, і низька антикорозійна стійкість, що перешкоджає використанню таких перетворювачів у водному середовищі.

Широке застосування в магніострикційних пристроях знаходить **феритова кераміка**. 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 магніострикційна кераміка є або чистим **феритом нікелю** ($NiFe_2O_4$), або твердим розчином на його основі.

З магніострикційних матеріалів виготовляють сердечники електромеханічних випромінювачів і приймачів для електроакустики й ультразвукової техніки, сердечники електромеханічних і магніострикційних фільтрів і резонаторів, ліній затримки, як чутливі елементи магнітопружних перетворювачів, застосовуваних у пристроях автоматики.

5.9 Магнітотверді матеріали

Класифікація й властивості. Магнітотверді матеріали відрізняються від магнітом'яких високою коерцитивною силою. Площа гістерезисної петлі в магнітотвердих матеріалів значно більше, ніж у магнітом'яких. За застосуванням магнітотверді матеріали можна поділити на матеріали для постійних магнітів і матеріали для запису й тривалого зберігання звуку, зображення й т.п.

Властивості магнітотвердих матеріалів характеризуються кривою розмагнічування, що є ділянкою граничної гістерезисної петлі (рис. 5.14).

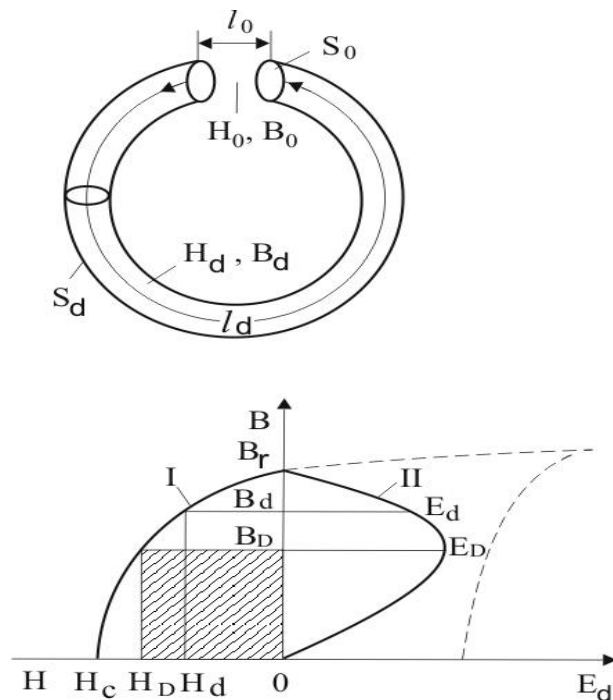


Рисунок 5.10 - Криві розмагнічування (I) і магнітної енергії в повітряному зазорі (II) постійного магніта

З рис. 5.10 видно, що при деяких значеннях B_D і H_D енергія досягає максимального значення $E_D = \frac{B_D H_D}{2} = E_{d \max}$, що є найбільш важливою характеристикою якості матеріалів, використовуваних для виготовлення постійних магнітів. Нерідко для характеристики таких матеріалів користуються добутком $B_D \cdot H_D$, опускаючи множник $1/2$. Графічно енергію E_d у певному масштабі можна представити площею прямокутника зі сторонами B_d і H_d (на рисунку 5.10 заштрихований прямокутник, що характеризує $E_{d \max}$).

Форму кривої розмагнічування прийнято характеризувати коефіцієнтом опуклості η_B , під яким розуміють відношення $\eta_B = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}$. З посиленням прямокутності петлі гістерезису коефіцієнт опуклості наближається до одиниці.

Чим більше залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c і коефіцієнт опуклості η_B , тим більше максимальна енергія магніту.

Більша коерцитивна сила виникає в матеріалі, що складається з однодомених частинок, у яких велика енергія магнітної кристалографічної анізотропії або анізотропії форми.

Литі висококоерцитивні сплави. До цієї групи належать сплави систем Fe–Ni–Al і Fe–Ni–Co–Al, модифіковані різними добавками. Вони є активними елементами багатьох приладів і характеризуються сприятливим співвідношенням між магнітними властивостями й вартістю виробництва.

У потрійній системі **Fe–Ni–Al** найбільшу питому магнітну енергію мають сплави, що містять близько 28 % Ni і 14 % Al (за масою), що приблизно відповідає інтерметалічній сполуці Fe₂NiAl. В ці сплави додають легуючі елементи – кобальт, мідь, титан і ніобій, що не тільки поліпшує магнітні властивості, але й послабляє їх залежність від невеликих змін хімічного складу, наявності домішок і відхилень від заданого режиму термообробки.

Магнітні властивості магнітотвердих матеріалів залежать від кристалографічної й магнітної текстур. **Магнітна текстура** висококоерцитивних сплавів створюється шляхом їхнього охолодження в сильному магнітному полі. При цьому досягається впорядковане розташування пластинчастих виділень сильно-магнітної фази, які своїми осями легкого намагнічування орієнтуються в напрямку поля. Текстуrowаний матеріал магнітно анізотропний; найкращі властивості в нього виявляються в тому напрямку, у якому при охолодженні на нього діяло магнітне поле.

Кристалічну текстуру створюють методом спрямованої кристалізації сплаву, залитого у форму, використовуючи особливі умови тепловідводу. Сплави, виготовлені спрямованою кристалізацією, мають специфічну стовпчасту макроструктуру. Сполучення кристалічної й **магнітної текстур** дозволяє поліпшити всі параметри магнітотвердого матеріалу (B_r , H_c , η_B).

Недоліком сплавів типу Fe-Ni-Al і Fe-Ni-Al-Co є труднощі виготовлення з них виробів точних розмірів внаслідок крихкості й високої твердості. У марках сплавів прийняті наступні позначення: Ю - алюміній, Н - нікель, Д - мідь, К - кобальт, Т - титан, Б - ніобій, А - стовпчаста кристалічна текстура. Магнітна текстура не позначається, але мається на увазі завжди при вмісті кобальту в сплаві понад 15 %. Цифра в маркуванні підкреслює вміст того металу, буква якого стоїть перед цією цифрою.

Безкобальтові сплави (ЮНД) найбільш дешеві. Сплави, що містять кобальт (ЮНДК15, ЮНДК18 і ін.), застосовують у тих випадках, коли потрібні підвищені магнітні властивості й потрібний ізотропний магнітний матеріал. Сплави з 24 % кобальту, що мають високі магнітні властивості в напрямку магнітної текстури, використовують при спрямованому магнітному потоці. Сплави зі спрямованою кристалізацією, наприклад ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА, мають найбільший запас магнітної енергії ($e_{\max} = 35 \dots 40 \text{ кДж/м}^3$). При великому повітряному зазорі перевагу треба віддавати сплавам з найбільшою коерцитивною силою, наприклад, сплавам, що містять титан – ЮНДК40Т8 ($H_c \geq 145 \text{ кА/м}$) і ін. Досить високі магнітні властивості мають монокристалічні матеріали марок ЮНДК35Т5АА, ЮНДК40Т8АА (символ АА означає монокристалічну структуру). Однак вони досить дорогі, тому промисловістю виробляються в обмежених масштабах.

Магніти з порошків. Неможливість виготовити особливо дрібні вироби зі строго витриманими розмірами з литих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів обумовила використання методів порошкової металургії для виробництва постійних магнітів. **Металокерамічні магніти** виробляють шляхом пресування порошку, що складається зі здрібнених тонкодисперсних магнітотвердих сплавів, і подальшим спіканням при високих температурах за аналогією із процесами випалу кераміки. Дрібні деталі при такій технології виходять досить точних розмірів і не вимагають подальшої обробки. Процес виготовлення **металопластичних магнітів** аналогічний процесу пресування деталей із пластмас, тільки в порошок міститься наповнювач у вигляді зерен здрібненого магнітотвердого сплаву. Металопорошкові магніти економічно вигідні при масовому автоматизованому виробництві, складній конфігурації й невеликих розмірах магнітів. Металопластична технологія дозволяє одержувати магніти з арматурою.

Металокерамічні магніти звичайно мають пористість 3...5 %, а запасена магнітна енергія й залишкова індукція в них на 10...20 % нижче, ніж у литих магнітів з відповідного сплаву, зате за механічною міцністю вони перевершують литі магніти в 3...6 разів. Магнітні властивості металопластичних магнітів досить низькі. Коерцитивна сила в порівнянні з литими магнітами нижче на 10...15 %, залишкова індукція - на 35...50%, а запасена магнітна енергія - на 40...60 %. Зниження магнітних властивостей пояснюється більшим вмістом (до 30 %) немагнітної зв'язувальної речовини.

Недоліками металокерамічних магнітів є низька механічна міцність, велика крихкість, сильна залежність магнітних властивостей від температури.

Магнітотверді ферити. З магнітотвердих феритів (табл. 5.4) найбільш відомий **барієвий ферит** $Ba \cdot 6Fe_2O_3$ (фероксдюр).

На відміну від магнітом'яких феритів він має не кубічну, а гексагональну кристалічну решітку з одноосьовою анізотропією. Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марок БІ (барієві ізотропні) і марок БА (барієві анізотропні). Висока коерцитивна сила в цих матеріалів обумовлена малим розміром кристалічних зерен і сильною магнітною кристалографічною анізотропією. Для додання анізотропії магнітних властивостей в матеріалі створюється текстура шляхом формування маси в сильному магнітному полі (з напруженістю 650...800 кА/м). Поле відключають після повного видалення вологи із пресованого порошку й досягнення необхідного тиску в прес-формі.

Таблиця 5.4 - Магнітні властивості магнітів із ферита барія і ферита кобальта

Марка	$E_{max},$ кДж/м ³	$H_c,$ А/м	$B_r,$ Тл
БІ	3,2	112	0,19
БІС	3,6	828	0,21
2,4 БА	9,6	224	0,33
3,1 БА	12,4	168	0,38
3БА2	10,4	240	0,35
1,5 КА	5,6	128	0,24
2КА	7,2	128	0,28

Барієві магніти виготовляють у вигляді шайб і тонких дисків. Вони мають високу стабільність стосовно впливу зовнішніх

магнітних полів і не бояться тряски й ударів. Густина барієвого ферита $4,4...4,9 \text{ Мг/м}^3$, приблизно в $1,5...1,8$ разів менше густини литих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів ($\sim 7,3...7,8 \text{ Мг/м}^3$). Такі магніти виходять легкими й дешевими. Питомий опір барієвого фериту $10^4...10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тобто в 10^6 разів вище, ніж у литих металевих магнітотвердих сплавів. Магніти з барієвого фериту можна використовувати при високих частотах.

Кобальтові магніти характеризуються більшою температурною стабільністю в порівнянні з барієвими (дивись табл. 5.4). Вартість магнітів з кобальтових феритів вище, ніж барієвих.

Сплави на основі рідкоземельних елементів. Рідкоземельні елементи, що є металами (РЗМ), утворюють велику кількість бінарних сполук з металами перехідної групи, що мають гексагональну структуру. Їм властива сильна магнітна кристалографічна анізотропія й висока температура Кюрі. Найбільш висока намагніченість насичення спостерігається в сполук кобальту (табл. 5.5) з елементами першої половини ряду лантаноїдів. При температурі нижче деякого критичного значення ці сполуки метастабільні й розпадаються на дві фази, що є однією з причин появи високої коерцитивної сили в матеріалі.

Найпоширенішим способом виготовлення магнітів є їхнє спікання з порошків у присутності рідкої фази.

Таблиця 5.5 - Магнітні характеристики матеріалів на основі рідкоземельних елементів

Склад	H_c , кА/м	B_r , Тл	E_{\max} , кДж/м ³	T_k , °С
SmCo_5	560	0,92	75	725
PrCo_5	415	0,94	56	610
$\text{Sm}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Co}_5$	700	0,93	80	-

Питання для самоперевірки

1. Як класифікують речовини за магнітними властивостями?
2. Чим відрізняється обмінна взаємодія у феро- і антиферомагнетиків?
3. Чи можуть мати феромагнітні властивості сплави, що складаються з неферомагнітних елементів?

4. Чим обумовлені напрямки намагніченостей у доменах і розташування їхніх границь при відсутності зовнішнього магнітного поля?

5. Що розуміють під енергією природної магнітної кристалографічної анізотропії?

6. Які процеси відбуваються у феромагнетиків при його намагнічуванні зовнішнім полем? Що називають основною кривою намагнічування магнітного матеріалу?

7. Як залежить статична магнітна проникність феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля?

8. У чому полягає явище магнітострикції? Який його вплив на процес намагнічування феромагнетика?

9. Як змінюється індукція насичення феромагнетика при збільшенні температури?

10. Які причини появи магнітних втрат при циклічному перемагнічуванні феромагнетиків? Які способи зменшення магнітних втрат Вам відомі?

11. Чому змінний магнітний потік нерівномірно розподіляється по перетині суцільного магнітоводу? Як це позначається на значенні ефективної магнітної проникності сердечника?

12. Які матеріали називаються феритами?

13. Що таке точка компенсації й у яких матеріалах вона спостерігається?

14. У яких магнітних матеріалах і за яких умов можна створити циліндричні магнітні домени (ЦМД)? На чому засноване застосування ЦМД в обчислювальній техніці?

15. Як класифікують магнітні матеріали за властивостями і технічним призначенням?

16. Які магнітом'які матеріали мають високе значення магнітної проникності в слабких магнітних полях?

17. Який вплив домішки кремнію на властивості електротехнічної сталі?

18. Чим розрізняються властивості високонікелевого й низьконікелевого пермалоїв? Яка природа цих розходжень?

19. Чому ферити з високою початковою магнітною проникністю мають невисоку точку Кюрі?

20. Які частотні характеристики високопроникних і низькопроникних феритів?

21. У чому подібність і розходження магнітних властивостей

феритів і феромагнетиків?

22. Яка будова магнітодіелектриків і як вони використовуються?

23. Які магнітні матеріали мають прямокутну петлю гістерезису? Яке їхнє основне застосування?

24. Які фізичні ефекти лежать в основі застосування НВЧ-феритів?

25. Які матеріали мають сильно виражену магнітострикцію? Наведіть приклади практичного використання цього явища.

26. Назвіть найважливіші характеристики магнітотвердих матеріалів.

27. Як пояснюється наявність високої коерцитивної сили в магнітотвердих сплавах на основі Al-Ni-Fe?

28. Яким чином створюють текстуру в магнітах з фериту барію?

Задачі

1. При напруженості магнітного поля $H = 10^4$ А/м магнітна індукція у вісмуті $B = 12,564$ мТл. Визначити магнітну сприйнятливість χ_m речовини. Який висновок можна зробити про природу намагніченості?

2. Визначити питомі магнітні втрати на вихрові струми в сердечнику трансформатора, зібраному з листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм, якщо на сердечник впливає магнітний потік, що змінюється за синусоїдальним законом, із частотою 50 Гц і максимальною індукцією 0,5 Тл, обумовлений проходженням змінного струму i по обмотці. Питомий опір сталі прийняти рівним 0,5 мкОм·м.

Розв'язання

Вихрові струми $i_{в.стр}$ виникають у площині, розташованій перпендикулярно вектору магнітної індукції B . У збірному сердечнику трансформатора тонкий плоский лист довжиною l , висотою b і товщиною h (рис. 5.11) пронизується змінним магнітним потоком, спрямованим уздовж площини листа. У цьому випадку більші сторони кіп-турів вихрових струмів паралельні сторонам перетину листа.

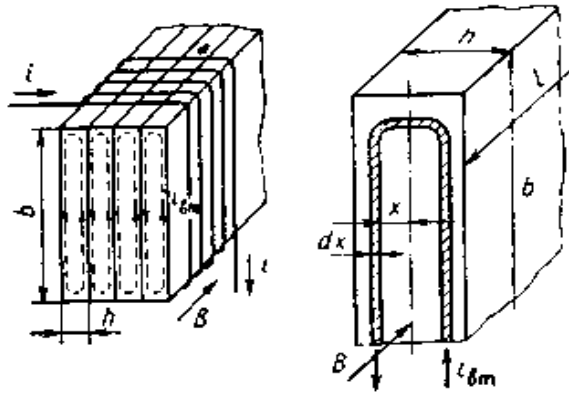


Рисунок 5.11 – Схема сердечника трансформатора

Виділимо в тілі листа порожній циліндр із основиною, обмеженою двома контурами вихрового струму. Більші сторони цих контурів відстоять від вертикальної осі перетину листа відповідно на x і $x + dx$. Тому що $h \ll b$, то можна вважати, що довжина великої сторони контуру вихрового струму дорівнює висоті листа b . Тоді магнітний потік, що пронизує порожнину циліндра, $\Phi_x = 2 x b B$. Діюче значення е.р.с., що індукується змінним потоком у стінці циліндра: $U_x = \omega \Phi_x = 4\pi f x b = 4\pi f x b B_m / \sqrt{2}$.

Втрати на вихрові струми в циліндрі: $dP_{вт} = U_x^2 d\sigma_x$, де $d\sigma_x$ - активна провідність виділеного циліндра.

З огляду на те, що поперечний переріз циліндра для вихрового струму дорівнює $l dx$, для провідності циліндра одержимо $d\sigma_x = l dx / (2b\rho)$. Звідси:

$$dP_{вт} = \frac{U_x^2 l}{2b\rho} dx = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} dx.$$

Потужність P_T , що виділяється за рахунок протікання вихрових струмів у всьому листі, знайдемо як суму елементарних потужностей, створюваних всіма контурами вихрових струмів. Інтегруючи, одержимо:

$$dP_{вт} = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} \int_0^{h/2} x^2 dx = \frac{\pi^2}{6} \frac{B_m^2 h^3 b l f}{\rho} = 1,643 f B_m^2 h^2 V / \rho, \text{ де } V = h b l - \text{об'єм}$$

листа.

Таким чином, питомі втрати на вихрові струми в сердечнику трансформатора $p = 1,643 f B_m^2 h^2 V / \rho = \frac{1,643 \cdot 0,25 \cdot 50 \cdot (3,5 \cdot 10^{-4})^2}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ Вт/м}^3$.

3. У сердечнику трансформатора на частоті 50 Гц втрати на гістерезис при індукції магнітного поля 0,1 і 0,5 Тл становлять 0,15 і

1,97 Вт/кг, відповідно. Визначити втрати на гістерезис на частоті 200 Гц при індукції магнітного поля 0,6 Тл.

Розв'язання

Втрати на гістерезис в одиниці об'єму феромагнетика визначаються виразом $P_r = \eta B_m^n f$. Звідси знаходимо:

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{\eta B_{m2}^n f}{\eta B_{m1}^n f} = \left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}} \right)^n; \quad n = \frac{\lg(P_{r2}/P_{r1})}{\lg(B_{m2}/B_{m1})} = \frac{\lg(1,97/0,15)}{\lg(0,5/0,1)} = 1,6; \quad \eta = \frac{P_r}{B_m^n f} = \frac{1,97}{(0,5)^{1,6} \cdot 50} = 0,12 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{Тл}^{1,6}).$$

Оскільки коефіцієнти n і η не залежать від частоти й магнітної індукції, відшуковані втрати $P_{r3} = 0,12(0,6)^{1,6} \cdot 200 = 10,6$ Вт/кг.

4. У сердечнику трансформатора питомі магнітні втрати на гістерезис і на вихрові струми при частоті 2 кГц рівні й становлять 2 Вт/кг. Визначити сумарні питомі магнітні втрати в сердечнику на частоті 400 Гц, якщо максимальна магнітна індукція в ньому та ж, що й на частоті 2 кГц.

5. На частоті 50 Гц питомі втрати на вихрові струми в сердечнику з електротехнічної сталі при індукції магнітного поля $B = 1,2$ Тл становлять 6,5 Вт/кг. Визначити втрати на вихрові струми в сердечнику на частоті 400 Гц при магнітній індукції 0,5 Тл, якщо маса сердечника $m = 0,5$ кг.

6. Знайти питомі магнітні втрати у феритовом сердечнику марки 2000 НН, що перемагнічується на частоті 0,1 МГц магнітним полем напруженістю $H_m = 4$ А/м, якщо в даних умовах $\text{tg}\delta_M = 0,2$, магнітна проникність $\mu = 2500$.

7. Кільцевий сердечник розмірами $R \times r \times h = 16 \times 8 \times 8$ мм, виготовлений з фериту марки 20000 НМ, на частоті 0,01 МГц має $\text{tg}\delta_M = 0,5$. На сердечник намотана обмотка з 20 витків. Знайти еквівалентний опір втрат у сердечнику в слабких магнітних полях.

8. Кільцевий феритовий сердечник масою $m = 0,1$ кг перемагнічується змінним магнітним полем напруженістю $H_m = 1$ кА/м частотою $f = 10^4$ Гц. Визначити потужність, виділювану в сердечнику, якщо магнітна проникність матеріалу $\mu = 1000$; $\text{tg}\delta_M = 2 \cdot 10^{-2}$; густина фериту $d = 4,5$ Мг/м³.

9. Котушка з феритовим тороїдальним сердечником діаметром 10 мм має індуктивність 0,12 Гн і містить 1000 витків. Визначити струм у котушці, при якому магнітна індукція в сердечнику дорівнює 0,1 Тл.

Глава 6 Резистори

Резистор - це один з найбільш широко розповсюджений навісний компонент радіоелектронної апаратури. Його **призначення** – здійснювати опір протіканню електричного струму.

Резистор характеризується зосередженим опором протіканню електричного струму, набагато більшим за опір підводячих струм провідників.

6.1 Основні параметри резисторів

Номінальний опір – це електричний опір, значення якого відповідає нормативній документації (ГОСТам, технічним умовам) і позначене на резисторі та є вихідним для відліку відхилень від цього значення.

Номінальний опір резистора звичайно вказують на електричних принципових схемах поряд з позиційним позначенням резистора.

Фактичний опір кожного екземпляра резистора може відрізнитися й відрізняється від номінального, але не більше ніж на величину **припустимого відхилення**. Промисловістю випускаються резистори з номінальним опором від часток Ома до декількох Мегаом. В радіоелектроніці для позначення номінальних опорів використовуються кратні Ому величини: 1 кілоом (кОм) = 10^3 Ом, 1 МегаОм (МОм) = 10^6 Ом, 1 ГигаОм (ГОм) = 10^9 Ом.

Всі значення номіналів резисторів розбиті на декади, а в межах кожної декади розподілені у відповідності зі стандартизованими рядами номіналів. Наприклад, для декади від одного до десяти Ом із припустимим відхиленням в 20 % значення номіналів: 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10. Ця послідовність чисел має позначення - ряд E6, тобто на інтервалі в одну декаду укладається шість номінальних значень. Для допустимого відхилення 10 % використовується ряд E12, який окрім зазначених вище номіналів включає додатково шість проміжних значень номіналів. Існують ряди номіналів E24, E48, E96, E192. Значення номіналів інших декад одержують шляхом множення номінальних значень першої декади на 10^n , де n - ціле позитивне або негативне число.

Припустиме відхилення характеризує ступінь розкиду, відхилення опору від номінального значення для резисторів даного

класу точності. Припустиме відхилення вказується в процентах від номіналу. Припустимі відхилення номіналів резисторів загального призначення досить великі - 20, 10, 5 %. Для високо прецизійних резисторів допуск на відхилення може досягати значень в 0,1%.

При протіканні електричного струму через резистор в ньому виділяється тепло, резистор нагрівається. Величина потужності, яку має розсіяти резистор, $P = I^2 R$. Звичайно нормується номінальне значення розсіюваної потужності.

Номінальна потужність розсіювання - це максимально допустима потужність у Ватах (Вт), що розсіюється на резисторі, при якій параметри резистора зберігаються у встановлених межах протягом тривалого часу, так званого терміну служби. Напруга на резисторі повинна не перевищувати номінальної величини $U_{\text{ном}} = \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R}$, де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність, Вт; R - опір, Ом.

Номінальну потужність розсіювання резисторів обирають з номінального ряду 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5 і т.д. Вт. Як показано на рис. 6.1, на принципових електричних схемах номінальну потужність розсіювання позначають умовно рисочками на зображенні резистора для потужностей менших 1 Ват й римськими цифрами при потужностях, вищих за 1 Ват.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) - відносна зміна опору резистора при зміні температури навколишнього середовища на 1°C.

Резистори можуть мати позитивний ТКО, коли опір резистора збільшується з ростом температури, і негативний ТКО, коли опір резистора зі зростанням температури зменшується. ТКО характеризує зворотні зміни опору резистора. Чим менший ТКО, тим краща температурна стабільність резистора.

ТКО може змінюватися в інтервалі температур. У деяких резисторів змінюється і знак ТКО. Великим номінальним опорам резистора відповідає більший ТКО.

Електрична міцність резистора характеризується граничною напругою, при якій резистор може працювати протягом терміну служби без електричного пробою. Гранична робоча напруга резистора залежить від атмосферного тиску, температури і вологості повітря.


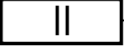

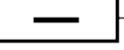

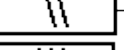
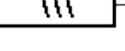
—  —	P = 5 Вт
—  —	P = 2 Вт
—  —	P = 1 Вт
—  —	P = 0,5 Вт
—  —	P = 0,25 Вт
—  —	P = 0,125 Вт
—  —	P = 0,05 Вт

Рисунок 6. 1 – Умовні позначення номінальної потужності розсіювання резисторів на принципових електричних схемах

Рівень власних шумів резистора визначається випадковими коливаннями різниці потенціалів, що виникають на резистивному елементі внаслідок флуктуацій об'ємної концентрації носіїв заряду і флуктуацій його електричного опору. Електрорушійна сила (е.р.с.) шумів дротяних резисторів, а також недротяних, до яких не прикладена напруга, при 20 °С в смузі частот Δf :

$$E_{\text{ш}} \approx 0,125\sqrt{\Delta f \cdot R},$$

де $E_{\text{ш}}$ – е.р.с. шумів, мкВ; Δf - смуга частот, кГц.

Рівень шумів недротяних резисторів, до яких прикладена постійна напруга U_0 , характеризується відношенням середньоквадратичного (ефективного) значення е.р.с. шумів $E_{\text{ш}}$ до напруги U_0 . За рівнем шумів стандартні недротяні резистори поділяються на дві групи. До першої відносяться резистори, рівень шумів яких не більше 1 мкВ/В, до другої - резистори, рівень шумів яких не більше 5 мкВ/В в смузі частот 60 Гц...6кГц.

Цей параметр відіграє істотну роль в електронних підсилювачах з великим коефіцієнтом підсилення.

Частотні властивості резистора визначаються номінальним опором і розподіленими реактивними (паразитними) параметрами (індуктивністю і ємністю). Активний опір резистора на змінному струмі залежить як від його номінального опору, так і від його ємності і індуктивності. В свою чергу, власна розподілена ємність і індуктивність резистора залежать від його форми і числа витків спіральної нарізки резистивного елементу. У високоомних резисторів

активний опір зменшується з підвищенням частоти. Повний опір низькоомних резисторів, які не мають нарізки резистивного елементу, із зростанням частоти зростає і на частоті резонансу досягає максимуму.

Вольт-амперна характеристика резистора

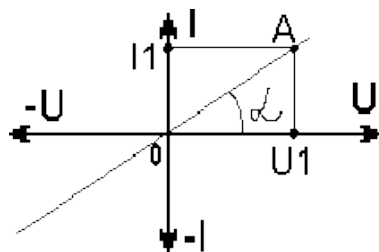


Рисунок 6.2 - Вольт - амперна характеристика (ВАХ) лінійного резистора

Поводження резистора при включенні його в електричний ланцюг характеризується його електричними параметрами й характеристиками. Функціональна залежність між величиною прикладеної напруги й значенням електричного струму, що протікає через резистор відповідно до закону Ома, називається вольт - амперною характеристикою (ВАХ) (рис. 6.2).

Якщо до резистора прикладена позитивна напруга, струм протікає у позитивному напрямку. При зміні полярності прикладеної напруги, напрямок струму також змінюється на протилежний.

6.2 Класифікація резисторів

За виглядом вольт-амперної характеристики розрізняють резистори лінійні (з лінійною вольт - амперною характеристикою, рис. 6.2) і нелінійні (ВАХ має нелінійний характер) постійного і змінного опору.

У нелінійних резисторах в якості струмопровідного елементу застосовуються різні напівпровідникові матеріали.

За конструкцією резистори поділяються на плівкові, об'ємні і дротяні, а **за матеріалом** струмопровідного (резистивного) елементу - на плівкові, вуглецеві, метало-плівкові, метало-окисні, метало-діелектричні, композиційні і напівпровідникові.

За способом захисту резистивного елементу розрізняють резистори неізолювані, ізолювані (лаковані), компаундовані, опресовані пластмасою, герметизовані і вакуумовані.

За призначенням резистори поділяються на резистори загального і спеціального застосування. До резисторів загального застосування не ставляться підвищені вимоги відносно точності їх виготовлення і стабільності параметрів. До резисторів спеціального застосування можна віднести резистори підвищеної стабільності, високочастотні, високомегаомні, а також резистори для мікромодулів і мікросхем.

6.3 Резистори постійного опору

Вуглецеві резистори. Резистивний елемент цих резисторів є тонкою плівкою вуглецю, осажену на основу з кераміки. В якості основи звичайно використовуються стрижні або трубки. Вуглецеві резистори характеризуються високою стабільністю опору, низьким рівнем власних шумів, невеликим негативним ТКО, слабкою залежністю опору від частоти і прикладеної напруги. Боровуглецеві резистори типу БЛП за стабільністю опору можуть не поступатися дротяним резисторам. ТКО цих резисторів - $(0,012...0,025)\%/^{\circ}\text{C}$.

Композиційні резистори. Резистивний елемент цих резисторів виготовляють на основі композицій, що складаються з суміші порошкоподібного провідника (сажа, графіт та ін.) і органічного або неорганічного діелектрика. Композиційні резистори випускають плівкові та об'ємні. Плівкові композиційні резистори за конструкцією подібні вуглецевим, але відрізняються більшою товщиною плівки. Об'ємні резистивні елементи виготовляють у вигляді стрижня шляхом пресування композиційної суміші, плівкові - шляхом нанесення композиційної суміші на ізоляційну основу.

Плівкові композиційні резистори характеризуються сильною залежністю опору від напруги, низькою стабільністю параметрів і дуже високою надійністю. Об'ємні композиційні резистори з органічними пов'язуючими матеріалами відрізняються високою стабільністю параметрів, порівняно низькою надійністю і зниженим рівнем власних шумів, а з неорганічними пов'язуючими матеріалами - дуже високою надійністю, низькою стабільністю опору при зміні частоти до 50 кГц. Опір цих резисторів практично не залежить від напруги.

Металоплівкові резистори містять резистивний елемент у вигляді дуже тонкої (десяті долі мікрметра) металевої плівки, осаженної на основу з кераміки, скла, шаруватого пластика, ситалу

або іншого ізоляційного матеріалу. Металоплівкові резистори характеризуються високою стабільністю параметрів, слабкою залежністю опору від частоти і напруги та високою надійністю. Недоліком деяких металоплівкових резисторів є знижена надійність при підвищеній номінальній потужності, особливо при імпульсному навантаженні. ТКО резисторів типів ОМЛТ не перевищує 0,02. Рівень шумів резисторів групи А не більше за 1мкВ/В, групи Б- не більше за 5мкВ/В.

Для виготовлення тонкоплівкових резисторів звичайно потрібні плівки з поверхневим опором 500...1000 Ом. У якості резистивних матеріалів найбільш часто використовують тугоплавкі метали (вольфрам, молібден, тантал, реній, хром) і сплав нікелю із хромом. Плівкові резистори із чистих металів мають ту перевагу, що вони постійні за складом й тому легше забезпечується однорідність їхньої структури. А це, у свою чергу, приводить до підвищеної стабільності електричних параметрів. Деякі характеристики резистивних плівок з тугоплавких металів наведені на рис. 6.3.

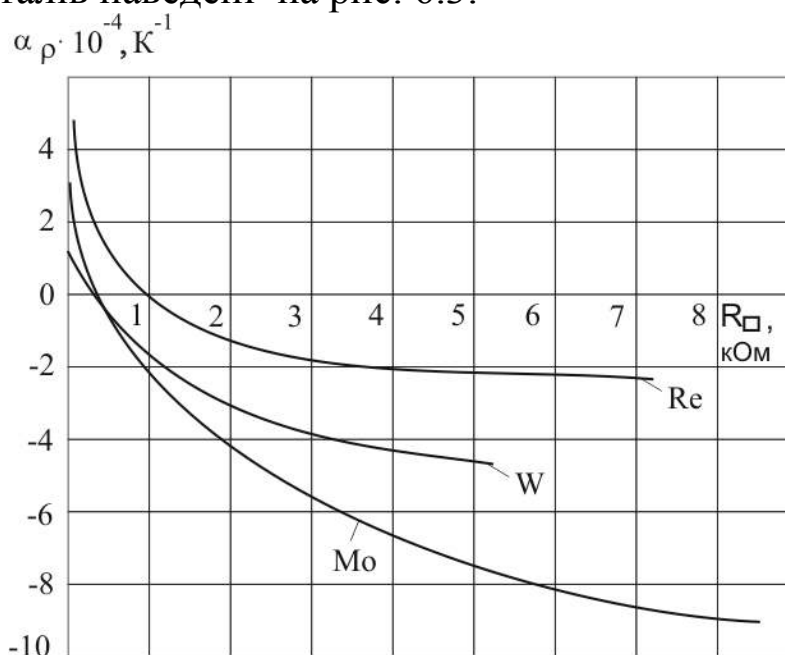


Рисунок 6.3 – Взаємозв'язок між електричними параметрами резистивних металевих плівок

Металоокисні резистори виготовляються на основі оксидів металів, найчастіше двоокису олова. За конструкцією вони не відрізняються від металоплівкових, характеризуються середньою стабільністю параметрів, слабкою залежністю опору від частоти і напруги, високою надійністю.

Дротяні резистори постійного опору звичайно виконують на циліндричній ізоляційній основі з одно- або багат шаровою обмоткою. Дріт і контактні вузли захищають, як правило, емалевими покриттями. Дротяні резистори характеризуються високою стабільністю опору, низьким рівнем власних шумів, великою допустимою потужністю розсіяння, високою точністю опору. Ці резистори мають порівняно великі паразитні реактивні параметри і тому застосовуються лише на порівняно низьких частотах. Як обмотувальні дроти використовуються дроти високого опору. Для зменшення паразитних параметрів дротяних резисторів застосовують намотування спеціальних видів.

6.4 Терморезистори

Терморезистор - це лінійний або нелінійний резистор, опір (провідність) якого значно залежить від температури.

Таку властивість мають і метали, і напівпровідники.

Терморезистори з платини, міді і інших металів виготовляють у формі дроту діаметром 0,04...0,08мм, біфілярно намотаною на ізоляційний каркас і поміщеною в герметичний корпус. Такі терморезистори мають невеликий температурний коефіцієнт опору (0,4...0,5 %/°C) і значні габаритні розміри.

Терморезистори на основі напівпровідників мають достатньо великий опір, в порівнянні з металевими, менші габаритні розміри (десяті долі міліметра) і в 10...20 разів більший ТКО. Вони простіші за конструкцією і надійніші в експлуатації. Тому напівпровідникові терморезистори мають ширше застосування.

Із зростанням температури опір металу збільшується (див. п. 2.1), що пояснюється збільшенням розсіяння вільних електронів на теплових коливаннях решітки. Тому температурний коефіцієнт опору металевих терморезисторів позитивний.

Більшість напівпровідникових терморезисторів мають негативний температурний коефіцієнт опору, що зі зростанням температури питомий опір напівпровідників зростає (див. п. 3.2, рис. 3.8).

Для виготовлення терморезисторів застосовують оксидні напівпровідники Mn_3O_4 , Co_3O_4 , CoO , CuO , кобальтово-марганцеві, мідно-марганцеві і ін.

Терморезистори застосовуються для вимірювання і регулювання температури, температурної компенсації різних елементів електричних ланцюгів, в схемах стабілізації напруги, рівня сигналу на виході підсилювача і інших цілей. Залежно від цього вони діляться на наступні групи:

- 1) терморезистори для вимірювання і регулювання температури;
- 2) термокомпенсатори;
- 3) терморезистори для теплового контролю;
- 4) терморезистори для стабілізації напруги;
- 5) вимірювальні терморезистори (термістори), зокрема, болометри (для індикації і вимірювання теплового випромінювання).

Конструктивно робочий елемент терморезистора робиться у вигляді пластин, стрижнів, трубок, кульок або дроту для металевих терморезисторів. Робочий елемент захищається вологостійким покриттям, скляним, металевим або металоскляним герметичним корпусом. Терморезистори можуть бути з прямим підігрівом (за рахунок протікаючих через них струмів) або з непрямим підігрівом (за рахунок спеціального підігрівуючого елемента).

Маркування терморезисторів визначається матеріалом робочого тіла, параметрами, особливостями конструкції, наприклад:

КМТ - кобальтовомарганцевий терморезистор;

ММТ - мідно-марганцевий терморезистор;

СТ1-21 - резистор термокерований (1-кобальтомарганцеве, 3-мідно-кобальтомарганцеве; 21 - номер розробки);

ТКП - терморезистор з непрямим підігрівом;

ТКПМ - те ж, але малогабаритний; матеріалом служать оксиди титану, ванадію і заліза.

При розробці практичних схем з використанням терморезисторів враховуються не тільки залежності ВАХ, опору і інших параметрів від температури самих терморезисторів, але і подібні залежності додаткових опорів, шунтів, регульованих елементів.

6.5 Варістори

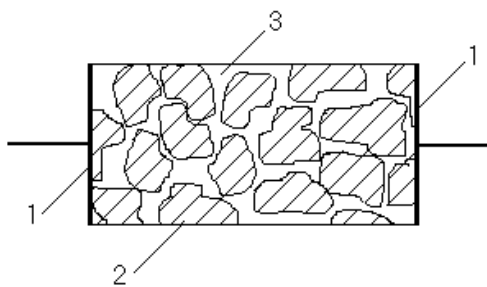
Варістор - це нелінійний напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.

Залежність опору від напруги спостерігається у ряду оксидів і сульфідів металів, діборіта титану, карбіду кремнію і у багатьох матеріалів складного складу. Для виготовлення варісторів найчастіше застосовують технічний карбід кремнію (SiC – див. п. 3.9) різних аллотропічних модифікацій у вигляді порошку, змішаного із спеціальною пов'язуючою діелектричною речовиною (зв'язкою). Як зв'язку застосовують кераміку, рідке скло, кремнійорганічні лаки і інші матеріали. Карбід кремнію, зв'язаний керамікою, називають **тиритом**. Матеріал з скляною зв'язкою називають **вілітом**, а з ультрофарфорової - **летіном**.

Маркування варісторів розшифровується таким чином: СН - опір нелінійний; перша цифра позначає матеріал (1 - карбід кремнію, 2 - селен); друга цифра - тип конструкції (1 або 8 - стрижньовий, 2,6,7,10 - дисковий, 3 - мікромодульний); третя - порядковий номер розробки; далі указується класифікаційна напруга у вольтах і його допустимий розкид у відсотках.

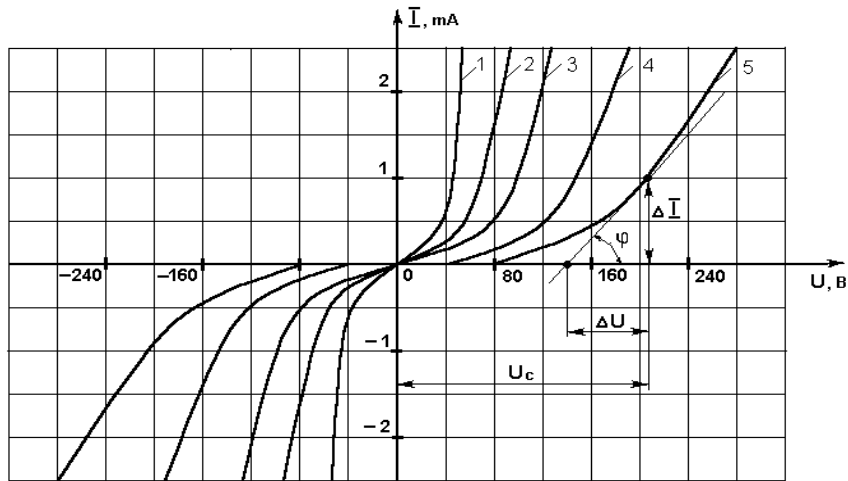
Наприклад: СН1-1-1-820 10 %. Розшифровка: опір нелінійне з карбіду кремнію стрижньового типа першої розробки, розраховане на роботу при класифікаційній напрузі 820 В з розкидом 10 %.

Робоча область варістора (рис. 6.4) складається з полікристалів карбіду кремнію або іншого напівпровідника, розділених діелектричною зв'язкою.



1-електроди; 2-зерна карбіду кремнію, 3-пов'язуючий матеріал
Рисунок 6.4 - Структура робочого тіла варістора

Під дією прикладеної напруги в локальних місцях зіткнення окремих зерен карбіду кремнію або в оксидних плівках на поверхні зерен розвиваються теплові ефекти або ефекти сильного поля (лавинний або тунельний пробій). При збільшенні густини струму і виділюваної потужності можливий перехід ефектів сильного поля в теплові ефекти. Із-за нерегулярності площі і опорів контактів зерен, варістор має нелінійну і практично симетричну ВАХ (рис. 6.5).



1 - СН1-2-1-56 \pm 20%; 2 - СН1-2-1-82 \pm 20 %; 3 - СН1-2-1-120 \pm 10 %; 4 - СН1-2-1-180 \pm 10 %; 5 - СН1-2-1-270 \pm 10 %

Рисунок 6.5 - Вольт - амперні характеристики варисторів.

Основне призначення варисторів - захист елементів електричних ланцюгів постійного, змінного і імпульсного струмів від перенапружень; захист контактів реле руйнування і обмоток від пробою. Варистори застосовують також для регулювання і стабілізації різних ланцюгів і блоків РЕА, для поліпшення їх перешкодостійкості та інших важливих функцій.

6.6 Маркування резисторів

На кожному недротяному резисторі вказуються номінальний опір, допустимі відхилення опору від номінального і тип резистора. Якщо рівень шумів резистора менше 1 мкВ/В, на ньому ставиться буква А. Резистори постійного опору позначаються буквою С, змінного - буквами СП. Цифра, що стоїть після букв, позначає: 1 - вуглецевий, 2 - металоплівковий або металоокисний, 3 - плівковий композиційний, 4 – об'ємний композиційний, 5 - дротяний. Після дефіса позначається номер розробки резистора.

Старі позначення типів резисторів складаються з букв. Перша буква звичайно позначає вид резистивного елементу: У - вуглецевий, К - композиційний, М - металоплівковий, Б - боровуглецевий.

Кодовані позначення номінального опору резисторів складаються з цифр, що позначають номінальний опір, і букви, що позначає одиницю вимірювання опору. Опори до 100 Ом виражаються в Омах і позначаються буквою Е, опори від 100 Ом до

100 кОм - в кілоомах і позначаються буквою К, а опори від 100 кОм до 100 МОм - в мегаомах і позначаються буквою М. Ці букви стоять на місці коми десяткового дробу, який виражає значення опору. Якщо значення номінального опору виражається цілим числом, то буква, що позначає одиницю вимірювання, ставиться після нього. Наприклад, 4К7 - опір 4 кОм 700 Ом, 47К - опір 47 кОм. Якщо значення номінального опору виражається десятковим дробом, меншим одиниці, то нуль цілих і кома з маркування виключаються і буква, що позначає одиниці вимірювання, стоїть перед числом, наприклад, К47 – опір 0,47 кОм, тобто 470 Ом.

Допустимі відхилення опору від номінального позначаються буквами (табл.6.1). Номінальна потужність вказується тільки на недротяних резисторах великих габаритів. Номінальна потужність малогабаритних резисторів визначається за розміром корпусу.

Колірне маркування. На постійних резисторах допускається маркування кольоровим кодом, знаками у вигляді кольорових смуг або кругів (рис. 6.6, табл. 6.2). При маркуванні кольоровим кодом номінальний опір резисторів в омах визначається двома або трьома цифрами (у випадку трьох цифр остання не дорівнює нулю) і множником 10^n , де n - ціле число від - 2 до + 9. Маркувальні знаки зсунуті до одного з торців резистора, наприклад, до лівого, і потім розташовуються зліва направо в наступному порядку: перша смуга - перша цифра номіналу, друга смуга - друга цифра номіналу, третя смуга - третя цифра номіналу, що не дорівнює нулю, четверта смуга - множник, п'ята смуга - допуск на відхилення.

Таблиця 6.1 - Кодовані позначення допустимих відхилень ємності і опору від номінальних значень

Допустиме відхилення, %	Кодоване позначення	Допустиме відхилення, %	Кодоване позначення
±0,1	Ж	±30	Ф
±0,2	У	від +50 до -10	Э
±0,5	Д	від +50 до -20	Б
±1	Р	від +80 до -20	А
±2	Л	+100	Я
±5	И	від +100 до -10	Ю
±10	С	±0,4	Х
±20	В		

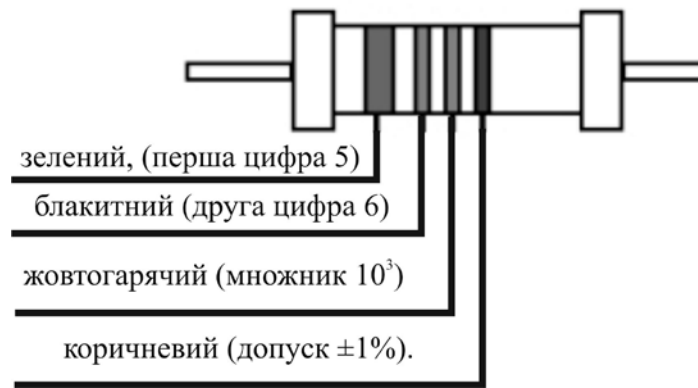


Рисунок 6.6 - Колірне маркування резистора з номінальним опором 56 кОм та з допуском на відхилення 1%

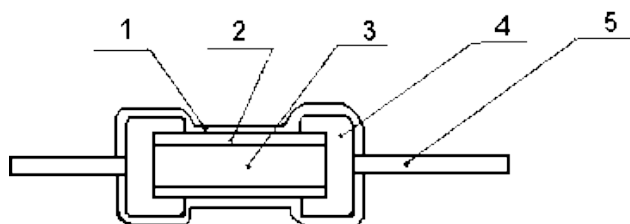
У тих випадках, коли значення номіналу опору резистора містить тільки дві значущі цифри, третя смуга номіналу не наноситься й загальна кількість знаків (кольорових смуг) скорочується до чотирьох, дві цифри - номінали, множник і допуск. Якщо розміри резистора не дозволяють розташувати кольорові смуги несиметрично, тобто ближче до одного з торців резистора, то площа першого знака (ширина першої смуги) робиться приблизно у два рази ширшою за інші знаки.

Таблиця 6.2. - Кольори маркування номінального опору й допусків резисторів

Колір	Номінальний опір, Ом				Допуск, %
	1-ша цифра	2-га цифра	3-тя цифра	Множник	
Сріблястий	-	-	-	10^{-2}	10
Золотавий	-	-	-	10^{-1}	5
Чорний	-	0	-	1	-
Коричневий	1	1	1	10	1
Червоний	2	2	2	10^2	2
Жовтогарячий	3	3	3	10^3	-
Жовтий	4	4	4	10^4	-
Зелений	5	5	5	10^5	0,5
Блакитний	6	6	6	10^6	0,25
Фіолетовий	7	7	7	10^7	0,1
Сірий	8	8	8	10^8	0,05
Білий	9	9	9	10^9	-

6.7 Конструкції та монтаж резисторів

Конструкція постійного недротового резистора МЛТ (Металізований Лакований Теплостійкий) містить циліндричну керамічну основу у вигляді трубки або стрижня, на яку нанесений тонкий металізований шар плівки зі спеціального резистивного матеріалу (рис. 6.7). Товщина плівки становить частки мікрметра при усіх номіналах. Розходження у величинах номіналів опору досягається зміною складу резистивного шару й числа витків спіралі, нарізаної на циліндричній поверхні керамічної основи. На протилежних кінцях керамічної основи розташовані металеві ковпачки з осьовими дротовими виводами. За допомогою цих виводів резистор припаюють в електричну схему. З зовнішнього боку для захисту струмоведучого резистивного шару й усього резистора від впливу вологи й від механічних пошкоджень наноситься шар вологостійкої органічної емалі. Найчастіше для резисторів типу МЛТ використовується емалеве покриття червоного кольору, на поверхню якого наноситься маркування резистора.



1 - зовнішнє вологостійке емалеве покриття; 2 - резистивна плівка, струмопровідний шар; 3 - керамічна основа; 4 - металевий ковпачок; 5 - осьові металеві виводи

Рисунок 6.7 - Конструкція резистора типу МЛТ

Розміщення або компонування резисторів і їхній монтаж на друкованій платі є однією з найважливіших складових радіоконструювання. Промислові резистори, що випускаються промисловістю, звичайно мають виводи, орієнтовані в осьовому напрямку, як показано на рис. 6.6. За формою виводи, як правило, круглі, але в деяких резисторів, наприклад, типу ВР, бувають і плоскі. Виводи резисторів вставляють в отвори контактних площадок друкованої плати. Перед установкою їх деформують або згинають і

лудять. Мінімальна відстань від корпусу резистора до місця вигину має бути не менше п'яти міліметрів (рис. 6.8).

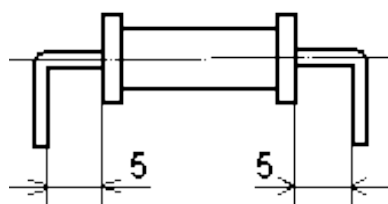
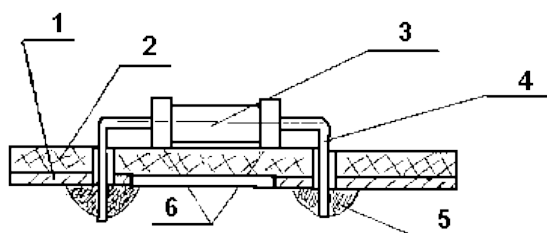


Рисунок 6.8 – Геометрія вигину виводів резистора для монтажу на друкованій платі

Резистори на друкованій платі розміщують або горизонтально, або вертикально, але не похило. У процесі формування виводи бажано відгинати так, щоб нанесене на корпус маркування резистора після установки його на друковану плату було зручно читати, тобто воно має бути зверху, а не під резистором. При такому розташуванні маркування легше перевіряти якість монтажу й зручніше виконувати ремонтні роботи, пов'язані із заміною радіоелементів. Резистор може розташуватися, спираючись на друковану плату, як показано на рис. 6.9, тобто торкаючись корпусом друкованої плати.



1 - шар мідної фольги; 2 - стеклотекстолітова або гетинаксова основа плати; 3 - резистор; 4 - вивод резистора; 5 - припій

Рисунок 6.9 - Розміщення резистора на друкованій платі.

У тих випадках, коли необхідно забезпечити кращий тепловідвід, або, коли резистор працює при підвищеній робочій напрузі, а також з міркувань безпеки необхідно уникнути електричного пробоя, резистор розташовують над друкованою платою, як показано на рис. 6.10.

На принциповій електричній схемі таке підняте положення резисторів супроводжується значком "!". Щоб резистор після установки його на друковану плату не "провалився" в отвір перед

пайкою, його виводи формують одним з наведених на рис. 6.10, 6.11, способів.

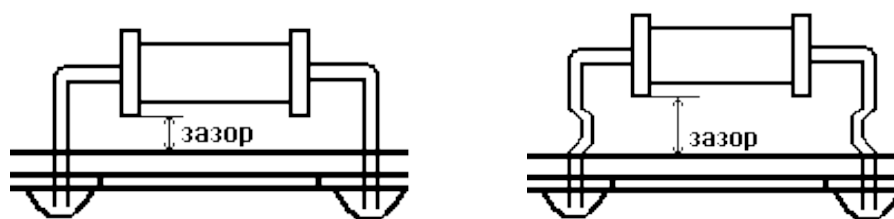
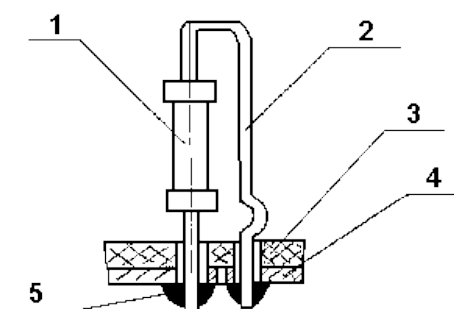


Рисунок 6.10 – Розташування резисторів над друкованою платою

Поряд з горизонтальним розміщенням резисторів й інших радіоелементів на друкованій платі іноді використовують вертикальне розташування резистора, що є варіантом переходу від площинного до об'ємного монтажу (рис. 6.12).



Рисунок 6.11 – Способи монтажу резисторів над друкованою платою



1 - резистор; 2 - вивід резистора; 3 - стеклотекстолітова основа плати;
4 - шар фольги; 5 - припій

Рисунок 6.12 - Вертикальне розташування резистора на платі

Розташування резисторів над друкованою платою також дозволяє забезпечити більш компактний монтаж за рахунок скорочення відстані між монтажними отворами: як видно з рис. 6.10, відстань між отворами може бути набагато менше поздовжнього розміру самого резистора. Форма виводів, яку показано на рис. 6.10, має ту перевагу перед прямою формою (рис.6.8), що дозволяє

забезпечити гарантовану величину зазору над поверхнею плати й одночасно тверду фіксацію резистора перед пайкою.

6.8 Можливі несправності резисторів

Працездатність радіоелектронної апаратури забезпечується установкою в схему радіоелементів потрібних номіналів.

Свій негативний внесок у непрацездатність схеми можуть вносити й резистори. Основні несправності, які можуть виникати в резисторах:

- помилкове або неправильне маркування резисторів, коли на корпусі резистора нанесене одне значення номіналу опору, в той час як реальний або фактичний опір є зовсім іншим;

- обрив струмоведучої поверхні резистора за рахунок мікротріщин на керамічній підкладці резистора. Цей дефект часто візуально не спостерігається, тому що маскується зовнішнім захисним шаром лакового покриття;

- відшарування металевого ковпачка від поверхні резистивного шару - обривається ланцюг;

- обрив ланцюга через надмірний температурний перегрів (перегорання) струмоведучого шару резистора. Дефект візуально виявляється внаслідок потемніння (почерніння) лакового захисного покриття резистора;

- окислювання виводів резистора. Якщо в процесі пайки не лудити виводи, що окислилися, то це може спричинити виникнення дефекту типу "обрив ланцюга", особливо в струмонавантажених ланцюгах і при тривалій експлуатації апарата в різнопогодних умовах;

- коротке замикання між виводами резистора.

Всі перелічені дефекти досить легко виявляються за допомогою омметра.

Питання для самоперевірки

1. Що таке вольт - амперна характеристика резистора?
2. Які резистори називаються лінійними?
3. Принцип роботи напівпровідникового терморезистора.
4. Основні характеристики терморезистора.
5. Основні параметри напівпровідникового терморезистора.
6. Області застосування терморезистора.

7. Фізичні основи роботи варісторів.
8. Навести приклади дешифрування маркування різних типів варісторів.
9. Основні параметри й характеристики варісторів.
10. Як зображається на принциповій схемі позиційне позначення резистора?
11. Як графічно позначається на схемі припустиме значення потужності, що розсіюється резистором?
12. Що означають при маркуванні букви М, К, що наносяться на корпус резистора перед цифровим позначенням номіналу резистора, після цифрового позначення а також між цифрами номіналу?
13. Що позначають кольорові смуги на корпусі резистора? Скільки буває кольорових смуг? Як вони розташовуються?
14. Як практично виявити несправність резистора типу "обрив ланцюга"?
15. Які несправності (дефекти) може мати резистор? Які причини їхнього виникнення?
16. Як розміщують резистори при їхньому монтажі на друкованій платі: а) горизонтально?, б) вертикально?, в) похило?

Задачі

1. У схемі виявився несправним резистор $R = 68 \text{ Ом}$. В розпорядженні є резистори з номіналами опорів від 100 Ом і вище й з допуском 20% . Які треба підібрати номінали опорів двох резисторів, щоб замінити несправний резистор? Як ці резистори мають бути з'єднані?
2. Для трьох послідовно з'єднаних резисторів $R_1 = 47 \text{ Ом}$, $R_2 = 68 \text{ Ом}$ і $R_3 = 91 \text{ Ом}$ розрахувати розподіл напруг між ними, якщо вхідна напруга дорівнює 100 В .
3. Розрахувати кількість резисторів, що входять до касети, якщо діапазон їхніх номіналів від 1 Ом до 1 МОм включно, а допуски на відхилення від кожного номіналу а) 20% , б) 10% , в) 5% .

Глава 7. Конденсатори

Конденсатор — це елемент електричного кола, що складається із провідних електродів (обкладинок), розділених діелектриком.

Функція конденсатора – накопичувати енергію електричного поля. Ця його властивість кількісно характеризується його ємністю.

Ємність конденсатора - це відношення заряду конденсатора до різниці потенціалів, яка наводить заряд на обкладинки конденсатора: $C=q/U$, де C — ємність, Ф; q — заряд, Кл; U - різниця потенціалів на обкладинках конденсатора, В.

За одиницю ємності в Міжнародній системі одиниць вимірювань приймають фараду - ємність такого конденсатора, у якого потенціал зростає на 1 В при наведенні на його обкладинках заряду 1 Кл. Для практичних цілей фарада занадто велика, тому на практиці використовують її частки - мікрофараду (мкФ), нанофараду (нФ) і пікофараду (пФ): $1\text{Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^9 \text{ нФ} = 10^{12} \text{ пФ}$.

Як діелектрик у конденсаторах використовуються органічні й неорганічні матеріали, у тому числі оксидні плівки деяких металів (табл. 7.1).

Таблиця 7.1. Відносні діелектричні проникності деяких матеріалів

Матеріал	ϵ	Матеріал	ϵ
Повітря	1,0006	Конденсаторний папір	3,5...6,5
Кварц	2,8	Триацетат і ацетобутират	3,5...4,0
Скло	4...16	Полікарбонат	2,8...3,0
Слюда	6...8	Поліетилентерефталат	3,2...3,4
Склоемаль	10...20	Поліпропілен	2,2...2,3
Склокераміка	15...450	Полістирол	25
Кераміка	12...230	Політетрафторетилен (фторопласт)	2...2,1
Сегнетокераміка	900...80000	Оксидні плівки	10...46

При прикладенні до конденсатора постійної напруги відбувається його зарядження; при цьому витрачається певна робота,

що виражається в джоулях (Дж). Вона дорівнює запасеній потенційній енергії $W = CU^2/2$.

Для порівняння конденсаторів використовують питомі характеристики, що є відношенням основних характеристик конденсатора до його об'єму V або маси m .

7.1 Класифікація конденсаторів

За призначенням конденсатори розділяються на дві групи: загального й спеціального призначення.

Група загального призначення містить у собі широко застосовувані конденсатори, використовувані практично в більшості видів і класів апаратури. Традиційно до неї відносять найпоширеніші низьковольтні конденсатори, до яких не ставляться особливі вимоги.

Всі інші конденсатори є спеціальними. До них належать: високовольтні, імпульсні, перешкодопридушуючі, дозиметричні, пускові й ін.

За характером зміни ємності розрізняють конденсатори постійної ємності, змінної ємності й підлаштувані. **Конденсатори постійної ємності** – такі конденсатори, ємність яких є фіксованою й у процесі експлуатації не регулюється. **Конденсатори змінної ємності** допускають зміну ємності в процесі функціонування апаратури. Керування ємністю може здійснюватися механічно, електричною напругою (**варіконди**) і температурою (термоконденсатори). Їх застосовують для плавного настроювання коливальних контурів, у ланцюгах автоматики й т.п. Ємність **підлаштуваних конденсаторів** змінюється при разовому або періодичному регулюванні й не змінюється в процесі функціонування апаратури. Їх використовують для підлаштування й вирівнювання початкових ємностей сполучених контурів, для періодичного підлаштування й регулювання ланцюгів схем, де потрібна незначна зміна ємності й т.п.

За способом захисту від зовнішніх факторів - незахищені; захищені; неізолювані; ізолювані; ущільнені; герметизовані.

Незахищені конденсатори допускають експлуатацію в умовах підвищеної вологості тільки в складі герметизованої апаратури. Захищені конденсатори допускають експлуатацію в апаратурі будь-якого конструктивного виконання. **Неізолювані конденсатори** (з покриттям або без покриття) не допускають торкання своїм корпусом

шасі апаратури. Навпроти, **ізолювані** конденсатори мають досить гарне ізоляційне покриття (компаунди, пластмаси й т.п.) і допускають торкання корпусом шасі або струмоведучих частин апаратури. **Ущільнені конденсатори** мають ущільнену органічними матеріалами конструкцію корпусу. **Герметизовані конденсатори** мають герметичну конструкцію корпусу, що виключає можливість взаємодії навколишнього середовища з його внутрішнім простором. Герметизація здійснюється за допомогою керамічних і металічних корпусів або скляних колб.

За способом монтажу - конденсатори можуть виконуватися для друкованого й для навісного монтажу, а також для використання в складі мікромодулів і мікросхем або для з'єднання з ними. Виводи конденсаторів для навісного монтажу можуть бути тверді або м'які, аксіальні або радіальні із дроту круглого перетину або стрічки, у вигляді пелюстків, з кабельним вводом, у вигляді прохідних шпильок, опорних гвинтів і т.п. У конденсаторів для мікросхем і мікромодулів, а також НВЧ конденсаторів як виводи можуть використовуватися частини їхньої поверхні. У більшості типів оксидних, а також прохідних і опорних конденсаторів одна з обкладинок з'єднується з корпусом, що служить другим виводом.

За видом діелектрика конденсатори розділяють на 4 групи (табл. 7.2).

Конденсатори з газоподібним діелектриком

За виконуваною функцією й характером зміни ємності ці конденсатори розділяються на постійні й змінні. Як діелектрик у них використовується повітря, стиснений газ (азот, фреон, елегаз), вакуум. Особливістю газоподібних діелектриків є мале значення тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta \leq 10^{-5}$) і висока стабільність електричних параметрів. Тому основною областю їхнього застосування є високовольтна й високочастотна апаратура.

Вакуумні конденсатори є найбільш поширеними з конденсаторів з газоподібним діелектриком в радіоелектронній апаратурі. У порівнянні з повітряними вони мають значно більші питомі ємності, менші втрати в широкому діапазоні частот, більш високу електричну міцність і стабільність параметрів при зміні навколишнього середовища. У порівнянні з газонаповненими, що вимагають періодичного підкачування газу через його витік, вакуумні конденсатори мають більш просту й легку конструкцію, менші втрати

й кращу температурну стабільність; вони більш стійкі до вібрації, допускають більш високе значення реактивної потужності.

Таблиця 7.2 – Класифікація конденсаторів за видом діелектрика

Вид діелектрика	Тип конденсаторів
1. Газоподібний	Вакуумні
	Газонаповнені
	З повітряним діелектриком
2. Оксидний	Перешкодопридушуючі
	Пускові
	Імпульсні
	Високочастотні
	Неполярні
	Загального призначення
3. Неорганічний	Низьковольтні, типів; 1, 2, 3
	Високочастотні, типів; 1, 2
	Перешкодопридушуючі
	Нелінійні
4. Органічний	Низьковольтні низькочастотні
	Низьковольтні високочастотні
	Високочастотні постійної напруги
	Високочастотні імпульсні
	Дозиметричні
	Перешкодопридушуючі

Вакуумні конденсатори змінної ємності мають мале значення моменту обертання, а маса й габарити їх значно нижче в порівнянні з повітряними конденсаторами. Коефіцієнт перекриття по ємності вакуумних змінних конденсаторів може досягати 100 і більше.

Вакуумні конденсатори застосовуються в передавальних пристроях довго-, середньо- і короткохвильового діапазонів на частотах до 30...80 МГц у якості контурних, блокувальних, фільтрових і розділових конденсаторів. Вони використовуються також як накопичувачі в імпульсних штучних лініях формування й різного роду потужних високочастотних високочастотних установках.

Конденсатори з оксидним діелектриком

Стара назва цих конденсаторів – електролітичні. Як діелектрик у них, використовується оксид, утворений електрохімічним шляхом на аноді — металевій обкладці з деяких металів. Залежно від матеріалу анода оксидні конденсатори підрозділяють на алюмінієві, танталові й ніобієві. Другою обкладкою конденсатора — катодом служить електроліт, що просочує прокладку з паперу або тканини в оксидно-електролітичних (рідинних) алюмінієвих і танталових конденсаторах. В танталових об'ємно-пористих конденсаторах катодом служить рідкий або гелеподібний електроліт, а в оксидно-напівпровідникових конденсаторах - напівпровідник (двоокис марганцю).

Конденсатори з оксидним діелектриком — низьковольтні, з відносно великими втратами, але на відміну від інших типів низьковольтних конденсаторів мають незрівнянно більші заряди й більші ємності (від одиниць до сотень тисяч мікрофарад). Вони використовуються у фільтрах джерел електроживлення, ланцюгах розв'язки, шунтувальних і перехідних ланцюгах напівпровідникових пристроїв на низьких частотах і т.п.

Конденсатори групи **загального призначення** мають уніполярну (однобічну) провідність, внаслідок чого їхня експлуатація можлива тільки при позитивному потенціалі на аноді. Проте, це найпоширеніші оксидні конденсатори. Вони можуть бути рідинними, об'ємно-пористими й оксидно-напівпровідниковими.

Неполярні конденсатори з оксидним діелектриком можуть включатися в ланцюг постійного і пульсуючого струму без врахування полярності, а також допускати зміну полярності в процесі експлуатації. Неполярні конденсатори виробляють оксидно-електролітичними (рідинними) алюмінієвими й танталовими, а також оксидно-напівпровідниковими танталовими.

Високочастотні конденсатори (алюмінієві рідинні й танталові оксидно-напівпровідникові) широко застосовуються в джерелах вторинного електроживлення, у якості накопичувальних і фільтруючих елементів у ланцюгах розв'язок і перехідних ланцюгів напівпровідникових пристроїв у діапазоні частот пульсуючого струму від десятків герців до сотень кілогерців. Звідси видно, що поняття «високочастотні» для оксидних конденсаторів є відносним. По частотних характеристиках їх не можна порівнювати з конденсаторами на неорганічній основі.

Для розширення можливостей використання оксидних конденсаторів у більш широкому діапазоні частот необхідно знижувати їхній повний опір. Це стало можливим при появі зовсім нових конструктивних рішень — чотирьохвиводних конструкцій і плоскої конструкції типу «книга», що дозволяють їхню експлуатацію на значно більше високих частотах.

Імпульсні конденсатори використовуються в електричних колах з відносно тривалим зарядом і швидким розрядом, наприклад у пристроях фотоспалахів і ін. Такі конденсатори повинні бути енергоємними, мати малий повний опір і велику робочу напругу. Щонайкраще цій вимозі задовольняють оксидно-електролітичні алюмінієві конденсатори з напругою до 500 В.

Пускові конденсатори використовуються в асинхронних двигунах, у яких ємність включається тільки на момент пуску двигуна. При наявності пускової ємності обертове поле двигуна при пуску наближається до кругового, а магнітний потік збільшується. Все це сприяє підвищенню пускового моменту, поліпшує характеристики двигуна. У зв'язку з тим, що пускові конденсатори включаються в мережу змінного струму, вони повинні бути неполярними й мати порівняно велику для оксидних конденсаторів робочу напругу змінного струму, яка трохи перевищує напругу промислової мережі.

На практиці використовуються пускові конденсатори ємністю порядку десятків і сотень мікрофарад, створені на основі алюмінієвих оксидних плівок з рідким електролітом.

У групу оксидних **перешкодопридушуючих конденсаторів** входять тільки прохідні оксидно-напівпровідникові танталові конденсатори. Вони так само, як і прохідні конденсатори інших типів, виконують роль фільтра нижніх частот, але на відміну від них мають набагато більші значення ємностей, що дає можливість зрушувати частотну характеристику в область більше низьких частот.

Варіконд (від англ. variable - змінний і condenser - конденсатор) - це конденсатор, заповнений сегнетокерамікою, ємність якого різко й нелінійно залежить від прикладеної до нього напруги.

Варіконди призначені для керування параметрами електричних кіл за рахунок зміни їхньої ємності при впливі як постійної або змінної напруг, так і декількох напруг, прикладених одночасно, що різняться по величині й частоті. Варіконди є нелінійними конденсаторами.

Для виготовлення варікондів використовуються матеріали, що мають різко виражені нелінійні електричні властивості. Основними сегнетоелектричними матеріалами, використовуваними для виготовлення варікондів, є тверді розчини систем $\text{Ba}(\text{Ti},\text{Sn})\text{O}_3$ або $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr},\text{Sn})\text{O}_3$.

Одна з основних характеристик варікондів - **коефіцієнт нелінійності** - відношення максимального значення діелектричної проникності при деякій, максимальній для даного матеріалу напруженості електричного поля, до початкового значення діелектричної проникності. Значення коефіцієнта нелінійності можуть змінюватися від 4 до 50 (у змінному полі). Зі збільшенням прикладеної напруги діелектрична проникність, а, отже, і електрична ємність варіконда зростають, досягають максимуму й потім знижуються.

Ступінь нелінійності і ємність варікондів сильно залежать від температури.

У найпростішому випадку варіконди працюють під впливом змінного синусоїдального поля й постійного електричного поля, причому напруженість постійного поля значно перевищує напруженість змінного поля. Чим сильніше прикладене до сегнетоелектрика постійне поле, тим менший вплив на сумарну електричну індукцію в сегнетоелектрику робить змінне поле.

Варіконди мають номінальні значення ємностей (при напрузі 5 В і частоті 50 Гц) від 10 до 100000 пФ. Варіконди характеризуються високою механічною міцністю, стійкістю до вібрацій, трясці, волозі; термін служби їх практично необмежений.

У серійному виробництві варіконди виготовляють або у вигляді одиночних дисків, або це диски, зібрані в циліндр, з номінальними значеннями ємності від 10 пФ до 0,22 мкФ. Особливості варікондів - часова й температурна нестабільність ємності, обмежений діапазон робочих частот і температур, високі значення діелектричних втрат.

Високі нелінійні властивості дозволяють використовувати варіконди для стабілізації струму й напруги, множення частоти, для автоматичного безконтактного дистанційного керування, перетворення синусоїдальної напруги в імпульсну, посилення електричної потужності й т.д.

Конденсатори з неорганічним діелектриком

Конденсатори з неорганічним діелектриком можна розділити на три групи: низьковольтні, високовольтні й перешкодопридушуючі. Як діелектрик у них використовується кераміка, скло, склоемаль, склокераміка й слюда. Обкладки виконуються у вигляді тонкого шару металу, нанесеного на діелектрик шляхом безпосередньої його металізації, або у вигляді тонкої фольги.

До групи **низьковольтних конденсаторів** належать низькочастотні й високочастотні конденсатори. За призначенням вони підрозділяються на типи:

1 - конденсатори для резонансних контурів або інших ланцюгів, де мають істотне значення малі втрати і висока стабільність ємності;

2 - конденсатори для ланцюгів фільтрів, блокування й розв'язки або інших ланцюгів, де малі втрати й висока стабільність ємності не мають істотного значення;

3 - керамічні конденсатори з бар'єрним шаром, призначені для роботи в тих же ланцюгах, що й конденсатори типу 2, але мають трохи менше значення опору ізоляції й більше значення тангенса кута діелектричних втрат, що обмежує область їх застосування низькими частотами.

Звичайно конденсатори типу 1 вважаються високочастотними, а типів 2 і 3 - низькочастотними. Певної границі по частоті між конденсаторами типів 1 і 2 не існує. Високочастотні конденсатори працюють у ланцюгах із частотою до сотень мегагерц, а деякі типи використовують у гігагерцевому діапазоні.

Слюдяні й склоемалеві (скляні) конденсатори належать до конденсаторів типу 1, склокерамічні можуть бути як типу 1, так і типу 2, керамічні – усіх трьох типів.

Високочастотні конденсатори великої й малої реактивної потужності робляться в основному з діелектриком із кераміки й слюди. За призначенням вони можуть бути типів 1 і 2 і так само, як низьковольтні конденсатори, вони розділяються на високочастотні й низькочастотні.

Основним параметром для високовольтних низькочастотних конденсаторів є питома енергія, тому кераміки для них підбирають із великою діелектричною проникністю. Для високочастотних конденсаторів основним параметром є припустима реактивна потужність. Вона характеризує навантажувальну здатність конденсатора при наявності великих напруг високої частоти. Для

збільшення реактивної потужності, вибирають кераміки з малими втратами, а конструкцію й виводи конденсаторів розраховують на можливість проходження великих струмів. Високовольтні слюдяні конденсатори роблять фольговими, тому що вони призначені для роботи при підвищених струмових навантаженнях.

Перешкодопридушуючі конденсатори з неорганічним керамічним діелектриком розділяються на опорні й прохідні. Їхнє основне призначення - придушення індустриальних і високочастотних перешкод, створюваних промисловими й побутовими приладами, випрямними пристроями й ін., а також перешкод атмосферних і перешкод, випромінюваних різними радіоелектронними пристроями. По суті вони є фільтрами нижніх частот. До цієї групи, виходячи з функціонального призначення й конструктивного виконання, умовно можна віднести керамічні фільтри.

Опорні конденсатори - це конденсатори, одним з виводів яких є опорна металева пластина з різьбовим кріпленням.

Прохідні конденсатори роблять коаксіальними, - один з виводів яких є струмонесучий стрижень, по якому протікає повний струм зовнішнього ланцюга, і некоаксіальними - через виводи яких протікає повний струм зовнішнього ланцюга. Прохідні керамічні конденсатори мають конструкцію трубчастого або дискового типу у вигляді багат шарових монолітних шайб.

Якщо в конденсаторах з метою підвищення резонансної частоти приймаються міри до зменшення власної індуктивності, то у фільтрах, навпаки, до ємності додають зовнішню індуктивність (феритовий сердечник) або використовують індуктивність виводів. При цьому залежно від способу з'єднання ємності й індуктивності можливі наступні схеми включення: Г-подібні, Т- подібні й П-подібні.

Конденсатори з органічним діелектриком

Ці конденсатори виготовляють звичайно намотуванням тонких довгих стрічок конденсаторного паперу, плівок або їхньої комбінації з металізованими або фольговими електродами.

Розподіл конденсаторів з органічною ізоляцією на низьковольтні (до 1600 В) і високовольтні (понад 1600 В) є чисто умовним і не для всіх типів строго дотримується. Наприклад, для паперових конденсаторів границею розподілу є напруга 1000 В.

За призначенням й використовуваним діелектричним матеріалам низьковольтні конденсатори можна розділити на низькочастотні й високочастотні.

Низькочастотними плівковими є конденсатори на основі полярних і слабкополярних органічних плівок (паперові, метало паперові, поліетилентерефталатні, комбіновані, лакоплівкові, полікарбонатні і поліпропіленові), тангенс кута діелектричних втрат яких має різко виражену залежність від частоти. Вони здатні працювати на частотах до $10^4 \dots 10^5$ Гц при істотному зниженні амплітуди змінної складової напруги зі збільшенням частоти.

Високочастотним плівковими є конденсатори на основі неполярних органічних плівок (полістирольні й фторопластові), що мають мале значення тангенса кута діелектричних втрат, що не залежить від частоти. Вони допускають роботу на частотах до $10^5 \dots 10^7$ Гц. Верхня межа по частоті залежить від конструкції обкладок і контактного вузла та від ємності. До цієї групи відносять і деякі типи конденсаторів на основі слабкополярної поліпропіленової плівки.

Високовольтні конденсатори можна розділити на високовольтні постійної напруги й високовольтні імпульсні.

Як діелектрик високовольтних конденсаторів постійної напруги використовують: папір, полістирол, політетрафторетилен (фторопласт), поліетилентерефталат (лавсан) і сполучення паперу й синтетичних плівок (комбіновані).

Високовольтні імпульсні конденсатори в більшості випадків роблять на основі паперового й комбінованого діелектриків.

Основною вимогою до високовольтних конденсаторів є висока електрична міцність. Тому часто використовують комбінований діелектрик, що складається, наприклад, із шарів паперу й плівки, шарів різних органічних плівок і шару рідкого діелектрика (просочений конденсаторний папір). Комбіновані конденсатори мають підвищену в порівнянні з паперовими конденсаторами електричну міцність, надійність та більш високий опір ізоляції. Високовольтні імпульсні конденсатори поряд з високою електричною міцністю й порівняно великими ємностями повинні допускати швидкі розряди, тобто пропускати великі струми. Отже, їхня власна індуктивність повинна бути малою, щоб не спотворювати форми імпульсів. Цим вимогам найкраще задовольняють конденсатори паперові, метало паперові й комбіновані.

Дозиметричні конденсатори працюють у ланцюгах з низьким рівнем струмових навантажень. Тому вони повинні мати дуже малий саморозряд, великий опір ізоляції, а отже, і велику постійну часу. Найкраще для цієї мети підходять фторопластові конденсатори.

Перешкодопридушуючі конденсатори призначені для ослаблення електромагнітних перешкод у широкому діапазоні частот. Вони мають малу власну індуктивність, у результаті чого підвищується резонансна частота й смуга частот, що придушуються. Крім того, для підвищення безпеки обслуговуючого персоналу, перешкодопридушуючі конденсатори повинні мати високу електричну міцність ізоляції. Перешкодопридушуючі конденсатори роблять паперовими, комбінованими й плівковими (в основному лавсановими).

7.2 Маркування конденсаторів

Умовна позначка конденсатора може бути скороченою і повною. Відповідно до діючої системи скорочена умовна позначка складається з букв і цифр. Перший елемент - буква або сполучення букв, що позначають підклас конденсатора:

К - постійної ємності,

КТ - підлаштовувальні,

КП - змінної ємності.

Другий елемент - позначення групи конденсатора залежно від матеріалу діелектрика відповідно до табл. 7.3

7.3 Основні електричні параметри й характеристики конденсаторів

Номінальна ємність - ємність, значення якої позначене на конденсаторі або зазначено в нормативно-технічній документації і є вихідним для відліку припустимого відхилення.

Номінальні значення ємностей стандартизовані й вибираються з певних рядів чисел. Відповідно до стандарту СЕВ 1076-78 установлені сім рядів: Е3; Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192. Цифри після букви Е вказують число номінальних значень у кожному десятковому інтервалі (декаді).

Таблиця 7.3 - Умовні позначки конденсаторів залежно від матеріалу діелектрика

Підклас	Група конденсаторів	Позначка
Конденсатори постійної ємності	Керамічні на номінальну напругу нижче 1600 В	10
	Керамічні на номінальну напругу 1600 В і вище	15
	Скляні	21
	Склокерамічні	22
	Тонкоплівкові з неорганічним діелектриком	26
	Слюдяні малої потужності	3
	Слюдяні великої потужності	32
	Паперові на номінальну напругу нижче 2 кВ, фольгові	40
	Паперові на номінальну напругу вище 2 кВ, фольгові	41
	Паперові металізовані	42
	Оксидно-електролітичні алюмінієві	50
	Оксидно-електролітичні танталові, ніобієві й ін.	51
	Об'ємно-пористі	52
	Оксидно-напівпровідникові	53
	З повітряним діелектриком	60
	Вакуумні	61
	Полістирольні	71 (70)
	Фторопластові	72
	Поліетилентерефталатні	73 (74)
	Комбіновані	75
Лакоплівкові	76	
Полікарбонатні	77	
Поліпропіленові	78	
Підлаштовувальні конденсатори	Вакуумні	1
	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4
Конденсатори змінної ємності	Вакуумні	1
	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4

Наприклад, ряд Е6 містить шість значень номінальних ємностей у кожній декаді, які відповідають числам 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 або числам, отриманим шляхом їхнього множення на 10^n , де n - ціле позитивне або негативне число.

У виробництві конденсаторів найчастіше використовуються ряди E3, E6, E12 і E24 (табл. 7.4), рідше - E48, E96 і E192. Деякі спеціальні конденсатори можуть виготовлятися на задану ємність, що вказується в документі на поставку.

Таблиця 7.4 - Найбільш уживані ряди номінальних значень ємностей:

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0		3,3	3,3	3,3
			1,1				3,6
		1,2	1,2			3,9	3,9
			1,3				4,3
	1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,6				5,1
		1,8	1,8			5,6	5,6
			2,0				6,2
2,2	2,2	2,2	2,2		6,8	6,8	6,8
			2,4				7,5
		2,7	2,7			8,2	8,2
			3,0				9,1

Фактичні значення ємностей можуть відрізнятися від номінальних у межах **припустимих відхилень**. Останні вказуються у відсотках відповідно до ряду: $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 ; $0 \dots + 50$; $-10 \dots + 30$; $-10 \dots + 50$; $-10 \dots + 100$; $-20 \dots + 50$; $-20 \dots + 80$. Для конденсаторів з номінальними ємностями, нижче 10 пФ допускаються відхилення, що вказуються в абсолютних значеннях: $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$ і ± 1 пФ.

Номінальна напруга - значення напруги, що позначене на конденсаторі або зазначене в технічній документації, при якому він може працювати в заданих умовах протягом терміну служби зі збереженням параметрів у припустимих межах.

Значення номінальної напруги залежить від конструкції конденсатора й фізичних властивостей матеріалів, застосованих при його конструюванні.

Номінальна напруга встановлюється з необхідним запасом стосовно електричної міцності діелектрика, що виключає виникнення протягом гарантованого терміну служби інтенсивного старіння

діелектрика, що призводить до істотного погіршення електричних характеристик конденсатора.

Електрична міцність діелектрика залежить від виду електричної напруги (постійна, змінна, імпульсна), від температури й вологості навколишнього середовища, від площі обкладок конденсатора, зі збільшенням якої зростає число «слабких місць» діелектрика, і від часу його експлуатації. Відповідно від цих факторів залежить і значення номінальної напруги. Номінальна напруга конденсаторів багатьох типів зменшується зі зростанням температури навколишнього середовища, тому що зі збільшенням температури, як правило, прискорюються процеси старіння діелектрика.

При експлуатації конденсаторів на змінному або постійному струмі, з накладенням змінної складової напруги необхідно виконувати наступні умови:

1) сума постійної напруги й амплітуди змінної складової не повинна перевищувати припустимої напруги, що вказується в документі на поставку;

2) амплітуда змінної напруги, повинна не перевищувати значення напруги, розрахованої, виходячи із припустимої реактивної потужності.

Для конденсаторів з номінальною напругою 10 кВ і менше значення номінальних напруг встановлюються з ряду: 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 350; 400; 450; 500; 630; 800; 1000; 1600; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000 В.

Під **номінальним струмом** конденсатора розуміють найбільший струм, при якому конденсатор може працювати в заданих умовах протягом гарантованого терміну служби. Цей параметр найбільш характерний для вакуумних конденсаторів. Він введений для правильного вибору теплових режимів конденсатора при великих значеннях електричного струму.

Значення номінального струму залежить від конструкції конденсатора, застосованих у ньому матеріалів, частоти змінної або пульсуючої напруги й температури навколишнього середовища. При проходженні через конденсатор радіоімпульсів значення імпульсного струму може значно перевищувати номінальний струм.

Значення номінального струму вакуумних конденсаторів установлюється з ряду: 5; 7,5; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 50; 60; 75; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 400; 500; 600; 750; 1000 А.

Електричний опір конденсатора постійному струму певної напруги називається **опором ізоляції конденсатора**. Цей параметр характерний для конденсаторів з органічним і неорганічним діелектриками. Вимір опору ізоляції роблять при напругах 10, 100 і 500 В відповідно для конденсаторів з номінальною напругою до 100 В, 100...500 В и понад 500 В.

Опір ізоляції характеризує якість діелектрика і якість виготовлення конденсаторів і залежить від типу діелектрика.

Опір ізоляції для конденсаторів великої ємності зворотнопропорційний площі обкладок, тобто ємності конденсаторів. Тому для конденсаторів ємністю більше 0,33 мкФ прийнято замість опору ізоляції приводити значення постійної часу, що виражається в секундах (МОм·мкФ) і дорівнює добутку опору ізоляції на значення номінальної ємності. Опір ізоляції або постійна часу залежить від типу діелектрика, конструкції конденсатора й умов його експлуатації. При тривалому зберіганні й наробітку опір ізоляції може зменшитися на один - три порядки. Опір ізоляції конденсатора вимірюють між його виводами. Для конденсаторів, що допускають торкання своїм корпусом шасі або струмоведучих шин, вводиться поняття **опір ізоляції між корпусом і з'єднаними разом виводами**.

Струм витоку – це струм провідності, що проходить через конденсатор при постійній напрузі на його обкладках у сталому режимі.

Струм витоку обумовлений наявністю в діелектрику вільних носіїв заряду й характеризує якість діелектрика конденсатора. Цей параметр характерний для вакуумних і оксидних конденсаторів.

Струм витоку у великому ступені залежить від значення прикладеної напруги й часу, протягом якого воно прикладено. Струм витоку вимірюється через 1...5 хв після подачі на конденсатор номінальної напруги. При включенні конденсатора під напругу відбувається «тренування», тобто поступове зменшення струму витоку. При тривалому зберіганні й тривалій роботі струм витоку конденсаторів зростає.

Температурний коефіцієнт ємності – це відносна зміна ємності при зміні температури навколишнього середовища на один градус Цельсія (Кельвіна):

$$TKC = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T}. \quad (7.1)$$

ТКЄ застосовується для характеристики конденсаторів з лінійною залежністю ємності від температури, яка визначається характером температурної залежності діелектричної проникності діелектрика конденсатора, особливостями конструкції і змінами розмірів конденсаторів при нагріванні.

Ємність плаского конденсатора з електродами, що мають форму квадрата, визначають за формулою

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l^2}{h}, \quad (7.2)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ - електрична стала, Ф/м; ε - відносна проникність; l - сторона електроду; h - товщина діелектрика.

Диференціюванням виразу (7.2) одержимо:

$$\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{2}{l} \frac{\partial l}{\partial T} - \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial T}, \quad (7.3)$$

або
$$TKC = TK\varepsilon + 2TKM - TKD, \quad (7.4)$$

де $TK\varepsilon$, TKM і TKD - температурні коефіцієнти діелектричної проникності діелектрика, лінійного розширення металу і діелектрика, відповідно. У металізованих конденсаторах, де електрод є тонким шаром металу, нанесеним безпосередньо на твердий діелектрик, зміна розмірів електродів буде визначатися розширенням діелектрика, а не металу. В цьому випадку можна дорівняти $TKM = TKD$, а $TKC = TK\varepsilon + TKD$.

За значенням TKC керамічні й деякі інші конденсатори розділяються на групи (табл. 7.5).

Для конденсаторів з нелінійною залежністю ємності від температури, а також з великими відходами ємності від температури звичайно приводиться відносна зміна ємності в робочому інтервалі температур. Керамічні конденсатори типу 2 за припустимою зміною ємності в робочому інтервалі температур, а також слюдяні конденсатори розділяються на групи (табл. 7.6, 7.7).

Діелектрична абсорбція конденсаторів

Явище, обумовлене вповільненими процесами поляризації в діелектрику, що призводить до появи напруги на електродах після короткочасної розрядки конденсатора, називається діелектричною абсорбцією.

Таблиця 7.5 - Групи ТКЄ конденсаторів з лінійної або близької до неї залежністю ємності від температури

Позначення груп ТКЄ	Номінальне значення ТКЄ при температурах 20...85° С, %
П100	+ 100
П120	+ 120
П33	- 133
МП0	0
МП33	- 133
МП47	- 47
М75	- 75
М150	- 150
М220	- 220
М330	- 330
М470	- 470
М700	- 700
М750	- 750
М2200	- 2200

Таблиця 7.6 - Відносна зміна ємності, що допускається в інтервалі робочих температур для керамічних конденсаторів типу 2

Позначення груп	Н10	Н20	Н30	Н50	Н70	Н90
Відносна зміна ємності, %	± 10	± 20	± 30	± 50	± 70	± 90

Таблиця 7.7 - Групи ТКЄ слюдяних конденсаторів

Позначення груп	А	Б	В	Г
Номінальне значення ТКЄ	± 200	± 100	± 50	± 20

Напруга, що з'являється на обкладках конденсатора після його короткочасної розрядки, істотно залежить від тривалості часу зарядки конденсатора, часу, протягом якого він був закорочений, і часу, що пройшов після цього. Кількісне значення абсорбції прийняте характеризувати коефіцієнтом абсорбції (K_a), що визначається в стандартних умовах. Зразковий графік залежності напруги на

конденсаторі від часу при вимірі коефіцієнта абсорбції наведений на рис 7.1.

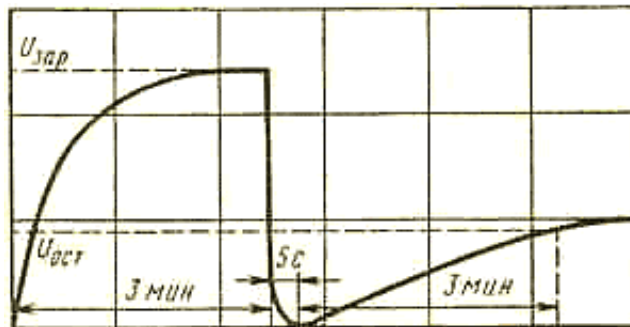


Рисунок 7.1 - Залежність напруги на конденсаторі від часу при вимірі коефіцієнта абсорбції.

Коефіцієнт абсорбції конденсаторів залежить від температури навколишнього середовища й підвищується з її зростанням.

Специфічні електричні параметри і характеристики підлаштувальних і вакуумних конденсаторів. Підлаштувальні й змінні конденсатори поряд з основними параметрами, наведеними вище, мають ще й додаткові, що враховують особливості їхнього функціонального призначення й конструктивне виконання. Замість параметра номінальна ємність використовуються параметри **максимальна й мінімальна ємності**. Це максимальне й мінімальне значення ємності конденсатора, що може бути отримано переміщенням його рухливої системи. Специфічними параметрами підлаштувальних й змінних конденсаторів є момент обертання, швидкість перебудови ємності й стійкість до зношування.

Момент обертання - мінімальний момент, необхідний для безперервного переміщення рухливої системи конденсатора.

Швидкість перебудови ємності впливає на надійність і міцність конденсатора. У нормативній документації обмежується швидкість перебудови ємності для керамічних конденсаторів - не більше 10...15 циклів у хвилину, для вакуумних 5...30. Під циклом перебудови ємності розуміється перебудова ємності від мінімальної до максимальної й назад.

Кількість припустимих циклів перебудови ємності визначає **зносостійкість** конденсатора. Під зносостійкістю розуміють здатність конденсатора зберігати свої параметри (протистояти зношуванню) при багаторазових обертаннях рухливої системи.

Зносостійкість конденсаторів і швидкість перебудови ємності залежать від конструкцій конденсаторів, властивостей застосованих матеріалів і технології їхнього виготовлення.

Для вакуумних конденсаторів найбільш важливим параметром є **електрична міцність**. Цей термін не слід ототожнювати з визначенням електричної міцності діелектрика, прийнятим у теорії діелектриків. Для конденсаторів термін електрична міцність варто розуміти умовно, як здатність конденсаторів витримувати певний час (звичайно невеликий, до декількох хвилин) прикладену до нього напругу, вищу за номінальну, без зміни його експлуатаційних характеристик і пробою діелектрика.

7.4 Вплив на конденсатори експлуатаційних факторів

Експлуатаційна надійність конденсаторів в апаратурі багато в чому визначається впливом комплексу факторів, які по своїй природі можна розділити на наступні групи: електричні навантаження (напруга, струм, реактивна потужність, частота змінного струму); кліматичні навантаження (температура й вологість навколишнього середовища, атмосферний тиск, біологічні фактори й т.д.); механічні навантаження (вібрація, удари, постійно діюче прискорення, акустичні шуми); радіаційні впливи (потік нейтронів, гамма-промені, сонячна радіація й ін.).

Під впливом зазначених факторів відбувається зміна параметрів конденсаторів. Залежно від виду й тривалості навантаження відхилення параметрів складаються з оборотних (тимчасових) і необоротних змін.

Оборотні зміни параметрів викликаються короткочасним впливом навантажень, що не призводять до зміни властивостей конструкційних матеріалів і навантажень та проявляються лише в умовах впливу. Після зняття навантаження параметри конденсаторів приймають значення, близькі до початкових.

Кліматичні навантаження. Температура й вологість навколишнього середовища є найважливішими факторами, що впливають на надійність, довговічність і збережаність конденсаторів. Тривалий вплив підвищеної температури викликає старіння діелектрика, у результаті чого параметри конденсаторів необоротно змінюються. **Гранично припустима температура** для конденсаторів обмежується завданням максимальної позитивної

температури навколишнього середовища й величиною електричного навантаження. Застосування конденсаторів в умовах, що перевищують ці обмеження, неприпустимо, тому що може викликати різке погіршення параметрів (зниження опору ізоляції й електричної міцності, зменшення ємності, збільшення струму й тангенса кута втрат), порушення герметичності спаїв, погіршення ізоляційних і захисних властивостей органічних покриттів і заливальних матеріалів, а в ряді випадків може призвести до повної втрати придатності конденсаторів.

Поряд із зовнішньою температурою на конденсатори в складі апаратури може додатково впливати теплота, виділювана іншими виробами (потужні генераторні й модуляторні лампи, резистори й т.п.), що сильно нагріваються при роботі апаратури. Тепловий вплив на конденсатори може бути як безперервним, так і періодично змінюватися. Різка зміна температури може викликати механічні напруги в різнорідних матеріалах, порушення герметичності паяних з'єднань, появу тріщин, зазорів у деталях конденсаторів.

Для багатьох типів конденсаторів в умовах **низьких температур** характерне зниження ємності, особливо в оксидних і керамічних конденсаторів типу 2. В оксидних конденсаторів при низьких температурах збільшується тангенс кута втрат. Всі типи оксидних конденсаторів з рідким або пастоподібним електролітом при температурах нижче 60 °С практично непрацездатні через різке зниження ємності й збільшення тангенса кута втрат.

При експлуатації конденсаторів в умовах **наднизьких температур** (до мінус 180 °С) за рахунок підвищення крихкості ряду конструкційних матеріалів можливе погіршення механічної міцності конденсаторів.

Зі зростанням температури навколишнього середовища напруга на конденсаторі повинна знижуватися. В умовах підвищеної вологості на електричні характеристики конденсаторів впливає як плівка води, що утворюється на поверхні (процес адсорбції), так і внутрішнє поглинання вологи діелектриком (процес сорбції). Для герметизованих конденсаторів характерні тільки адсорбційні процеси. У конденсаторів, що не мають вакуумнощільної герметизації, можливо також проникнення вологи всередину.

Тривалий **вплив підвищеної вологості** найбільш сильно позначається на зміні параметрів негерметизованих конденсаторів. Найменшу вологостійкість мають негерметизовані паперові й

металлопаперові, а також слюдяні спресовані конденсатори. Проникнення вологи усередину конденсаторів знижує опір ізоляції (особливо при підвищених температурах) і електричну міцність, збільшує тангенс кута втрат і ємність. Особливо небезпечним є одночасний тривалий вплив підвищеної вологості й електричного навантаження. При цьому в керамічних конденсаторів з відкритим міжелектродним зазором можливе зниження опору ізоляції або електричний пробій за рахунок міграції іонів металу обкладок (особливо срібла) по торці конденсатора, а в металопаперових конденсаторів - руйнування обкладок за рахунок процесів електролізу. Після перебування конденсаторів у нормальних кліматичних умовах (особливо після підсушування) адсорбована волога видаляється й герметизовані конденсатори практично повністю відновлюють свої параметри.

Волога викликає також корозію металевих деталей і контактної арматури конденсаторів, полегшує умови розвитку різних цвілевих грибків. Поява цвілі може викликати знебарвлення й руйнування захисних покриттів і маркування, погіршення ізоляційних властивостей органічних матеріалів, сприяє утворенню шару вологи на конденсаторах.

У морських районах шкідливий вплив вологи підсилюється за рахунок присутності в атмосфері солей, що входять до складу морської води, що збільшує електропровідність зволжених поверхонь, ізоляційних матеріалів, полегшує умови електролізу й корозії металів. У промислових районах волога, що конденсується на поверхні конденсаторів, може містити розчини сірчистих і інших агресивних сполук, що підсилюють шкідливу дію вологи.

При **зниженні зовнішньої температури** усередині блоків апаратури можуть створюватися умови, сприятливі для утворення інею й випадання роси. Вплив інею й роси практично не позначається на працездатності низьковольтних конденсаторів. Однак наявність вологи на поверхні конденсаторів при випаданні роси може збільшити поверхневу провідність і призвести до зниження опору ізоляції, а у високовольтних конденсаторів - до зниження електричної міцності. Після випару роси електричні характеристики конденсаторів відновлюються. Час відновлення залежить від габаритів, конструкції, теплоємності й інших характеристик виробу. Повністю зберігають працездатність при впливі інею й роси конденсатори з оксидним діелектриком.

Конденсатори не піддаються безпосередньому впливу сонячної радіації, атмосферних опадів. Однак пил і пісок сприяють корозії металевих деталей і розвитку цвілі, а потрапляючи в зазори між третьюми частинами підлаштовувальних конденсаторів, прискорюють їхнє зношування.

Підвищений (до 3 атм.) тиск істотно не впливає на роботу конденсаторів. В умовах **низького тиску** знижується електрична міцність повітряного проміжку й створюються умови для пробоїв і перекриття. Для запобігання пробоїв і перекриття при зниженому атмосферному тиску необхідно знижувати напругу на конденсаторі. При зниженому атмосферному тиску погіршується відвід теплоти від конденсатора, а в умовах глибокого вакууму (тиск менше $1,3 \cdot 10^6$ Па) можлива сублимація твердих матеріалів. В умовах низького тиску в негерметичних оксидних конденсаторів з рідким або пастоподібним електролітом випар летких компонентів призводить до інтенсивної втрати електроліту, що різко знижує строк їхньої служби.

Питання для самоперевірки

1. Що таке конденсатор, для чого він використовується?
2. Як класифікуються конденсатори?
3. Як маркуються й графічно позначаються конденсатори?
4. Які матеріали використовуються при виготовленні конденсаторів?
5. Що таке варіконд?
6. Де застосовуються оксидні (електролітичні) конденсатори, як вони позначаються, і які властивості мають?
7. Які чинники впливають на значення ємності конденсаторів з різними діелектриками?
8. Чим відрізняються один від одного ТКЄ, ТКє, ТКД, ТКМ?

Задачі

1. При якій максимальній напрузі може працювати слюдяний конденсатор ємністю $C = 1000$ пФ із площею обкладок $S = 6 \cdot 10^{-4}$ м², якщо він повинен мати чотириразовий запас по електричній міцності. Діелектрична проникність слюди $\epsilon = 7$, її електрична міцність $E_{пр} = 100$ МВ/м. Яка товщина h слюдяної пластинки?

2. Визначити запас по електричній міцності плоского конденсатора й товщину діелектрика з неорганічного скла, якщо ємність конденсатора $C = 68$ пФ, площа обкладки 10 см^2 , робоча напруга 10 кВ. Діелектрична проникність скла $\epsilon = 6,5$, а його електрична міцність $5 \cdot 10^7$ В/м.

Глава 8. Індуктивні компоненти

В електричних ланцюгах використовують три основних вида індуктивних компонентів - котушки індуктивності, дроселі і трансформатори.

Разом з конденсаторами вони використовуються для створення фільтрів, що здійснюють частотну селекцію електричних сигналів, а так само для створення елементів затримки сигналів і запам'ятовувальних елементів, здійснення зв'язку між ланцюгами через магнітний потік і т.д. На відміну від резисторів і конденсаторів вони не є стандартизованими виробами, а виготовляються для конкретних цілей і мають такі параметри, які необхідні для здійснення тих або інших перетворень електричних сигналів, струмів і напруг.

8.1 Котушки індуктивності

Котушка індуктивності — винтова, спіральна або винтоспіральна котушка зі згорнутого ізолюваного провідника, що має значну індуктивність при відносно малій ємності й малому активному опорі. Така система може накопичувати енергію магнітного поля при проходженні електричного струму.

Функція котушки індуктивності - чинити реактивний опір змінному струму при незначному опорі постійному струму.

Функціонування котушок індуктивності засновано на взаємодії струму й магнітного потоку. Відомо, що при зміні магнітного потоку Φ у провіднику, що перебуває в магнітному полі, виникає електрорушійна сила (ЕРС), обумовлена швидкістю зміни магнітного потоку

$$e_L = \frac{d\Phi}{dt}.$$

При підключенні до провідника джерела постійної напруги струм у ньому встановлюється не відразу, а через деякий час, тому що в момент вмикання змінюється магнітний потік і в дроті індукується ЕРС, що перешкоджає наростанню струму. Якщо ж до провідника підключене джерело змінної напруги, то струм і магнітний потік будуть змінюватися безупинно й наведена у провіднику ЕРС буде перешкоджати протіканню змінного струму, що еквівалентно збільшенню опорі провідника. Чим вище частота зміни напруги,

прикладеної до провідника, тим більше величина наведеної ЕРС, отже, тим більше опір, надаваний провідником струму, що протікає. Цей опір X_L не пов'язаний із втратами енергії, тому є реактивним. При зміні струму за синусоїдальним законом наведена е.р.с.

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t .$$

Вона пропорційна частоті ω , а коефіцієнтом пропорційності - є індуктивність L . Отже, індуктивність характеризує здатність провідника чинити опір змінному струму. Величина цього опору $X_L = \omega L$. Індуктивність короткого провідника (мкГн) визначається його розмірами: $L = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-3}$, де l - довжина дроту в см, d - діаметр дроту в см.

Якщо дріт намотати на каркас, то утвориться котушка індуктивності. У цьому випадку магнітний потік концентрується й величина індуктивності зростає.

При протіканні струму котушка запасає енергію, що дорівнює роботі, яку необхідно витратити для встановлення струму I :

$$E_{\text{запас}} = \frac{LI^2}{2} .$$

Основні параметри котушок індуктивності

Індуктивність характеризує кількість енергії, що запасається котушкою, при протіканні по ній електричного струму. Чим більша індуктивність котушки, тим більше енергія магнітного поля при заданому значенні струму. Індуктивність залежить від форми, розмірів, числа витків котушки, а також від розмірів, форми і матеріалу її сердечника.

Добротність - відношення реактивного опору котушки до її активного опору втрат. Добротність котушки в більшості випадків визначає резонансні властивості і коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) контура.

Втрати складаються із втрат у дротах, діелектрику, сердечнику й екрані.

Втрати у дротах обмотки спричинені рядом факторів:

- активний опір;
- скін-ефект, тобто витиснення струму до поверхні перерізу дрота;

- ефект близькості у дротах обмотки, звитої в спіраль, тобто витиснення струму під впливом вихрових струмів і магнітного поля до периферії дрота.

Два останніх ефекта призводять до зменшення площі перетину, через який протікає струм, а тому – до додаткового зростання опору дрота.

Втрати у діелектрику каркаса спричинені тим, що між сусідніми витками котушки існує паразитна ємність, що призводить до витоків змінного струму між витками. Втрати в сердечнику складаються з втрат на вихрові струми, на гістерезис та початкових втрат. Втрати в екрані спричинені тим, що спричинені тим, що струм, який протікає по котушці, індукуює струм в металевому екрані.

Власна ємність (рис.8.1) є паразитним параметром.

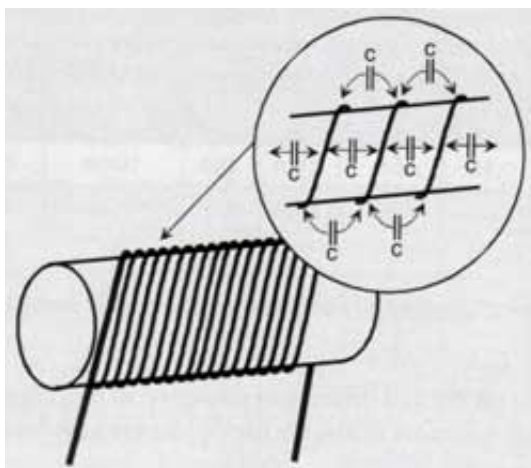


Рисунок 8.1 - Схематичне представлення паразитної ємності між витками обмотки котушки індуктивності

Наявність власної ємності котушки обумовлює окрім збільшення втрат енергії ще й зменшення стабільності настройки коливальних контурів. У діапазонних контурах власна ємність котушки зменшує коефіцієнт перекриття діапазону частот.

Стабільність параметрів при зміні температури і вологості, а також в часі має особливе значення для контурів гетеродинів, вузькосмугових фільтрів і ін. Стабільність індуктивності при зміні температури характеризується температурним коефіцієнтом індуктивності (ТКІ), що дорівнює відносній зміні індуктивності при зміні температури на 1 °С.

Температурна нестабільність індуктивності обумовлена рядом причин:

- при нагріванні збільшуються довжина і діаметр дроту обмотки та каркаса, що призводить до зміни кроку і діаметра витків;
- змінюється величина діелектричної проникності діелектрика каркаса, що призводить до зміни паразитної ємності котушки.

Класифікація котушок індуктивності

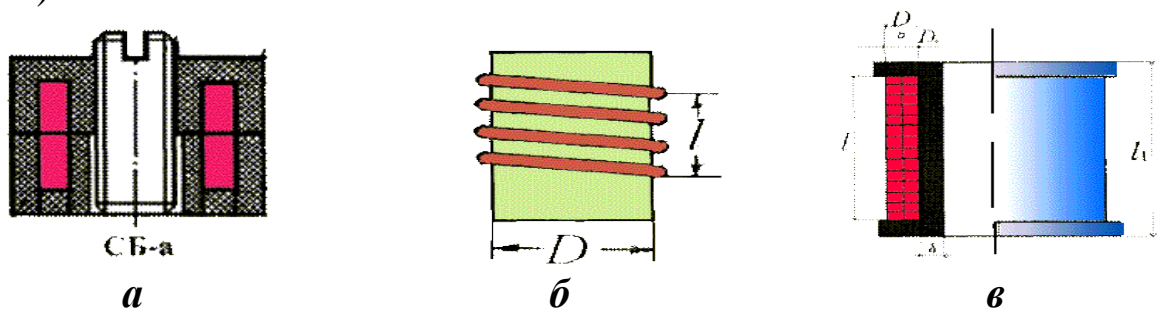
Залежно від **призначення** високочастотні котушки індуктивності розділяють на чотири групи:

- а) котушки контурів, що не визначають частоту;
- б) котушки контурів, що визначають частоту (наприклад, гетеродинів);
- в) котушки зв'язку контурів з іншими ланцюгами;
- г) дроселі високої частоти.

Високочастотними називаються котушки індуктивності, опір яких має індуктивний характер в діапазоні частот з верхньою межею 100 кГц...400 МГц. Високочастотні котушки індуктивності застосовуються як елементи коливальних контурів для отримання магнітного зв'язку між певними ділянками електричних ланцюгів радіоелектронної апаратури або створення на окремих ділянках електричного ланцюга заданих реактивних опорів індуктивного характеру.

Конструкції котушок індуктивності

Конструкційною основою котушки індуктивності є діелектричний каркас, на який намотується дріт у вигляді спіралі (рис. 8.2).



- а – з одношаровою обмоткою; б – з багатошаровою обмоткою;
в – з багатошаровою обмоткою і сердечником

Рисунок 8.2 – Види котушок індуктивності

За конструктивними ознаками котушки ділять на циліндрові (рис.8.3), плоскі (спіральні) і тороїдальні, одно- і багатошарові, з

сердечниками і без сердечників, екрановані і неекрановані. Одношарові котушки виконуються намотуванням з примусовим кроком або суцільним. Плоскі котушки намотують з дроту або виготовляють з фольги на друкарській платі.



Рисунок 8.3 - Котушки індуктивності з повітряним сердечником і обмоткою з мідного витого семижилкового дроту (літцендрат) на пластиковому каркасі

Для намотування котушки звичайно застосовують дріт оптимального діаметра, що розраховується за допомогою емпіричних формул і графіків. При використанні для намотування котушок індуктивності жилки, що сплетена із сімох скручених дротів, порівняно з котушками, намотаними одножилковим дротом, досягається більша поверхня провідника. В результаті при високій частоті сигналу, коли струм витискається до поверхні провідника, (скін-ефект, дивись п. 2.3), опір обмотки є меншим, ніж в обмотці з одножилкового дроту.

Ще більшу перевагу на високих частотах мають обмотки з фольги (рис.8.4).



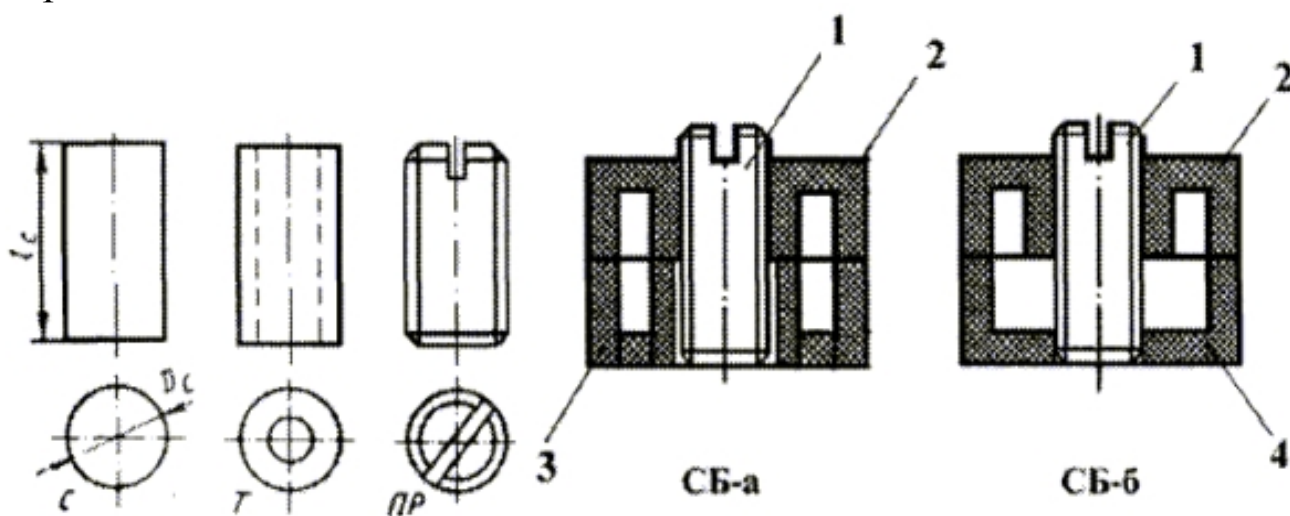
Рисунок 8.4 - Котушки індуктивності з обмоткою із фольги (розмір $74 \times 27 \text{ мм}^2$, індуктивність 1 мГн, опір 0,18000001 Ом)

Наприклад, при однакових площах перетину дроту діаметром 1,6 мм і фольги опір обмотки з фольги в високочастотному діапазоні є в 12

разів меншим. Але такі котушки є суттєво складнішими у виробництві, механічно менш міцні й менш стійкі до механічних впливів, ніж котушки, намотані сьомжилковим дротом.

Для збільшення індуктивності котушок застосовують магнітні сердечники (рис. 8.5). Розміщений усередині котушки сердечник концентрує магнітне поле і в такий спосіб збільшує її індуктивність. Переміщенням сердечника усередині каркаса можна змінити індуктивність.

Броньові сердечники складаються із двох чашок 2 (рис. 8.5), виготовлених з карбонільного заліза або феритів. Крім циліндричних і броньових сердечників застосовують тороїдальні (кільцеві) сердечники.



- 1 - підлаштувальний стрижень; 2 – чашка; 3 – зімкнений магнітопровід; 4 - розімкнений магнітопровід
 С – стрижневий; Т – трубчастий; ПР - підлаштувальний різьбовий; СБ - броньові

Рисунок 8.5 – Різновиди сердечників котушок індуктивності

На високих частотах (десятки-сотні МГц) застосовують підлаштувальні циліндричні сердечники з діамагнетиків (латунь, мідь). При введенні цих сердечників усередину котушки її індуктивність зменшується. У котушках індуктивності, що працюють на низьких частотах, як сердечники використовують пермалої. Для зменшення втрат на вихрові струми їх складають із тонких пластин товщиною 0,002...0,1мм.

Котушки з **сердечниками з немагнітних металів**, що характеризуються високою стабільністю, застосовуються в контурах гетеродинів, ширококутових підсилювачів, в приймачах коротких і ультракоротких хвиль. Матеріал сердечників - мідь, латунь, алюміній і його сплави. Мідні сердечники використовуються переважно для підлаштування індуктивності (до 20%), коли втрати, що вносяться сердечником, повинні бути мінімальними. При введенні в котушку металевого сердечника індуктивність і добротність зменшуються, причому індуктивність зменшується тим більше, чим більший об'єм металу вводиться і чим більше його провідність. Добротність зменшується ще більшою мірою, ніж індуктивність. Наприклад, введення в котушку мідного сердечника, що зменшує індуктивність на 15%, викликає зниження добротності на 45%. При введенні алюмінієвого сердечника, що зменшує індуктивність на 15%, добротність зменшується в 3...4 рази. Тому алюмінієві сердечники використовуються в котушках ширококутових контурів для спеціальних приймачів.

Котушки з **феромагнітними сердечниками** містять меншу кількість витків при заданій індуктивності і відрізняються вищою добротністю і меншими розмірами. Застосування феромагнітних сердечників дозволяє зменшити розміри екранів і спростити підгонку індуктивності. Вказані переваги повністю реалізуються в діапазонах довгих, середніх і коротких хвиль при відповідному виборі виду сердечника і його матеріалу і малих напругах на котушці, наприклад, в радіоприймачах. При використанні феромагнітних сердечників знижується стабільність параметрів котушок, крім того, індуктивність і добротність котушок залежать від амплітуди змінної напруги на котушці і значення постійного струму, що протікає через обмотку.

Феромагнітні сердечники для котушок виготовляються з магнітодіелектриків і феритів. При заданих габаритних розмірах котушки слід застосовувати матеріал сердечника, що має найменше значення відношення тангенса кута втрат до початкової магнітної проникності в діапазоні робочих частот. Сердечники з феритів забезпечують більшу добротність котушок, ніж сердечники з магнітодіелектриків. Для стабільних високочастотних котушок індуктивності рекомендується застосовувати сердечники з карбонільного заліза.

Основні параметри феромагнітних сердечників. Ефективна магнітна проникність μ_{ef} - відношення індуктивності котушки з

сердечником до індуктивності цієї котушки без сердечника. Чим більша магнітна проникність матеріалу сердечника (вимірюється на сердечниках кільцевої форми), нижче частота змінної напруги на котушці і менше відстань між сердечником і обмоткою котушки, тим вище ефективна магнітна проникність сердечника.

Добротність характеризує втрати, що вносяться сердечником в котушку, і дорівнює відношенню реактивного опору котушки до опору втрат, що вносяться. Вимірюється на стандартній котушці.

Відносна добротність сердечника $Q_{\text{відн.}}$ - відношення добротності котушки з сердечником до добротності цієї ж котушки без сердечника - характеризує втрати, що вносяться сердечником в котушку, і може служити мірою визначення діапазону робочих частот. Верхньою межею діапазону робочих частот є частота, при якій відносна добротність зменшується до одиниці. За межами діапазону робочих частот застосування сердечника доцільно тільки для регулювання індуктивності.

Стабільність параметрів сердечника характеризується зміною ефективною магнітною проникністю і втрат при зміні температури навколишнього середовища, вологості повітря, а також з часом. При зміні температури змінюється головним чином магнітна проникність. Ця зміна характеризується температурним коефіцієнтом магнітною проникності $T\mu_{\text{еф}}$, що дорівнює відносній зміні $\mu_{\text{еф}}$ при зміні температури на 1 °С. Зміна $\mu_{\text{еф}}$ з часом викликається старінням матеріалу і виявляється особливо різко в початковий період після виготовлення сердечника.

Котушки з **циліндровими сердечниками**. Промисловістю випускаються циліндрові сердечники з карбонільного заліза і феритів (див. рис. 8.5). Різьбові сердечники використовуються в циліндрових одно- і багат шарових котушках, коли потрібна підгонка індуктивності в процесі регулювання апаратури, і як елемент підлаштування (підлаштувальника) броньових сердечників. Для тих же цілей використовуються гладкі (стрижньові) і трубчасті сердечники з напресованою різьбовою втулкою з пластмаси. Стрижньові сердечники застосовуються також в дроселях високої частоти, а трубчасті - у фероваріометрах.

Котушки з **тороїдальними (кільцевими) сердечниками** характеризуються мінімальними розмірами, практично повною відсутністю зовнішнього магнітного поля, що дозволяє використовувати їх без екранів, і порівняно високою добротністю

(при виборі відповідних матеріалів). Недоліки цих котушок складність намотування, неможливість регулювання індуктивності і знижена стабільність індуктивності. Котушки з кільцевими сердечниками застосовуються в контурах проміжної частоти малогабаритних приймачів, в контурах, що перебудовуються підмагнічуванням, як дроселі і т.п.

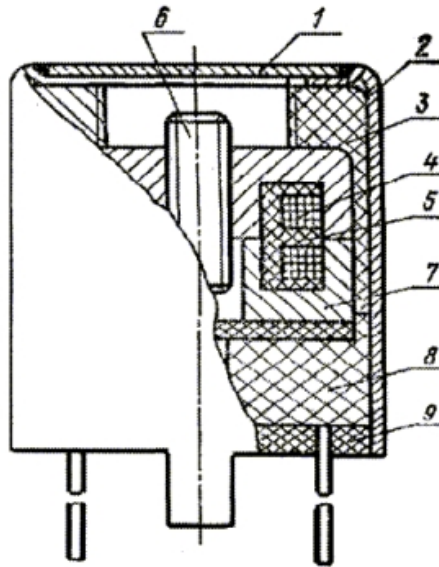
Вибір матеріалу і типорозміру сердечника для тороїдальних котушок визначається вимогами до котушки. При високих вимогах до стабільності параметрів котушки слід застосовувати кільця з альсиферів з компенсованим TK_{μ_n} . Розміри кільця вибирають з урахуванням вимог до індуктивності і добротності котушки. Чим більші індуктивність і добротність котушки, тим більшими повинні бути розміри кільця.

Для намотування котушок з кільцевими сердечниками слід застосовувати обмотувальні дроти з підвищеною механічною міцністю ізоляції (з додатковою, шовковою, ізоляцією або ізольованих високочастотними емаліями). Намотування виконують за допомогою шпулі, на яку заздалегідь намотують дріт. Перед намотуванням кільце слід обмотати стрічкою з лакоткани.

Для зменшення впливу електромагнітного поля котушки на інші елементи схеми, а також для зменшення впливу зовнішніх полів на котушку індуктивності, її розташовують усередині **металевого екрана** (рис.8.6).

Екрановані котушки застосовують, коли необхідно усунути паразитні зв'язки, обумовлені зовнішнім електромагнітним полем котушки, або вплив на котушку полів інших джерел. Ефективність екранування підвищується при збільшенні частоти змінного поля, товщини екрану і зменшенні питомого опору матеріалу екрану.

Екрани високочастотних котушок індуктивності виготовляють з міді або алюмінію завтовшки не менше 0,4...0,5 мм. Така товщина екрану при частоті змінного поля більше 1 МГц перевищує відстань, на якій щільність струму, що наводиться, падає в 100 разів в порівнянні з щільністю струму на поверхні екрану, що достатнє для ефективного екранування.



1 - заглушка, 2 - екран, 3 - корпус, 4 - обмотка, 5 - каркас, 6 - підлаштовуючий стрижень, 7 - чашка сердечника, 8 - підставка, 9 – заливання

Рисунок 8.6 – Екранована котушка індуктивності

Під впливом екрану змінюються параметри котушки: зменшуються індуктивність і добротність, збільшується власна місткість. Зміна параметрів котушки тим більше, чим ближче до її витків розташований екран.

Часто екрани високочастотних котушок забезпечені отворами для обертання сердечників або зміни положення однієї з котушок, зв'язаних індуктивно. У цих випадках отвору повинні бути мінімальними. Прорізи слід розташовувати перпендикулярно до створюючого циліндрового екрану, якщо котушка розташована співвісно з екраном.

Котушки індуктивності для коливальних контурів

Одношарові циліндрові котушки (див. рис. 8,2,а) виконуються на діелектричних каркасах або без них. Котушки без каркасів застосовуються, коли необхідна велика добротність при невисоких вимогах до стабільності індуктивності, наприклад для контурів вхідних пристроїв приймачів діапазону метрових хвиль. Діаметр дроту для таких котушок обирають в основному з міркувань жорсткості конструкції (1...1,5 мм і більше), а кількість витків обмежують (5...8). Для одношарових котушок, що виконуються суцільним намотуванням, виготовляють гладкі каркаси; для котушок, що намотуються з примусовим кроком - каркаси з канавкою,

розташованою по гвинтовій лінії, або з ребрами уподовж створюючої лінії циліндра.

Котушки, намотані з примусовим кроком, відрізняються меншою власною ємністю і більшою добротністю. Підвищення їх добротності обумовлене зниженням втрат в діелектрику внаслідок зменшення власної ємності. Вказані достоїнства котушок, намотаних з примусовим кроком, виявляються сильніше при намотуванні на каркаси з ребрами, а також при виготовленні каркаса з матеріалу з меншим значенням добутку діелектричної проникності на тангенс кута втрат.

Для одношарових котушок з індуктивністю вище 15...20 мкГ звичайно застосовують суцільне намотування. Доцільність переходу на суцільне намотування визначається діаметром котушки. Орієнтовні значення індуктивності, при яких доцільний перехід на суцільне намотування:

Діаметр каркаса, мм	0	10	15	20	25
Гранична індуктивність, мкГ	2	4	10	20	30

Котушки з індуктивністю більше сотень мікрогенрі виконують багатошаровими (див. рис. 8,2,б). При діаметрі каркаса 10 мм одношарове намотування доцільне при індуктивності не більше 30 мкГ.

Одношарові котушки індуктивності намотують мідним посрібленим дротом (з примусовим кроком) або мідним дротом в емалевій ізоляції. Котушки для коливальних контурів гетеродинів коротких і метрових хвиль, до яких ставляться вимоги високої добротності і стабільності індуктивності, намотують на каркаси з високочастотної кераміки, що характеризується малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, малим значенням тангенса кута втрат і достатньою механічною міцністю. Намотування виконують дротом із значним натягненням (50...60% розривного зусилля) або нагрітим (80...120 °С) дротом при незначному натягненні. Вищою стабільністю характеризуються котушки, в яких обмотка утворена шаром міді, нанесеної на керамічний каркас методом вжигання з подальшим срібленням.

Для точної підгонки індуктивності одношарових котушок, виконаних суцільним намотуванням, переміщують підлаштовуючий сердечник, крайні витки або короткозамкнутий виток, співвісний з котушкою. Індуктивність котушок, намотаних з примусовим кроком,

можна змінювати також переміщаючи місце під'єднування одного з виводів.

Симетричні котушки індуктивності застосовуються в симетричних коливальних контурах (контури частотних детекторів і ін.). **Біфілярне намотування** виконується двома дротами, складеними разом. Початок одного дроту з'єднують з кінцем іншого. Місце з'єднання є середнім виводом котушки. При такому намотуванні допускається підстроювання індуктивності сердечником при неістотному порушенні симетрії. **Перехресне намотування** дозволяє досягти точнішої симетрії, яка не порушується при підстроюванні сердечником.

Багатошарові циліндрові котушки індуктивності застосовують, коли потрібна індуктивність більше 30...50 мкГ. Несекціоновані багатошарові котушки з рядовою обмоткою характеризуються зниженими добротністю і стабільністю, великою власною ємністю. Значно кращі показники мають багатошарові котушки, виконані **намотуванням «внавал»**, коли витки розташовуються хаотично. Котушки, виконані **намотуванням «універсаль»** (перехресним), також можуть мати порівняно високу добротність (до 100) і знижену власну ємність, проте для їх виготовлення потрібне складніше устаткування. В даний час котушки, виконані намотуванням «універсаль», виготовляються рідко, оскільки рівноцінні параметри можна одержати при простому намотуванні «внавал», якщо використовувати типові феромагнітні сердечники.

Звичайно багатошарові котушки намотують на каркаси з полістиролу. Для намотування використовуються дроти з емалевою ізоляцією, емалевою і додатково шовковою ізоляцією. При використанні дротів з додатковою шовковою ізоляцією зменшується власна ємність котушок, а, при використанні літцендрату підвищується добротність (на частотах, що не перевищують 1...1,5 МГц). Істотний недолік котушок, намотаних літцендратом - різке зростання власної ємності при обриві або поганому контакті хоч би однієї з жилок дроту.

Секціоновані котушки характеризуються порівняно високою добротністю, зниженою власною ємністю і меншим зовнішнім діаметром. Найбільш часто секціоновані котушки намотують на спеціальні каркаси «внавал». Кожна секція є багатошаровою котушкою з невеликим числом витків. Число секцій вибирають звичайно від двох до шести.

Плоскі котушки є **спіралями**, виготовленими намотуванням з мідних обмотувальних дротів або методом друкарського монтажу з фольгованого гетинаксу або склотекстоліту. Вони можуть мати круглу, квадратну або іншу форму. Плоскі дротяні котушки характеризуються задовільною механічною міцністю, порівняно невеликою власною ємністю, простотою виготовлення і можуть застосовуватися на частотах до 10 МГц. Для їх виготовлення доцільно використовувати дроти з додатковою шовковою ізоляцією, оскільки при цьому досягається підвищена міцність клейового з'єднання витків.

Друкарські плоскі котушки на склотекстоліті відрізняються підвищеною механічною міцністю і застосовуються на частотах до 100 МГц. Для вищих частот друкарські котушки виготовляють з фольгованого фторопласту. Звичайно індуктивність друкарських котушок не перевищує 10 мкГн. Щоб набути прийнятної значення добротності котушки, ширину провідників вибирають в межах 0,4...1 мм. При цьому на площі 1 см² розміщується котушка з індуктивністю до 10 мкГн. Для збільшення індуктивності можна використовувати послідовне включення двох і більш котушок, розташованих на одній або двох сторонах друкарської плати. Для підвищення добротності котушки слід вибирати діаметр внутрішнього витка не менше 10 мм. Сучасні друкарські котушки мають добротність 100...130 на частотах 10...30 МГц.

Індуктивність і добротність плоскої котушки істотно збільшується, якщо з однієї або обох сторін на неї накласти феритові пластинки. Змінюючи відстань між котушкою і пластинками, можна регулювати індуктивність котушки.

Індуктивно зв'язані котушки використовуються для магнітного зв'язку між коливальними контурами, між антеною (або антенним фідером) і вхідним контуром приймача, в міжкаскадних зв'язках, як широкосмугові трансформатори, і т.п. Для забезпечення магнітного зв'язку між котушками їх намотують на загальний каркас (або сердечник) або розташовують поряд так, щоб їх осі були паралельні. Відхилення від цієї умови призводить до зменшення зв'язку. Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

Котушки із змінною індуктивністю, використовуються для перебудови контурів в процесі експлуатації апаратури, а підстроювані котушки - для регулювання апаратури в процесі виготовлення.

Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

Фероваріометри (варіометри з феромагнітними сердечниками) застосовуються як елементи настройки коливальних контурів, наприклад, в автомобільних приймачах.

Фероваріометр (рис. 8.7) складається з циліндрової котушки, всередину якої вводиться сердечник з матеріалу з високою магнітною проникністю, наприклад з фериту.

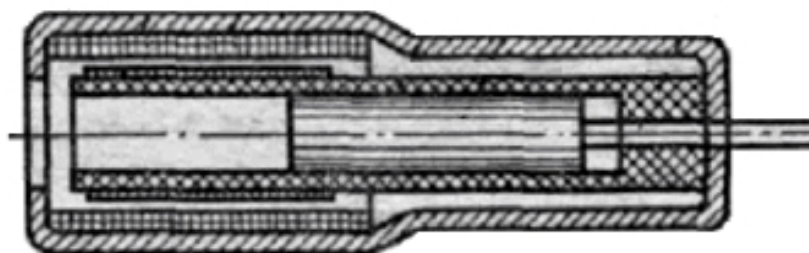


Рисунок 8.7 - Фероваріометр

Котушка розміщується усередині циліндра з феромагнітного матеріалу. Коефіцієнт перекриття фероваріометра тим більший, чим більша магнітна проникність матеріалу сердечника і чим ближче він розташований до витків котушки.

Якщо використовувати феритовий сердечник, можна одержати коефіцієнт перекриття 25...30 і більше. Слід вибирати сердечники, у яких довжина в 5...10 разів більше діаметру, а діаметр сердечника менше зовнішнього діаметру каркаса котушки на 0,5...1 мм.

Фероваріометри можуть використовуватися для одночасної перебудови декількох коливальних контурів. При цьому сполучення настройок контурів преселектора приймача і гетеродина звичайно досягається включенням додаткових сполучаючих котушок індуктивності. В цьому випадку фероваріометри преселектора і гетеродина ідентичні. Сполучення може також досягатися

застосуванням сердечників різних форм і розмірів або котушок з різним розташуванням витків.

8.2 Дроселі

Дросель електричний – це котушка індуктивності, що вмикається в електричний ланцюг послідовно навантаженню для придушення або обмеження змінної складової струму. Його назва походить від німецького слова «дроселі»-«скорочувати».

Основне призначення дроселя – захист джерел живлення від попадання в них наведених високочастотних сигналів, а також уникання засорення мережі живлення електромагнітними перешкодами.

Дроселі входять до складу багатьох електротехнічних і радіоприладів (випрямлячів, радіоприймачів, радіопередавачів).

Звичайно дросель має сердечник з електротехнічної сталі (рис.8.8) або з фериту.



Рисунок 8.8 - Дроселі силові

Дросель низької частоти - котушка індуктивності з магнітопроводом, призначена для використання в електричних ланцюгах як індуктивний опір. Він схожий на електричний трансформатор з однією обмоткою. Обмотка дроселя, що містить багато витків ізолюваного дроту, розташовується на зібраному зі сталевих пластин сердечнику й має велику індуктивність. Такий дросель сильно протидіє усяким змінам струму, що протікає через обмотку: перешкоджає його наростанню й, навпаки, підтримує убутний струм.

На низьких частотах дроселі використовуються в фільтрах ланцюгів живлення. Він служить також для регулювання сили струму,

для того щоб розділяти або обмежувати електричні сигнали різної частоти, усувати пульсації постійного струму. У приймально-підсилювальній апаратурі дроселі низької частоти використовуються у фільтрах живлення, різних низькочастотних фільтрах і ланцюгах корекції амплітудно-частотної характеристики.

Основними параметрами дроселів згладжуючих фільтрів живлення є індуктивність, номінальний струм підмагнічування, опір постійному струму, допустима змінна напруги. У багатьох випадках прагнуть при заданих габаритних розмірах і масі одержати можливо велику (або задану) індуктивність при мінімальному опорі постійному струму. Оскільки індуктивність дроселя залежить від струму підмагнічування і амплітуди змінної напруги, її вимірюють при номінальному струмі підмагнічування і заданій змінній напрузі.

Дроселем високої частоти називають котушку індуктивності, що включається в ланцюг для збільшення опору струмам високої частоти. Їх застосовують для роботи в електричних колах, де проходять струми високої частоти. Вони мають великий опір для струмів високої частоти й пропускають струми низької частоти.

Основні параметри дроселя: повний опір, опір постійному струму і власна ємність. Опір дроселя постійному струму повинен бути мінімальним, повний опір - достатньо великим і мати індуктивний характер. Власна ємність C_0 дроселя визначає його критичну частоту $f_{кр}$. На частотах нижче за критичну повний опір дроселя має індуктивний характер. Критична частота дроселя повинна бути можливо більшою (принаймні більше максимальної робочої частоти апаратури, в якій використовується дросель). Тому його власна ємність повинна бути мінімальною. Точність індуктивності не має значення.

Конструктивно високочастотні дроселі роблять у вигляді одношарових або багатшарових котушок, без сердечника або з магнітним сердечником.

Багатшарові використовують в діапазонах довгих і середніх хвиль, одношарові - на коротших хвилях. Для зменшення власної ємності багатшарові котушки секціонують, а одношарові намотують з примусовим кроком. Ще кращі результати можна отримати при намотуванні з прогресивним кроком, при цьому дросель повинен бути підключений так, щоб менший потенціал високої частоти був з боку малого кроку намотування.

Якщо добротність дроселя не має значення, то з метою зменшення власної ємності дроселя вибирають діаметр каркаса від 3 до 6 мм і намотують дріт малого діаметру (0,02... 0,06 мм). Проте щільність струму не повинна перевищувати 4...5 А/мм².

Дроселі з феромагнітними сердечниками (рис. 8.9) відрізняються меншими розмірами, меншою кількістю витків при заданій індуктивності i , отже, меншою власною ємністю. Тому вони можуть працювати в ширшому діапазоні частот. Якщо через дросель протікає невеликий струм і потрібна велика індуктивність, то доцільно використовувати тонкі стрижні (діаметром 1,5...2 мм) з феритів з великою магнітною проникністю. Якщо використовувати ферит марки 600НН, у якого зі збільшенням частоти зменшується діелектрична проникність, а при частоті вище за граничну - і магнітна проникність, то індуктивність і власна ємність дроселя зменшуватимуться з підвищенням частоти, що виключить резонансні явища в широкому діапазоні частот.



Рисунок 8.9 – Високочастотний дросель з сердечником тороїдальної форми із ферита марки 6000НМ та двома секціями обмотки з індуктивністю по $L > 1$ мГн кожна

Добротність дроселя важлива у випадках, коли він підключається паралельно коливальному контуру (по змінному струму). При цьому доцільно виготовлення дроселя з феромагнітним сердечником.

Число витків дроселя визначають так само, як число витків контурних котушок індуктивності. Діаметр дроту вибирають так, щоб мати прийнятну щільність струму і падіння напруги на дроселі не більше 10% напруги джерела живлення. При виготовленні дроселів високої частоти з феромагнітними сердечниками циліндрової форми на сердечник накладають шар конденсаторного паперу або діелектричної плівки і зверху намотують обмотку. Якщо використовується броньовий сердечник, обмотку розташовують на

секціонованому каркасі з пластмаси. На тороїдальному сердечнику обмотку намотують секціями.

8.3 Трансформатори низької частоти

Трансформатор - електромагнітний пристрій, що використовується для зміни напруги й сили змінного струму.

Функції трансформатора – зміна величини напруги, узгодження опорів електричних ланцюгів, розділення ланцюгів джерела і навантаження по постійному струму, а також зміна стану ланцюга щодо корпусу.

Трансформатори широко використовуються в лініях електропередач (рис. 8.10), в розподільних та побутових пристроях.



Рисунок 8.10 – Трифазний трансформатор лінії електропередачі

Передача електроенергії відбувається з меншими втратами при високій напрузі й малій силі струму. Тому зазвичай лінії електропередач високовольтні.

Водночас побутові й промислові машини вимагають високої сили струму й малої напруги, тому перед споживанням електроенергія перетворюється в низьковольтну. Трансформатори характеризуються дуже високим коефіцієнтом корисної дії (к.к.д).

Будова і принцип дії трансформатора

Основною частиною трансформатора є магнітопровід з магнітно-м'якого матеріалу з розміщеними на ньому обмотками.

Одна з обмоток під'єднана до джерела змінного струму. Ця обмотка називається **первинною**. Інша обмотка, вторинна, служить джерелом струму для навантаження. Створений струмом у первинній

обмотці змінний магнітний потік викликає появу електрорушійної сили (е.р.с.) у вторинній обмотці, оскільки обидві обмотки мають спільний сердечник.

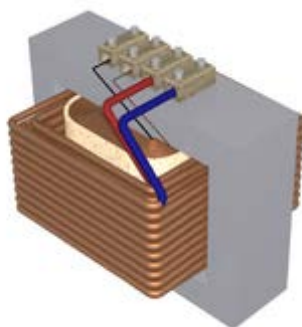
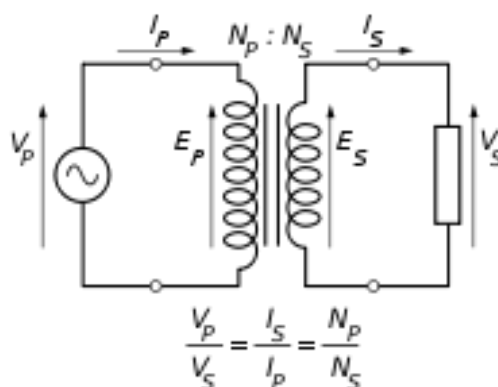


Рисунок 8.11 – Силовий трансформатор

Співвідношення е.р.с. у вторинній обмотці й напруги на первинній залежить від кількості витків у обох обмотках (рис. 8.12).



U - напруга, N - кількість витків, I - сила струму

Рисунок 8.12 – Схема еквівалентна електрична ідеального трансформатора (індексом P позначені величини, що стосуються первинної обмотки, а індексом S - відповідні величини для вторинної обмотки)

Класифікація трансформаторів. Трансформатори, використовувані в приймально-підсилювальній апаратурі, можна розділити на трансформатори живлення (силові) і погоджувальні (сигнальні). Трансформатори живлення застосовуються у випрямних пристроях для отримання різних напруг. Трансформатори погоджувальні використовують для узгодження входу підсилювача і джерела сигналу (вхідні), виходу підсилювача з навантаженням (вихідні), як елемент міжкаскадного зв'язку (міжкаскадні).

Малопотужні трансформатори живлення. Найбільш важливими електричними параметрами трансформаторів живлення є вихідна напруга, номінальна потужність, к.к.д., падіння напруги.

Номінальною потужністю трансформатора живлення називають суму номінальних потужностей вторинних обмоток. Номінальна потужність вторинної обмотки визначається як добуток струму при номінальному навантаженні на номінальну напругу. Ряд номінальних напруг вторинних обмоток встановлений ГОСТ 10763-64. Допустимі відхилення напруг від номінальних $\pm 0,15$ В при номінальних напругах не більше 7,5 В і $\pm 2\%$, при номінальних напругах більше 7,5 В (ГОСТ 14233-74).

Номінальна потужність трансформатора пропорційна частоті напруги мережі, індукції в магнітопроводі, густині струму обмоток, площі перетину стали в магнітопроводі і площі перетину міді, що заповнює вікно магнітопровода.

Падіння напруги ΔU , виражене у відносних одиницях, показує ступінь зміни вихідної напруги при повній зміні струму навантаження від нуля до номінального значення. Отже, для підвищення стабільності вихідної напруги необхідно зменшувати втрати в обмотках шляхом зниження опору обмоток.

Маса і габаритні розміри трансформатора залежать від номінальної потужності, напруги, к.к.д. і допустимої температури перегріву трансформатора.

Погоджувальні трансформатори застосовуються найчастіше у вихідних каскадах підсилювачів низької частоти для узгодження опору навантаження з вихідним опором вихідного каскаду. Для міжкаскадного зв'язку погоджувальні трансформатори застосовують, коли потрібна велика амплітуда струму на виході підсилювача. В цьому випадку використання погоджувального трансформатора на вході крайового каскаду дозволяє значно підвищити посилення потужності сигналу і понизити витрату енергії живлення. Крім того, в передкрайовому каскаді може бути застосований транзистор меншої потужності. Міжкаскадний трансформатор необхідний також при дуже низькому вхідному опорі наступного каскаду. На вході підсилювача погоджувальні трансформатори застосовуються, коли джерело сигналу має малий вихідний опір і розвиває малу е.р.с. або при необхідності симетріювання вхідного ланцюга.

Основні параметри погоджувальних трансформаторів: індуктивність первинної обмотки L_p індуктивність розсіяння L_s ,

активний опір обмоток r , власна ємність $C_{тр}$, коефіцієнт трансформації n , постійна часу трансформатора $\tau_{тр}$, критична потужність $P_{кр}$, к.к.д. і рівень нелінійних спотворень, що вносяться трансформатором.

Величини L_s , L_p , $C_{тр}$ і r разом з опором навантаження визначають частотні спотворення трансформаторного каскаду. Індуктивність L_p залежить від постійного і змінного струмів в обмотках, які впливають і на рівень нелінійних спотворень. Щоб частотні спотворення не перевищували допустимих, значення L_p повинно бути достатньо великим, а $C_{тр}$ і L_s - достатньо малими.

Коефіцієнт трансформації n - відношення числа витків вторинної і первинної обмоток. Значення n вибирається з умови узгодження опорів джерела сигналу і навантаження.

Постійна часу трансформатора залежить тільки від геометричних розмірів магнітопровода і обмоток, а також від властивостей матеріалів магнітопровода і дротів. **Критична потужність** трансформатора - потужність, при якій нелінійні спотворення, що вносяться трансформатором, дорівнюють максимально допустимим.

Нелінійні спотворення, що вносяться трансформатором, обумовлені нелінійністю характеристики намагнічення магнітопровода і у ряді випадків нестационарними процесами при відсіченні струму в обмотках. Для того, щоб спотворення не перевищували допустимого рівня, амплітуда магнітної індукції в магнітопроводі при найбільшій амплітуді сигналу на трансформаторі і найнижшій частоті повинна бути не більше допустимого значення, яке залежить від властивостей матеріалу магнітопровода.

Нелінійні спотворення, обумовлені відсіченням струму в обмотках, наприклад, при роботі підсилувача, виявляються в основному на вищих робочих частотах. Для зменшення цих спотворень необхідно зменшити індуктивність L_s .

П'єзотрансформатори призначені для використання в схемах живлення електронно-променевих трубок, газорозрядних приладів, лічильників Гейгера й для генерування високовольтних імпульсів. Перевагами таких джерел живлення є відсутність магнітного поля, простота й надійність конструкції, малі маса й габаритні розміри.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть виникнення е.р.с. індукції.
2. Запишіть формулу визначення е.р.с. індукції для котушки, що містить n витків.
3. Як графічно позначаються індуктивності в радіосхемах?
4. Що таке індуктивність, у яких одиницях вона вимірюється?
5. Що відбувається при включенні котушки індуктивності в ланцюг змінного струму?
6. Що таке дросель і де він використовується?
7. Що таке трансформатор?
8. Основні параметри трансформаторів і дроселів.
9. Области застосування трансформаторів і їхня конструкція.

Задачі

1. Котушка індуктивності містить $n = 200$ витків мідного ізольованого дроту, що намотаний виток до витка на поверхні діелектричного циліндра діаметром $D = 1$ см. Через котушку проходить постійний струм $I = 0,9$ А і змінний струм $i = 0,1$ А з частотою $f = 2$ МГц. Визначити: мінімальний діаметр дроту, з якого може бути виготовлена котушка, якщо припустима густина струму в обмотці $j = 2$ А/мм²; потужність, що виділяється при цьому в обмотці; мінімальну товщину шару діелектричної лакової ізоляції, якщо електрична міцність плівки лаку $E_{пр} = 3000$ В/мм. При розрахунку прийняти запас по електричній міцності лакової ізоляції $K = 10$.

Розв'язання

$$\text{Діаметр дроту котушки} \quad d = \sqrt{\frac{4(I+i)}{\pi j}} = \sqrt{\frac{4(0,9+0,1)}{2 \cdot 2}} = 0,8 \text{ мм}$$

Потужність, що виділяється в обмотці, визначається активним опором обмотки $R_{об} = 4\rho_{cu} Dn/d^2 = 0,21$ Ом і становить $P_{об} = (I+i)^2 R_{об} = 0,21$ Вт.

Індуктивність котушки

$$L = \mu_0 \mu n^2 \pi D^2 / (4l),$$

де $l = nd$ - довжина котушки. При $\mu = 1$ одержуємо $L = \frac{\mu_0 n \pi D^2}{4d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot (10^{-2})^2}{4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 24,66$ мкГн.

Індуктивний опір котушки $x = 2\pi f = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 24,66 \cdot 10^{-6} = 309 \text{ Ом}$
» $R_{\text{об}}$, товщина лакової ізоляції дроту визначається різницею потенціалів між сусідніми витками,

$$\Delta u = \frac{i x_L}{n} = \frac{0,1 \cdot 309}{200} = 0,154 \text{ В.}$$

Товщина ізолюючої лакової плівки на дроті $h_{\text{л}} = \frac{1}{2} \frac{K \Delta u \sqrt{2}}{E_{\text{пр}}} = 0,364$

мкм.

2. Визначити, скільки витків необхідно намотати на магнітний сердечник довжиною 100 мм і діаметром 8 мм, щоб одержати індуктивність котушки $L = 10 \text{ мГн}$. Магнітну проникність сердечника вважати рівною 500.

Глава 9 Комутаційні компоненти

Комутаційні компоненти призначені для вмикання, вимикання й перемикавання електричних ланцюгів, а також для зміни напрямку струму в ланцюзі (зміни полюсів).

Параметри комутаційних пристроїв:

Чутливість - мінімальна величина вхідного параметра, при якому відбувається стрибкоподібна зміна вихідного параметра (замикання або розмикання контактів, у безконтактних - зміна провідності). Залежно від виду вхідної величини, на яку реагує комутаційний пристрій (КП), чутливість може оцінюватися величиною струму, напруги, потужності, механічної сили, світлового потоку, магнітного поля й т.д.

Час спрацьовування характеризує швидкодію пристрою. Він відлічується з моменту подачі сигналу на вхід до появи сигналу на виході. Час, відлічуваний з моменту припинення дії керуючого сигналу до появи відповідного сигналу (стрибкоподібної зміни) на виході, є часом відпускання.

Максимальне значення потужності, що комутується, це - добуток максимально припустимих значень напруги й струму при даній нарузі. Якщо виконавча система КП комутує кілька ланцюгів, то вводять поняття сумарної комутованої потужності.

Частота комутацій - число спрацьовувань КП в одиницю часу.

Коефіцієнт підсилення (називаний іноді коефіцієнтом керування) визначається відношенням потужності на виході до потужності керування;

Вхідний опір визначає можливість узгодження пристрою із джерелом сигналів керування й найчастіше приводиться у вигляді активного (наприклад, для опору обмотки електромагнітних реле) або комплексного опору.

Електроізоляційні властивості КП характеризуються опором і електричною міцністю ізоляції між струмоведучими ланцюгами, а також корпусом.

Опір комутуючих елементів залежить від принципу комутації й виду використовуваних елементів. Для контактних КП - це активний опір замкнутих контактів, для напівпровідникових - внутрішній опір приладу у відкритому стані, а для магнітних - індуктивний опір змінному струму й т.д.

При роботі електричного контакту відбуваються досить складні фізичні процеси, які мають розходження при їхньому замиканні й розмиканні. Електричне з'єднання відбувається шляхом механічного контакту провідників.

Режим замикання. При зменшенні відстаней між контактами до 10 мкм спостерігається процес газового розряду, причому напруга запалювання газу між контактами визначається за законом Пашена. При менших відстанях цей закон порушується. Зазначена границя відповідає декільком довжинам вільного пробігу молекул у повітрі при нормальному тиску. Тому електрони можуть перетинати контактний зазор без зіткнення з молекулами газу. Напруженість електричного поля при замиканні контактів зростає за законом $E=U/d$, де E - напруженість електричного поля; U – напруга, що комутується; d - відстань між контактами. При напруженості поля близько $3 \cdot 10^8$ В/м виникає автоелектронна емісія електронів з поверхні катодного контакту, що утворює коротку дугу. Ця дуга є безплазмовою і характеризується незалежністю напруги горіння від величини струму, що протікає. При наявності плівок на контактах коротка дуга виникає при меншій напруженості електричного поля. Коротка дуга розігріває анодний контакт і викликає перенос матеріалу на катодний контакт. Безпосередньо перед зіткненням контактів утворюється рідкий контактний перешийок і напруга протягом -10 нс стрибком падає до часток вольтів. При подальшому зближенні контактів площа зіткнення зростає, перехідний опір контактів падає й, отже, падає також і температура. Контактний перешийок застигає, однак легко розривається при нормальних навантаженнях у процесі розмикання контактів.

Режим розмикання. У процесі розмикання контактне натискання зменшується, поверхня зіткнення мікрошорсткостей стає менше, густина струму й перехідний опір підвищуються. Протягом досить короткого часу напруга на контактах збільшується від декількох мілівольтів до 0,5...15 В. Під час цієї частини процесу розмикання місця зіткнення металевих контактів плавляться, потім вони розриваються при досягненні температури кипіння металу контактів. У цей момент напруга на контактах стрибкоподібно (протягом приблизно 10 нс) підвищується до напруги горіння короткої дуги, причому час її горіння значно більший, ніж при замиканні. Тому в режимі розмикання контакти руйнуються більше, ніж при замиканні.

При роботі електричних контактів на силові навантаження, характерні для електротехнічної апаратури, коротка дуга може перейти у звичайну, плазмову дугу. У цьому випадку змінюється напрямок переносу матеріалу контактів (з катода на анод), а при розриві рідких контактних перешийків і при короткій дузі перенос відбувається з анода на катод.

9.1 Електричні роз'єми

Роз'єм електричний - це електромеханічний пристрій, призначений для швидкого електричного з'єднання й роз'єднання електричних кіл (як правило, у знеструмленому стані). Роз'єм електричний складається з вилки (рис.9.1), що містить циліндричні або ножові контакти, і розетки з контактними гніздами.



Рисунок 9.1 – Вилка роз'єму живлення для відеокамери

Контакти й контактні гнізда кріпляться в ізоляторах, вкладених у корпус, що часто виконує роль електричного екрана. На корпусі можуть бути розташовані монтажний фланець, ключ, що забезпечує однозначність з'єднань, замок, кабельні затиски й т.п.

Класифікація. За призначенням роз'єми електричні підрозділяються на роз'єми для печатного монтажу, міжмашинні (забезпечують з'єднання електричних машин), аеродромного живлення, міжблочні, блокові, кабельні, прохідні й спеціальні (наприклад, у герметичному виконанні).

Залежно від призначення роз'єми класифікуються також:

- за застосуванням (сигнальні, живильні, аудіо, відео, комп'ютерні та ін.),
- за напругою (низьковольтні, високовольтні),
- за силою струму (слабкоструміві, потужноструміві),
- за діапазоном частот (для постійного струму, низькочастотні, високочастотні),
- за методом монтажу (на панель, на дріт, на шасі),

- за способом підключення дроту до контакту (гвинтовою клемою, обтиском, пайкою),
- за захищеністю від зовнішнього середовища (найчастіше використовується система IP. Найвищий ступінь захисту IP68).

Основні **характеристики роз'ємів**: припустимі струми й напруги, контактний тиск, контактний опір, електрична міцність, опір міжконтактної ізоляції, діапазон робочих частот, а також габарити й припустимі кліматичні й механічні умови експлуатації; число контактів. Число контактів визначається призначенням роз'єму й може бути від одного до декількох сотень (рис.9.2).

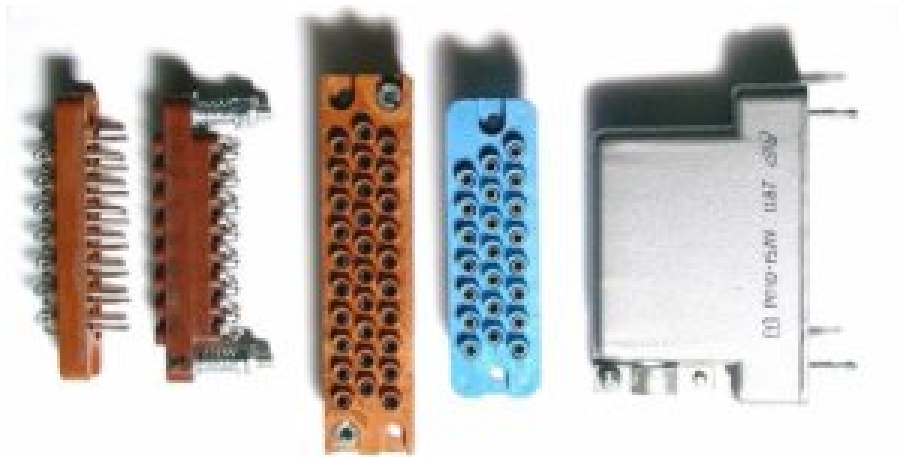


Рисунок 9.2 – Багатоcontactні роз'єми

Застосування великої кількості роз'ємів в електро- і радіоапаратурі знижує експлуатаційну надійність останньої. Тому основним завданням в області конструювання й виробництва роз'ємів є підвищення їхньої надійності.

Конструктивно роз'єм складається з корпусу, контактної групи й кабельного вводу. **Корпуса** роз'ємів бувають розбірними й не розбірними. Виготовляють їх із пластику, гуми, кераміки й металу. В останньому випадку корпус обов'язково містить ізолятор із пластику або кераміки.

Контактна група виготовляється з металу з високою провідністю (алюмінію або міді) і часто покривається дорогоцінними металами (срібло, золото, платина) для поліпшення провідності. Контактна група складається з контактної штиря (стрижня круглого або прямокутного перетину) і пружних контактних пластин. При підключенні роз'єму штир торкається пластин, які вигинаючись забезпечують постійне електричне з'єднання.

Кабельний ввід потрібний для того, щоб кабель потрапив усередину роз'єму. У найпростішому випадку роль кабельного вводу виконує круглий отвір у корпусі роз'єму. Але така конструкція призводить до того, що кабель буде сильно вигинатися й зрештою жила кабелю переломиться. Щоб цього не відбулося, роз'єм оснащують спеціальним амортизатором кабелю, що дозволяє кабелю гнутися тільки з безпечним радіусом вигину. Щоб запобігти викиданню кабелю з роз'єму, кабель утримується спеціальним затискачем. Всі ці пристрої поєднуються назвою кабельний ввід. Якщо роз'єм буде працювати в запиленому й вологому середовищі, то кабельний ввід додатково забезпечує герметизацію отвору. Для виключення можливості помилкового з'єднання, переважна більшість роз'ємів має так звані «ключі». Як правило «ключ» - це різного роду виступи й виїмки, які дозволяють застромити вилку в гніздо тільки одним способом. Робиться це для того, щоб кожний контакт вилки з'єднався саме із призначеним йому контактом гнізда. Але часто зустрічаються й роз'єми без ключів. Наприклад звичайна домашня розетка не має ключів і її можна вставляти без дотримання полярності. А от, наприклад, розетку зі штирем заземлення можна вставити тільки в один спосіб.

9.2 Перемикачі

Перемикачем (вимикачем) може називатися комутаційний апарат, що має як мінімум два фіксованих положення своїх контактів (увімкнено/вимкнено) і здатний змінити це положення під дією зовнішніх сил, на інше положення контактів (увімкнено/вимкнено) на як завгодно малий або великий час.

Найбільш поширеними є вимикачі освітлення, пакетні вимикачі; тумблери; перемикачі різних конструкцій: галетні, клавішні й ін.

Класифікація. Вимикачі можна класифікувати в такий спосіб:

1. За кількістю фіксованих положень контактів: двопозиційні (вимкнено/вимкнено) з нормально-замкнутими контактами та з нормально-розімкнутими контактами; багатопозиційні (як правило, перемикачі, що мають більше двох фіксованих положень своїх контактів).

2. За робочою напругою: низьковольтні (до 1000 В); високовольтні (вище 1000 В).

3. За робочим струмом.

4. За струмом короткого замикання при вимиканні.
5. За способом керування приводом: місцевого керування (як правило, вимикачі, що мають ручний привод); дистанційного керування (вимикачі, що мають, крім ручного, ще й механічний привод. Тут варто відзначити, що не всі види вимикачів можна вмикати або вимикати вручну).
6. За типом привода: з ручним приводом; із пневматичним приводом; з електромагнітним приводом; з електромеханічним приводом; з механічним приводом; автоматичні вимикачі (які, крім ручного привода, мають один або кілька приводів, що приводяться в дію розчеплювачами автоматичного захисту).
7. За способом встановлення: відкритого виконання (тобто вимикачі, що допускають встановлення на відкритому повітрі без захисту від атмосферних опадів); закритого виконання (тобто, вимикачі, які не допускається встановлювати на відкритому повітрі).
8. За ступенем волого-/пило-/вибухозахищеності (IP).
9. За кліматичним виконанням.
10. За наявністю/відсутністю пристроїв для гасіння дуги:
 - без спеціальних пристроїв дугогасіння (як правило, слабкострумові вимикачі й перемикачі або вимикачі, у яких наявність пристроїв для гасіння дуги конструктивно не передбачено, наприклад рубильники, роз'єднувачі);
 - зі спеціальними пристроями дугогасіння (вимикачі, у завдання яких входить відключення ланцюгів під великим струмовим навантаженням, у тому числі й при виникненні короткого замикання, внаслідок відключення яких є великий ризик утворення електричної дуги).
11. За способом гасіння дуги/виду пристроїв дугогасіння: повітряні вимикачі з камерами дугогасіння магнітного дуття та з камерами дугогасіння газового дуття; масляні вимикачі: камерами дугогасіння магнітного дуття та з камерами дугогасіння масляного дуття; маломасляні вимикачі; вакуумні вимикачі.
12. За характером середовища, що гасить дугу: повітря; елегаз; вакуум; трансформаторне масло.
13. За матеріалом й виконанню комутуючих контактів: суцільнометалеві контакти мідні, латунні, срібляні; суцільнометалеві контакти з напилюванням дорогоцінних металів - срібним, золотим; метало-керамічні контакти; рідкі контакти ртутні (наприклад, у вимикачах, що реагують на зміну положення в

просторі, рідким контактом є крапля ртуті, що, потрапляючи між електродами, замикає електричне коло); контакт, роль якого виконує будь-яка струмопровідна рідина (наприклад, у датчиках рівня вода, що потрапляє між електродами, замикає електричне коло).

Побутовий вимикач (рис. 9.3) - це двопозиційний комутаційний апарат з нормально-розімкнутими контактами, призначений для роботи в мережах з напругою до 1000 В, і не призначений для відключення струмів короткого замикання, без спеціальних пристроїв дугогасіння, місцевого керування, з ручним приводом.



Рисунок 9.3 – Вимикач світильника

Інші характеристики цього вимикача, такі як робочий струм, ступінь волого-/пило-/вибухозахищеності (IP), кліматичне виконання, спосіб установки, матеріал контактів - визначаються виробником і залежать від конкретної моделі. Більше того, для побутового вимикача актуально конструктивне виконання - для внутрішнього встановлення (вбудовується в стіну, для схованої проводки) або для зовнішнього встановлення (встановлення на стіну, для відкритої проводки). В основному застосовуються для вмикання й вимикання освітлення (люстр, плафонів). Для цієї ж мети служать вимикачі із плавним управлінням освітленості: світлорегулятори, дімери, тримери.

Акустичний вимикач - електричний вимикач, керований звуком.

Буває наступних типів:

1. Реагуючий на шум. Такий вимикач реагує на шум у приміщенні, як тільки він з'явиться, увімкне світло. Використовується в під'їздах і коридорах для економії електроенергії.
2. Реагуючий на хлопання. Такий вимикач застосовується у квартирах, зручний для застосування в спальнях.
3. Реагуючий на слова. Такий вимикач реагує на певне слово або тон голосу.

Безконтактні перемикачі (ключі) бувають механічними, електромагнітними і електронними.

Механічні ключі служать для безпосереднього керування ланцюгом, тому що діелектричний важіль механічного ключа звичайно прямо пов'язаний зі струмоведучими частинами ключа. Застосовуються звичайно у випадку, коли не потрібно відокремлювати керований ланцюг.

Електромагнітні ключі (рис. 9. 4) служать для дистанційного керування та керування високовольтними ланцюгами (у випадках, коли небезпечно управляти прямо механічним ключем), для гальванічної розв'язки між пристроєм керування й навантаженнями, синхронного керування декількома ланцюгами від одного сигналу.



Рисунок 9.4 - Електромагнітні ключі

Для захисту керуючого ланцюга від імпульсу самоіндукції, що виникає при знятті напруги з обмотки, паралельно їй включають діод у напрямку, зворотному полярності керуючої напруги. Даний спосіб не можна застосувати при використанні обмотки, що живлється змінним струмом.

Електронні ключі засновані на роботі біполярних транзисторів. Коли на базі транзистора «0» відносно емітера, транзистор «закритий», струм через нього не йде, на колекторі уся напруга живлення (сигнал високого рівня - «1»). Коли на базі транзистора «1», він «відкритий», виникає струм колектор-емітер і спадання напруги на опорі колектора, напруга на колекторі, а з ним і напруга на виході, зменшується до низького рівня «0». Також можливе використання польових транзисторів. Принцип їхньої

роботи схожий із принципом роботи електронних ключів на біполярних транзисторах.

Цифрові ключі на польових транзисторах споживають менший струм керування, забезпечують гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів, однак швидкодія їх нижче в порівнянні з біполярними.

Некеровані електронні ключі працюють на діодах, **керовані** – на електронних лампах, транзисторах, тиристорах, симисторах. У ключовому режимі можуть працювати як звичайні транзистори, так і транзистори спеціально розроблені для роботи в ключовому режимі (IGBT-транзистори).

9.3 П'єзокерамічні комутаційні елементи

П'єзокерамічні елементи у виробках комутації електричних сигналів застосовуються для виробництва кнопок, клавіатур, вимикачів, перемикачів і інтегрованих виробів на їхній основі. Їх переваги:

- знижена вартість завдяки простій технології виробництва;
- висока радіаційна стійкість;
- виняткова стійкість до дії різних агресивних середовищ, що дозволяє використовувати пристрої в різних хімічних виробництвах;
- вибухобезпечність елемента та к.к.д. $\approx 100\%$ завдяки діелектричній природі, роботі за рахунок дії електричного поля при практичній відсутності струму й пов'язаного із цим розсіювання тепла; ця властивість дозволяє використовувати пристрої на вибухонебезпечних підприємствах, наприклад, нафтохімічних і газохімічних підприємствах;
- висока надійність; невеликі габарити; можливість роботи в хімічно агресивних середовищах, у воді, піску, металевій стружці; іскробезпечна безконтактна комутація з кількістю комутаційних циклів, що не має аналогів (50 000 циклів);
- широкий діапазон робочих температур, струмів і напруг; можливість антивандального виконання;
- на відміну від існуючих ємнісних, індуктивних і інших пристроїв, п'єзокнопки не вимагають додаткового джерела живлення.

Принцип роботи **п'єзокнопки** заснований на прямому п'єзоелементі. При тиску на п'єзоелемент відбувається його деформація і на його електродах виникає напруга, достатня для надійного керування безконтактними транзисторними ключами.

Конструкція п'єзокнопки. На звороті корпусу кнопки, що може виконуватися з металу або пластмаси, установлений п'єзоелемент. Напруга з його електродів, що знімається струмознімачем, подається на друковану плату, на якій змонтована електронна схема безконтактних транзисторних ключів, комутуючих зовнішню напругу (струм) у навантаженні. Вся конструкція залита компаундом, а виводи можуть бути виконані роз'ємом, дротами або кабелем. Корпуса п'єзокнопок виконуються з нержавіючої сталі, анодированого алюмінію червоного, зеленого, блакитного, чорного, жовтого або натурального кольору, а також із пластмас і інших матеріалів. Написи виконуються фотохімічним способом, лазерним або механічним гравіруванням. Виводи - зі стандартного кабеля, дроту або роз'єм. Кнопки можуть виконуватися з тактильним ефектом.

Функціонально інтегровані п'єзокнопки підрозділяються на:

- тривалі замикання або розмикання контакту до 30 і більше секунд;
увімкнено\вимкнено: при натисканні - вмикання й повторне натискання - вимикання;
- з таймером часу;
- однократно програмувальні - у даних кнопках може бути реалізована будь-яка складна програма на однократне або циклічне вмикання або вимикання навантаження з витримками; програма записується за допомогою програматора;
- багаторазово програмувальні з можливістю запису нової версії або іншої програми;
- мультипрограми - у пам'ять мікроконтролера одночасно за допомогою програматора записується п'ять і більше складних програм, а користувач може вибрати й активізувати потрібну за допомогою нескладних маніпуляцій;
- перепрограмувальні - дозволяють користувачеві записати й перезаписати програму у пам'ять мікроконтролера кнопки без програматора за допомогою нескладних маніпуляцій, що дуже важливо для польових умов експлуатації;

- спеціальні - у пам'ять мікроконтролера записуються спеціальні програми, що дозволяють перетворити функцію часу натискання в послідовний стандартний сигнал; вмикання навантаження відбудеться після певної комбінації натискань і пауз.

Промисловістю випускаються кнопки, що не споживають енергію в режимі очікування, що дуже важливо при батарейному живленні. Також кнопки захищені від впливу статичної електрики. Є гальванічна розв'язка виходів із джерелом живлення. При необхідності виготовляються кнопки із захистом від перевантаження й короткого замикання. П'єзокомутаційні пристрої придатні для керування технологічними процесами з важкими й особливо тяжкими умовами експлуатації: наявність високої вологості або води, пилу, піску, металевої стружки, хімічно агресивного та пожежовибухонебезпечного середовища, великих перепадів температури.

9. 4 Реле

Енциклопедії й технічні словники визначають реле (англ. Relay - зміна, естафета; франц. relais, від relayer – поміняти, замінити) як пристрій для автоматичної комутації електричних кіл за сигналом ззовні. Будь-який релейний пристрій, як і **реле для комутації електричних кіл**, складається з релейного елемента (із двома станами стійкої рівноваги) і групи електричних контактів, які замикаються (або розмикаються) при зміні стану релейного елемента.

Реле широко застосовуються в пристроях автоматичного керування, контролю, сигналізації, захисту, комутації й т.д. Найпоширенішими є комутаційні реле, реле тиску, переміщення, реле часу, захисні реле.

Функціональне призначення реле - перетворення енергії X , що надійшла на вхід, в енергію Y на виході елемента. Завдання, розв'язуване таким елементом, визначається характером функціональної залежності між вихідною й вхідною величинами: $Y = f(X)$. У цьому зв'язку елементи можуть підрозділятися на датчики, підсилювачі, стабілізатори, двигуни, реле й ін.

Релейний елемент – найпростіший перемикальний пристрій із двома (або більше) станами стійкої рівноваги, кожний з яких може стрибком переминятися на інший під впливом зовнішнього впливу

(наприклад, зміни температури, тиску, електричної напруги, освітленості, сили звуку). Рівень впливу, при якому змінюється стан релейного елемента, називається **порогом спрацьовування**. Фізичне явище, використовуване в релейному елементі, визначає його принцип дії, конструкцію й основні характеристики. Залежно від фізичної природи впливу розрізняють електричні, механічні, теплові, оптичні, магнітні й акустичні релейні елементи; найпоширенішими є електричні релейні елементи. Часто для сприйняття впливу неелектричних величин релейні елементи доповнюються вимірювальними перетворювачами відповідних величин.

У **конструкції релейного елемента** можна виділити сприймаючий орган, що реагує на зовнішній вплив, виконавчий орган – для передачі впливів від релейного елемента зовні й проміжний – переробного й передавального впливу від сприймаючих органів до виконавчого.

У загальному вигляді релейний елемент являє собою технічний пристрій, у якому при певному значенні (навіть плавно змінюваної) вхідної величини енергії сигналу вихідна величина енергії (навіть може бути й іншого виду) приймає стрибкоподібно фіксоване число значень. Тут відбувається стрибкоподібна зміна Y не в часі, а залежно від величини X . Така залежність $Y = f(X)$ має форму петлі (кусочно-лінійна функція) і називається **релейною характеристикою**.

Реле часу – пристрій, контакти якого замикаються (або розмикаються) з деякою часовою затримкою після одержання керуючого сигналу. Затримку можна регулювати довільно, впливаючи на швидкість зміни фізичної величини, що впливає на релейний елемент реле часу від моменту надходження сигналу до досягнення порога спрацьовування. В електричних реле часу використовуються різні схеми затримки, засновані на наростанні або убутанні сили струму (напруги) в електричних колах, що містять конденсатори, індуктивні котушки й резистори. Застосовуються також реле часу, засновані на лічильниках імпульсів. У термічних реле часу використовуються теплові процеси в тілах, що нагріваються електричним струмом (наприклад, деформація біметалічних пластин). У пневматичних реле часу затримка створюється зміною швидкості витікання газу (повітря) з резервуара. Час спрацьовування реле часу від декількох мілісекунд до декількох годин.

У загальному випадку спрацьовування будь-якого реле відбувається з деякою часовою затримкою після одержання керуючого сигналу. Однак існує спеціальний клас релейних пристроїв – реле часу, у яких затримку спрацьовування (від декількох мілісекунд до декількох годин) можна регулювати.

Залежно від виконуваного завдання на виході релейного елемента він може бути комутаційним і не комутаційним (кроковий електродвигун, електродзвоник і т.ін.).

Реле, як комутаційний пристрій, належить до групи автоматичних комутаційних пристроїв, керованих дистанційно. Безпосередньо людиною управляються неавтоматичні комутаційні пристрої: електричні кнопки, тумблери, клавіатури; водяні або повітряні клапани й т.ін.

Сучасна класифікація реле. Залежно від фізичної природи вхідного (керуючого) сигналу реле підрозділяються на механічні (сила, тиск, швидкість, прискорення), магнітні, теплові, оптичні, електричні (струм, напруга, потужність, опір).

Електричні реле найпоширеніший тип реле, широко застосовуваний у вимірювальній техніці, телефонії й радіоелектронній апаратурі.

У свою чергу електричні реле залежно від наявності або відсутності механічного переміщення в самому пристрої поділяються на **реле електромеханічні й статичні електричні** (комутаційні з безконтактним виходом: напівпровідникові, електронні, оптоелектронні й т.ін.).

Електромеханічні реле залежно від явищ, що відбуваються усередині реле, можуть бути **електромагнітними, електротепловими, електрогідродинамічними**.

Серед різноманіття релейних пристроїв, застосовуваних у техніці, електромагнітні реле, як і раніше, займають провідне положення.

Класифікація електромагнітних реле. Електромагнітні реле в сучасній техніці можуть розглядатися як підклас електромагнітних механізмів, що мають рухливий якір. Існують нерелейні електромагнітні механізми: крокові пристрої, вібратори, муфти й т.п. Електромагнітні реле – релейні електромагнітні механізми. До електромагнітних реле належать традиційні реле з нерухливою обмоткою електромагніта й феромагнітним якорем, а також **магнітоелектричні, електродинамічні й індукційні**

електромагнітні реле. Деякі типи електромагнітних реле не мають самостійного якоря, функції якого виконують магнітокеровані контактні деталі (герконові реле) або рухомий сердечник обмотки (**плунжерний тип реле**).

Електромагнітні реле, як і інші електричні реле, по роду керуючого й комутованого струму можуть бути постійного й (або) змінного струму.

Звичайні конструкції контактної системи електромагнітних реле дозволяють комутувати як постійний, так і змінний струм із частотами до сотень кілогерців. Спеціальні конструкції контактної системи (погоджений хвильовий опір вводу-виводу струму, зменшена паразитна ємність і т.п.) забезпечують комутацію високочастотних сигналів до декількох гігагерц.

За чутливістю вхідного сигналу й величиною струму, що комутується, електромагнітні реле підрозділяють на надчуттєві ($10^7 \dots 10^{10}$ Вт), реле, що реєструють надмалі струми, а також високо- і нормально чутливі слабкострумові ($10^{-6} \dots 25$ А).

Потужніші реле, комутуючі струми більше 50 А и напруги більше 1000 В, називаються, відповідно, **контакторами** й **високовольтними реле**.

Слабкострумові реле стали в цей час самостійним класом електричних реле, що включає в себе найпоширеніші електромагнітні реле з рухливим якорем, герконові реле, електротеплові й слабкострумові реле часу. До класу слабкострумових реле відносять також і інші види неелектричних слабкострумових реле, наприклад, теплові реле. Терміни й визначення для електричних реле дані в ДЕРЖСТАНДАРТ 16022 і ДЕРЖСТАНДАРТ 14312.

9.5 Геркони

Геркон (скорочення від герметизований магнітокерований контакт) - електромеханічний пристрій є пара феромагнітних контактів, запаяних у герметичну скляну колбу (рис. 9.5).



Рисунок 9.5 - Геркон

При піднесенні до геркона постійного магніта або вмиканні електромагніта контакти замикаються. Геркони використовуються як безконтактні вимикачі, датчики близькості й т.д.

Геркон з електромагнітною котушкою утворює герконове реле (дивись п. 9.4).

Є геркони, що розмикають ланцюг при виникненні магнітного поля і є також геркони з перемикаючою групою контактів.

Геркони різняться також за **конструктивними особливостями** (рис. 9.6).



а - замикаючий типу **КА-46А**; б - типу **МК65G**

Рисунок 9.6 – Геркони різних типів

Вони бувають сухими (із сухими контактами) і ртутними, у яких крапля ртуті змочує контактуючі поверхні, зменшуючи їхній електричний опір і запобігаючи вібрації пластин у процесі роботи.

Параметри герконів:

Магніторушійна сила спрацьовування — значення напруженості магнітного поля, при якому відбувається замикання контактів геркона.

Магніторушійна сила відпускання — значення напруженості магнітного поля, при якому відбувається розмикання контактів геркона.

Опір ізоляції — електричний опір зазора між сердечниками (у розімкнутому стані).

Опір контактного переходу — опір контактної області, що утворюється при замиканні сердечників.

Пробивна напруга — напруга, при якій відбувається пробій геркона.

Час спрацьовування — час між моментом прикладення керуючого магнітного поля, і моментом останнього фізичного замикання електричного ланцюга герконом.

Час відпускання — час між моментом зняття прикладеного до геркону магнітного поля, і моментом останнього фізичного розмикання електричного кола герконом.

Ємність - електрична ємність між выводами геркона в розімкнутому стані.

Максимальне число спрацьовувань - число спрацьовувань, при якому всі основні параметри геркона залишаються в припустимих межах.

Максимальна потужність — максимальна потужність, що комутується герконом.

Напруга, що комутується. Струм, що комутується.

Переваги герконів. Контакти геркона перебувають у вакуумі або в інертному газі й не обгоряють, навіть якщо при замиканні або розмиканні між контактами виникає іскра. Вони є довговічними. Якщо не бити геркон і не пропускати дуже великі струми, то термін служби геркона практично нескінченний (в технічних даних на геркони зазначають обмеження, 10^8 - 10^9 і більше спрацьовувань). При включенні й відключенні немає ні дзеленчання, ні «невизначеності натискання». У геркона може бути тільки два чітких стани - вмикнений і вимкнений. Геркони мають менший розмір у порівнянні із класичним реле, розрахованим на такий самий струм. Для контактів не застосовуються тугоплавкі і дорогоцінні метали. Геркони майже безшумні і мають високу швидкодію.

Недоліками герконів є дорожнеча й більша вага в порівнянні з відкритими контактами, необхідність створення магнітного поля, складність монтажу, крихкість. Їх не можна використовувати в умовах сильних вібрацій і ударних навантажень, час від часу контакти "залипають", такий геркон підлягає заміні.

Геркони **застосовуються** в клавіатурах клавішних синтезаторів, промислових приладів, де потрібна довговічність і вибухобезпечність; в охоронних датчиках, в підводному устаткуванні (ліхтарі для дайвінгу, підводного полювання), в датчиках прилипання кабіни ліфтів, в теле-радіо апаратурі.

Основна сучасна тенденція - заміна герконів твердотільними датчиками Хола.

Питання для самоперевірки

1. Які елементи електронної апаратури називаються комутаційними?
2. Яке призначення комутаційних елементів?
3. Як класифікуються комутаційні елементи?
4. Типи й характеристики комутаційних елементів.
5. Електричні роз'єми, їх класифікація й застосування.
6. Конструкції електричних роз'ємів.
7. Що таке електричні ключі й де вони застосовуються?
8. Керовані й некеровані електричні ключі.
9. Що таке п'єзокнопки й де вони застосовуються?
10. Що таке електричні реле й де вони застосовуються?
11. Функціональне призначення електричних реле.
12. Класифікація електричних реле.
13. Класифікація електромагнітних реле.
14. Що таке геркони й де вони застосовуються?

Тести

1. Як змінюється питомий опір чистих металів з підвищенням температури?

- 1) монотонно зменшується
- 2) монотонно збільшується
- 3) змінюється за кривою з мінімумом
- 4) змінюється за кривою з максимумом

2. Як залежить питомий опір металів від розміру атомів домішки?

- 1) збільшується незалежно від розміру атомів домішки
- 2) збільшується тільки в тому випадку, якщо атоми домішки більші за атоми металу
- 3) збільшується тільки в тому випадку, якщо атоми домішки менші за атоми металу
- 4) збільшується в тому випадку, якщо атоми домішки більші за атоми металу і зменшується в тому випадку, якщо атоми домішки менші за атоми металу

3. Які недоліки в порівнянні з міддю має алюміній як провідниковий матеріал?

- 1) менша вага
- 2) менша теплопровідність
- 3) більший питомий опір
- 4) більша пластичність

4. Які переваги в порівнянні з міддю має алюміній як провідниковий матеріал?

- 1) менша вага
- 2) менша теплопровідність
- 3) більший питомий опір
- 4) більша пластичність

5. У яких умовах мідь є електроізоляційним матеріалом?

- 1) в розплавленому стані
- 2) в інтегральних мікросхемах
- 3) в сердечниках трансформаторів

4) в обмотках надпровідникових магнітів

6. У яких умовах можлива поява термоЕРС у замкнутому ланцюзі?

1) при неоднаковій температурі вздовж ланцюга

2) при наявності контактів різних провідників

3) при наявності контактів різних провідників та однакої температурі вздовж ланцюга

4) при наявності контактів різних провідників та неоднаковій температурі вздовж ланцюга

7. Величина питомої провідності матеріалу вимірюється в таких одиницях:

Ом;

Ом·м;

Ом/м;

Ом/м³

8. Найвища температура, яку можна виміряти металевією термопарою:

450 °С;

600 °С;

800 °С;

1600 °С

9. Яка з наведених термопар дозволяє вимірювати найвищу температуру?

мідь – константан;

мідь – копель;

хромель – алюмель;

платинородій – платина

10. Якою з наведених термопар найкраще вимірювати температуру до 400 °С?

мідь – константан;

мідь – копель;

хромель – алюмель;

платинородій – платина

11. Які переваги кремнію обумовлюють його широке застосування при виготовленні транзисторів і інтегральних схем?

- 1) найменші зворотні струми в р-n-переходах
- 2) найбільша допустима температура роботи р-n-переходу
- 3) найбільша швидкодія приладів
- 4) найбільш прийнятний комплекс всіх параметрів кремнію як напівпровідникового матеріалу

12. В яких випадках зменшується питома провідність кремнію n-типу при збільшенні сумарного вмісту електрично активних домішок?

- 1) якщо домішка належить до III групи періодичної системи хімічних елементів
- 2) якщо домішка належить до IV групи періодичної системи хімічних елементів
- 3) якщо домішка належить до V групи періодичної системи хімічних елементів
- 4) якщо домішка належить до перехідних хімічних елементів

13. Чому в антимоніді індію власна питома провідність визначається концентрацією електронів, а не дірок?

- 1) невелика ширина забороненої зони
- 2) велика власна провідність
- 3) концентрація електронів набагато більша ніж дірок
- 4) рухливість електронів набагато більша ніж дірок

14. На які параметри приладів впливає рухливість носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі?

- 1) на величину допустимої температури роботи р-n-переходу
- 2) на швидкодію приладів
- 3) на величину коефіцієнта підсилення транзистора
- 4) на величину допустимої потужності приладів

15. На які параметри приладів впливає теплопровідність напівпровідникового матеріалу?

- 1) на величину допустимої температури роботи р-n-переходу
- 2) на швидкодію приладів
- 3) на величину коефіцієнта підсилення транзистора
- 4) на величину допустимої потужності приладів

16. У яких одиницях виражають питомий поверхневий опір напівпровідників і діелектриків?

- 1) Ом
- 2) Ом/см
- 3) Ом/см²
- 4) Ом·см

17. Які види поляризації діелектриків можна вважати миттєвими?

- 1) електронна
- 2) електронно-релаксаційна
- 3) іонно-релаксаційна
- 4) дипольно-релаксаційна

18. Чим визначається електрична міцність діелектрика?

- 1) максимально допустимою електричною потужністю
- 2) максимально допустимим об'ємним струмом
- 3) пробивною електричною напруженістю
- 4) пробивною електричною напруженістю

19. Які з різних видів діелектриків можуть бути використані на високих частотах?

- 1) нелінійні
- 2) нелінійні полярні
- 3) лінійні полярні
- 4) лінійні неполярні

20. На які параметри приладів впливає ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу?

- 1) на величину допустимої температури роботи р-n-переходу
- 2) на величину допустимої температури роботи р-n-переходу та величину коефіцієнта підсилення транзистора
- 3) на швидкодію приладів
- 4) на величину допустимої потужності приладів

21. Як змінюється питомий опір чистих напівпровідників з підвищенням температури?

- 1) монотонно зменшується
- 2) монотонно збільшується

- 3) змінюється за кривою з мінімумом
- 4) змінюється за кривою з максимумом

22. Діамагнетики намагнічуються відносно напрямку вектора напруженості зовнішнього магнітного поля:

- 1) в тому ж самому напрямку
- 2) в протилежному напрямку
- 3) в перпендикулярному напрямку
- 4) в напрямку під косим кутом

23. Парамагнетики намагнічуються відносно напрямку вектора напруженості зовнішнього магнітного поля:

- 1) в тому ж самому напрямку
- 2) в протилежному напрямку
- 3) в перпендикулярному напрямку
- 4) в напрямку під косим кутом

24. До якого класу речовин за магнітними властивостями відносяться напівпровідники кремній і германій, хімічні сполуки типу $A^{III}B^V$?

- 1) діамагнетики
- 2) парамагнетики
- 3) феромагнетики
- 4) ферімагнетики

25. До магнітом'яких феромагнетиків відносяться магнітні матеріали з:

- 1) великою коерцитивною силою і високою магнітною проникністю
- 2) малою коерцитивною силою і низькою магнітною проникністю
- 3) малою коерцитивною силою і високою магнітною проникністю
- 4) великою коерцитивною силою і високою магнітною проникністю

26. До магнітотвердих феромагнетиків відносяться магнітні матеріали з:

- 1) низькою магнітною проникністю
- 2) високою магнітною проникністю
- 3) малою коерцитивною силою
- 4) великою коерцитивною силою

27. Феріти - це:

- 1) магнітні сплави на основі заліза
- 2) магнітні сплави на основі нікелю
- 3) магнітні сплави заліза з нікелем
- 4) магнітні оксиди

28. Прямий п'єзоелектричний ефект – це:

- 1) утворення механічної деформації діелектрика під дією на нього електричного поля
- 2) утворення електричного поля під дією на діелектрик механічної напруги
- 3) утворення електричного поля під дією на діелектрик температури
- 4) утворення електричного поля під дією на діелектрик випромінювання

29. Зворотний п'єзоелектричний ефект – це:

- 1) утворення механічної деформації діелектрика під дією на нього електричного поля
- 2) утворення електричного поля під дією на діелектрик механічної напруги
- 3) утворення електричного поля під дією на діелектрик температури
- 4) утворення електричного поля під дією на діелектрик випромінювання

30. Піроелектричний ефект – це:

- 1) утворення механічної деформації діелектрика під дією електричного поля
- 2) утворення електричного поля під дією на діелектрик механічної напруги
- 3) утворення електричного поля під дією на діелектрик температури

4) утворення електричного поля під дією на діелектрик випромінювання

31. Номінальний опір резистора – це електричний опір, значення якого:

- 1) вимірюється при випробуванні резистора;
- 2) позначене на резисторі;
- 3) є середнім на протязі терміну використання резистора;
- 4) є мінімальним на протязі терміну використання резистора;

32. ТКО резистора – це:

- 1) зміна опору резистора при зміні температури;
- 2) зміна опору резистора при зміні температури на 1°C ;
- 3) відносна зміна опору резистора при зміні температури;
- 4) відносна зміна опору резистора при зміні температури навколишнього середовища на 1°C .

33. Основна функція, яку виконує конденсатор в електронних схемах:

- 1) створювати реактивний опір;
- 2) накопичувати енергію електричного поля;
- 3) накопичувати енергію магнітного поля;
- 4) накопичувати енергію електромагнітного поля.

34. Конденсатори постійної ємності – такі конденсатори, ємність яких:

- 1) постійна у часі;
- 2) є фіксованою й у процесі експлуатації не регулюється;
- 3) є фіксованою й у процесі експлуатації не змінюється;
- 4) може регулюватися в процесі налаштування схеми.

35. У яких одиницях виражають індуктивність котушки?

- 1) Ом;
- 2) Гн;
- 3) Тл;
- 4) А/м.

36. Основна функція, яку виконує котушка індуктивності в електронних схемах:

- 1) чинити реактивний опір постійному струму;

- 2) чинити реактивний опір змінному струму;
- 3) чинити реактивний опір змінному струму при незначному опорі постійному струму;
- 4) чинити реактивний опір змінному струму при значному опорі постійному струму.

37. Дросель електричний – це котушка індуктивності, що вмикається в електричний ланцюг:

- 1) послідовно навантаженню для придушення або обмеження змінної складової струму;
- 2) паралельно навантаженню для придушення або обмеження постійної складової струму;
- 3) послідовно навантаженню для придушення або обмеження змінної складової струму;
- 4) паралельно навантаженню для придушення або обмеження постійної складової струму.

– це електромагнітний пристрій, що використовується:

- 1) для зміни напруги змінного струму;
- 2) для зміни сили змінного струму;
- 3) для зміни напруги й сили змінного струму;
- 4) для зміни потужності змінного струму.

39. Роз'єм електричний – це електромеханічний пристрій, призначений для:

- 1) електричного з'єднання електричних кіл;
- 2) електричного з'єднання або роз'єднання електричних кіл;
- 3) механічного з'єднання або роз'єднання електричних кіл;
- 4) електричного з'єднання або роз'єднання електричних кіл, як правило, у знеструмленому стані.

– це:

- 1) герметизований некерований електричний контакт;
- 2) герметизований керований контакт;
- 3) герметизований магнітокерований контакт;
- 4) негерметизований магнітокерований контакт.

Рекомендована література

Основна література

1. Антипов Б. Л., Сорокин В. С., Терехов В. А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы /Под редакцией проф. В. А. Терехова. – СПб.:Изд-во «Лань», 2003. – 208 с.
2. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. - Л: Энергоатомиздат, 1985. – 423 с.
3. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. - М.: Высш. школа, 1986. – 327 с.
4. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы.- М.: Высшая школа, 1986. – 234 с.
5. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. В 3 т. - М.: Энергоатомиздат, 1986. Т. 1; 1987, т. 2; 1988, т. 3. – 880 с.
6. Штофа Я. Электротехнические материалы в вопросах и ответах: Пер. со словацк. / Под ред. Б. М. Тареева. -М.: Энергоатомиздат, 1984. – 225 с.
7. Резисторы. Справочник. Под редакцией И. И. Четверткова и В. М. Терехова., 2 изд., Москва., "Радио и связь", 1991.
8. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. /Конструирование и расчет/. Москва., "Энергия", 1967.
9. Gurevich V. Electric Relays: Principles and applications, CRC Press, 2005, 704 pp.

Допоміжна література

10. Желудев И.С. Основы сегнетоэлектричества. – М.: Атомиздат. 1973. – 472 с.
11. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. - М.: Высшая школа, 1981. - 201 с.
12. Полупроводниковый кремний: теория и технология производства / Таран Ю.Н., Куцова В.З., Червоный И.Ф., Швец Е.Я., Фалькевич Э.С. – Запорожье, ЗГИА, 2004. – 344 с.
13. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. - М.: Энергоиздат, 1982. - 255 с.
14. Технология тонких пленок. /Под ред. М.И. Еминсона., Г.Г. Смолко/ Справочник т.т.1.2. – М.: «Сов. радио». 1977, (662с.) – 768с.

15. Тилл У., Лаксон Дж. – Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 501 с.
16. Шаскольская М.П. Кристаллография. - М.: Высш. школа, 1976. – 391 с.
17. Швец Е.Я. Технологии и материалы солнечной энергетики. Запорожье: ЗГИА, 2007. – 239 с.
18. Электрорадиоматериалы / Под ред. Б. М. Тареева. - М: Высшая школа, 1978. – 232 с.
19. Market survey on cell and module production 2005 / PHOTON International 2006, 3. - P. 100 -125.
20. Пасынков Л.К., Чиркин Л.Л. Полупроводниковые приборы. – М.: Высш. школа, 1986.
21. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя. – Киев: Наукова думка, 1981. - 670 с.
22. Терещук Р.М. Контроль качества деталей и узлов электронной аппаратуры. – Киев: Техніка, 1976. – 125с.

Список основних позначень

A - атомна маса, робота виходу електронів, eВ	L_o - число Лоренца, $V^2 \cdot K^{-2}$
a - період кристалічної решітки, нм	L_n - дифузійна довжина електронів, м
B - магнітна індукція, Тл	L_p - дифузійна довжина дірок, м
B_m - максимальна магнітна індукція за цикл перемагнічування, Тл	ℓ - довжина, відстань, м
B_r - залишкова індукція, Тл	$\bar{\ell}$ - середня довжина вільного пробігу носія заряду, м
B_s - індукція насичення, Тл	M - магнітний момент, $A \cdot m^2$
b - коефіцієнт температурної зміни ширини забороненої зони, eВ/К	m - маса, г
C - електрична ємність, Ф	m^* - ефективна маса носія заряду, г
c - швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі (швидкість світла), м/с	m_0 - маса спокою електрона, г
D - електрична індукція, Кл/м ² ;	m_n - ефективна маса електрона, г
коефіцієнт дифузії, м ² /с	m_p - ефективна маса дірки, г
d - густина речовини, кг/м ³	N - число частинок; концентрація домішок, м ⁻³ ;
E - напруженість електричного поля, В/м	ефективна густина станів для носіїв заряду, м ⁻³
E_c - коерцитивна сила, В/м	N_0 - число Авогадро, моль ⁻¹
E_{np} - електрична міцність, В/м	N_c - ефективна густина станів у зоні провідності, м ⁻³
e - заряд електрона, Кл	N_v - ефективна густина станів у валентній зоні, м ⁻³
F - сила, Н	N_a - концентрація акцепторів, м ⁻³
f - частота, Гц	N_d - концентрація донорів, м ⁻³
H - напруженість магнітного поля, А/м	n - концентрація електронів, м ⁻³ ;
H_c - коерцитивна сила, А/м	число витків, показник переломлення
$H_{св}$ - критична напруженість магнітного поля, при якій зникає надпровідність, А/м	n_0 - рівноважна концентрація електронів, м ⁻³
h - постійна Планка, eВ·с	n_i - власна концентрація електронів, м ⁻³
I - струм, А	P - поляризованість, Кл/м ² ;
I_m - амплітуда змінного струму, А	потужність, Вт
$I_{вит}$ - струм витoku, А	P_a - активна потужність, діелектричні втрати, Вт
i - миттєве значення струму, А	$P_{вт}$ - втрати на вихрові струми, Вт
j - густина струму, А/м ²	P_T - втрати на гістерезис, Вт
J - намагніченість, А/м	p - концентрація дірок, питомі втрати, Вт/м ³ ; тиск Н/м ²
J_s - намагніченість насичення, А/м	p_0 - рівноважна концентрація дірок, м ⁻³
k - постійна Больцмана, Дж/К	p_i - власна концентрація дірок, м ⁻³
k_m - магнітна сприйнятливість	
L - індуктивність, Гн; дифузійна довжина носіїв заряду, м	

Q - заряд, Кл; добротність
 e - елементарний заряд (заряд електрона), Кл
 R - активний опір, Ом; коефіцієнт відбиття
 R_{\square} - опір квадрата поверхні, Ом
 r - радіус, м; активний опір, Ом
 S - площа, м²
 T - температура, К
 U - різниця потенціалів, В;
 електрична напруга, В
 U_m - амплітуда змінної напруги, В
 U_k - контактна різниця потенціалів, В
 $U_{пр}$ - пробивна напруга, В
 u - швидкість теплового руху, м/с
 V - об'єм, м³
 v - швидкість дрейфу носіїв заряду, м/с
 E - енергія, Дж, еВ
 E_0 - енергія іонізації, Дж, еВ
 E_c - енергія, що відповідає дну зони провідності, Дж, еВ
 E_F - енергія (рівень) Фермі, Дж, еВ
 E_v - енергія, що відповідає стелі валентної зони, Дж, еВ
 w - число витків котушки
 x - молярна частка компонента
 Z - відносний заряд ядра, порядковий номер елемента
 α - показник поглинання
 α - температурний коефіцієнт
 α_T - питома термо-е.р.с., В·К⁻¹
 γ - питома провідність, См·м⁻¹
 γ_i - власна питома провідність, См·м⁻¹
 Δ - глибина проникнення електромагнітного поля, м
 ΔE - ширина забороненої зони, еВ
 ΔE_a - енергія іонізації акцепторів, еВ
 ΔE_d - енергія іонізації донорів, еВ

δ - кут діелектричних втрат
 δ_m - кут магнітних втрат
 ϵ - відносна діелектрична проникність
 ϵ_0 - електрична постійна, Ф/м
 ϵ_n - початкова діелектрична проникність
 ϵ_p - реверсивна діелектрична проникність
 T_K - температура Кюрі, К
 λ - довжина хвилі, м
 μ - відносна магнітна проникність; рухливість носіїв заряду, м²/В·с
 μ_0 - магнітна постійна, Гн/м
 μ'' - гужла магнітна проникність j
 μ_n - рухливість електронів, м²/В·с
 μ_p - рухливість дірок, м²/В·с
 μ_B - магнетон Бора, Дж/Тл
 μ_n - початкова магнітна проникність
 μ_{ef} - ефективна магнітна проникність
 f - частота, Гц
 ρ - питомий опір, Ом·м
 ρ_s - питомий поверхневий опір, Ом
 σ - поверхнева густина зарядів, Кл/м²;
 механічна напруга, Н/м²; межа міцності, Н/м²
 τ - час життя носіїв заряду, с
 τ_0 - час релаксації, с; час вільного пробігу носіїв заряду, с
 Φ - магнітний потік, Вб; світловий потік, Вт
 ϕ - фазовий зсув
 χ - діелектрична сприйнятливість; енергія електронної спорідненості, еВ
 ω - кутова частота, с⁻¹

Фізичні постійні

Електрична постійна $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

Магнітна постійна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Маса спокою електрона $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг

Заряд електрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл

Швидкість світла $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с

Число Авогадро $N_0 = 6,022 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ = $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

Постійна Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,14 \cdot 10^{-15}$ еВ·с

Постійна Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,62 \cdot 10^{-5}$ еВ/К

Магнетон Бора $\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл

Радіус Бора $a_0 = 0,5292 \cdot 10^{-10}$ м

Постійна Фарадея $F = 9,648 \cdot 10^4$ Кл·моль⁻¹

Число Лоренца $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$ В²·К⁻²

Універсальна газова постійна $R = 8,314$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹

1 еВ = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж

Предметний покажчик

- активний діелектрик 126, 127
акустичний вимикач 251
акцептор 57, 76, 79, 83
алмаз 8, 73, 75
альсіфер 164, 168
алюмель 40
алюміній 35, 36
алюмінюоксид (корундова кераміка) 125
аморфні тіла 12
антимонід індію 85
антисегнетоелектрик 129
антиферомагнетик 149
арсенід галію 83, 84
- барієвий ферит 176, 177
брокерит 125
- вакансія 10, 11
валентна зона 13, 14
варіконд 131, 200, 203, 204
варістор 189
високовольтний конденсатор 202, 206
високочастотні:
 конденсатор 208
 котушка індуктивності 228
висококоерцитивний сплав 174
вихрові струми 156
власний напівпровідник 53, 61
вольт – амперна характеристика резистора 185
вольфрам 40
вуглецевий резистор 185
вуглець 46, 78
вуглецеві матеріали 46
- геркон 258, 259
германій 75, 79-81
гетерополярний зв'язок (див. іонний зв'язок) 8
гетероструктура 86, 92
гетинакс 118
гістерезис 128, 152
- дефекти структури 10, 11
дипольні (поляри) діелектрики 102
дипольно-релаксаційна поляризація 99
диселенід міді 92
дислокація 11
дифузійна довжина носіїв заряду 64
- діамагнетик 147, 148
дігідрофосфат амонію 134
дігідрофосфат калію 131
діелектрик 18, 96
діелектрична проникність 96, 129, 130
діелектрична сприйнятливність 97
діелектрична точка Кюрі 129
діелектричний гістерезис 128, 129
діелектричні втрати 106
дірка 15, 56, 57
домен 127, 151, 156, 159
домішка впровадження 11, 56
домішка заміщення 56
домішковий напівпровідник 57
донор 57- 59, 79, 83
дрейф носіїв заряду 21
дросель 236-2238
дротяний резистор 188
- екситон 66
електрет 137
електрична міцність резистора 183
електричний пробій діелектрика 108, 110
електроізоляційний матеріал 112
електромагнітний ключ 252
електрон провідності 53, 61
електронна поляризація 97
електронний ключ 252
електронно-релаксаційна поляризація 99
електрооптичний кристал 131
електротехнічна сталь 162, 163, 167
елементарний напівпровідник 72, 73
енергетична діаграма 29, 57
ефект Хола 70
- ємність конденсатора 199
- заборонена зона 15
залізо 162
зв'язок Ван-дер-Ваальса 9
золото 37, 46, 248
зона провідності 13
зонна теорія твердого тіла 12
- ізоляторне скло 121
ізоляторний фарфор 124
імпульсний конденсатор 204
іонізаційний пробій діелектрика 111
іонна поляризація 98

іонний (гетерополярний) зв'язок 8
іонно-релаксаційна поляризація 100
ітрій-алюмінієвий гранат 140, 141

карбід кремнію 81, 82
кварц 133
кварцове скло 119
кермет 46
керований (активний) діелектрик 126
ковалентний (гомеополярний) зв'язок 7, 8
коерцитивна сила 128, 153, 161
коефіцієнт нелінійності варіконда 205
компаунд 118
композиційний резистор 186
конденсатор 199
конденсаторна кераміка 125
константан 39
контактол 46
копель 40
корундова кераміка (алюмінюоксид) 125
котушка індуктивності 222
кремній 8, 60, 72, 75-79, 90, 91
крива намагнічування 151
кристал 10, 73
кристалічна решітка 9, 22, 24, 56
кут втрат 107, 157

лазерне скло 121, 140, 141
лінійний полімер 113-116
люмінесценція 67, 68
люмінофор 68, 88

магній-маргацевий ферит 171
магнітна проникність 26, 146, 153
магнітна сприйнятливність 146
магнітна точка Кюрі 155
магнітний гістерезис 152
магнітні втрати 155-157
магнітодіелектрик 165, 168
магнітом'який матеріал 162-168
магнітом'який ферит 167
магнітострикція 154, 172
магнітотвердий матеріал 173
магнітна текстура 174
манганін 38
марганець-цинковий ферит 165
метал 9, 14, 16, 20
металевий зв'язок 9
металокерамічний магніт 175
металоокисний резистор 187
металопластичний магніт 175

металоплівковий резистор 186
міграційна поляризація 101
мідь 33, 34
міжвузловий атом 10
молекулярний зв'язок – див. зв'язок Ван-дер-Ваальса 9
молібден 41
монокристал 77, 1, 163, 168, 172
мультикремній 91

нагрівостійкість 114
надпровідник 32, 35-37
надпровідність 31
намагніченість 146
наногетероструктура 92
напівпровідник 14, 17
напівпровідники $A^{III}B^V$ 82-86
неполярний діелектрик 101
неполярний конденсатор 202
нерівноважні носії заряду 63
низькокоерцитивний сплав 163
нікель 150, 154, 163, 172
нікель-цинковий ферит 165
нікель-марганцевий ферит 165
ніобат барію-стронцію 132
ніобат літію 132, 134
ніобат натрію 132
ніобій 42
нітрид галію 84
ніхром 39, 40
номінальна потужність розсіювання 183
номінальний опір резистора 182

опорний конденсатор 207
органічний напівпровідник 93
паладій 44
парамагнетик 147
перемикач 249
перешкодопридушуючий конденсатор 202, 207, 209
пермалой 163, 164
п'єзоелектрик 132
п'єзоелектричний ефект 132, 133
п'єзокераміка 134
п'єзокнопка 254, 255
піроелектрик 135
платина 40, 44, 172, 248
платинородій 40
поверхневий пробій діелектрика 111
погоджувальний трансформатор 241
полівінілхлорид 117

поліетилен 115
 полікор 125
 полімер 113-117
 полімерний провідник 47-48
 поліморфізм 11
 поліпропілен 115
 полістирол 115
 політетрафторетилен (тефлон) 115
 поляризованість 97
 полярні (дипольні) діелектрики 102
 пробій діелектрика 109-111
 прохідний конденсатор 207
 пусковий конденсатор 204

радіофарфор 124
 редокс-полімер 47, 48
 резистор 182
 резонансна поляризація 101
 реле 255-258
 реній 43
 рівень шумів резистора 184
 рідкий кристал 138
 роз'єм електричний 247
 рубін 141
 рухливість носіїв заряду 61

світловод 122
 сегнетова сіль 134
 сегнетоелектрик 127
 сегнетоелектрична точка Кюрі 129
 сегнетокераміка 130, 131
 селен 73
 селенід кадмію 67, 87, 88
 сердечник котушки індуктивності 225-230
 ситал 123
 скло 12, 119-121
 скловолокно 121, 122
 сонячна батарея 90
 спонтанна поляризація 101, 127-130
 срібло 43-45, 248
 сталь 163
 сульфат літію 134, 135
 сульфід кадмію 87, 88

сульфід цинку 87, 88

тангенс кута діелектричних втрат 107
 тангенс кута магнітних втрат 157
 тантал 42
 танталат літію 136
 тверді розчини заміщення 67, 72, 83, 85, 88, 131, 134, 136
 текстоліт 118
 телурид кадмію 87, 88
 телуриди 87, 88
 температурний коефіцієнт:
 ємності 214
 опору 183
 тепловий пробій діелектрика 111
 термо-е.р.с. 29, 30, 69
 термопара 29, 40
 терморезистор 188, 189
 тиконд 126
 титан 41, 175
 титанати 36, 131, 138
 точка Кюрі 129, 155
 точковий дефект 10
 тригліцинсульфат 131, 136
 трансформатор 239

феримагнетик 149
 ферит 165-168
 фероваріометр 235
 феромагнетик 148, 150-151
 фосфід галію 83, 84
 фотовольтаїчний ефект 90
 фотопровідність 67

халькогенід 67, 87-88
 хром 42
 хромель 40

циліндричні магнітні домени 159, 160
 цирконат-титанат свинцю (ЦТС) 134
 цифровий ключ 253

час життя нерівноважних носіїв заряду 64, 78

