

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра енергетики та електротехніки

Рег. №9/868-27.10.09

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

Електротехнічні матеріали

для студентів

I курсу

напряму

6.051001

Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології

галузі знань

0510

Метрологія, вимірвальна техніка та інформаційно-вимірвальні технології

факультету

Машинобудування

Херсон – 2009 р.

Конспект лекцій з дисципліни **Електротехнічні матеріали**, для спеціальності 6.051001
Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології

Укладач: **старший викладач Дон Н.Л.**

Кількість сторінок 120.

Затверджено

на засіданні кафедри **енергетики та електротехніки**

Протокол № 4 від 22.10.09

Завідувач кафедри **Баганов Є.О.**

ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

1 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Основні види поляризації діелектриків
- ✓ Класифікація діелектриків за видами поляризації

2 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Електропровідність газоподібних діелектриків
- ✓ Електропровідність рідких діелектриків
- ✓ Електропровідність твердих діелектриків

3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

- ✓ Види діелектричних втрат
- ✓ Діелектричні втрати в газах
- ✓ Діелектричні втрати в рідких діелектриках
- ✓ Діелектричні втрати у твердих діелектриках

4 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Пробій газів
- ✓ Пробій газу в однорідному полі
- ✓ Пробій газів у неоднорідному електричному полі

5 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

РОЗДІЛ II. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

1. Провідникові матеріали
2. Основні положення теорії електропровідності
3. Електропровідність металів
4. Провідникові матеріали: мідь, алюміній, їх сплави
5. Сплави високого опору
6. Надпровідники
7. Кріопровідники

РОЗДІЛ III. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

1. Електропровідність напівпровідників
2. Електронно-дірковий перехід
3. Термоелектричні явища в напівпровідниках
4. Фотопровідність напівпровідників
5. Ефект Холла
6. Вплив деформацій на провідність напівпровідників
7. Прості напівпровідники
8. Бінарні з'єднання

РОЗДІЛ IV. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

1. Класифікація речовин за магнітними властивостями
2. Феромагнетики. Процеси при намагнічуванні феромагнетиків
3. Магнітні втрати
4. Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків
5. Магнітом'які й магнітотверді матеріали

ВСТУП ДО ПРЕДМЕТУ

Сучасний науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з розробкою та освоєнням нових матеріалів. Саме матеріали стали ключовою ланкою, яка визначає успіх багатьох інженерних рішень при створенні електротехнічного обладнання та електронної апаратури. Тому вивченню матеріалів відводиться значне місце.

Практика постійно висуває все жорсткіші та різноманітні вимоги до властивостей та поєднання властивостей у матеріалів.

Відповідно зростає кількість та номенклатура матеріалів. Сьогодні кількість найменувань матеріалів, що застосовуються в електротехніці з різноманітною метою, складає десятки тисяч.

Матеріали, що застосовуються в електронній техніці, поділяють на електротехнічні, конструкційні та спеціального призначення.

Електротехнічними називають матеріали, що характеризуються певними властивостями стосовно електромагнітного поля, та застосовуються в техніці з урахуванням цих властивостей.

Практично, різні матеріали піддаються впливам як окремо електричних та магнітних полів, так і їх сукупністю. За поведінкою в магнітному полі електротехнічні матеріали поділяють на сильно магнітні (магнетики) та слабкомагнітні. Перші знайшли особливо широке застосування в техніці саме через їх магнітні властивості.

За поведінкою в електричному полі матеріали поділяють на провідникові, напівпровідникові та діелектричні.

Більшість електротехнічних матеріалів можна віднести до слабкомагнітних чи практично немагнітних. Але і серед магнетиків слід розрізняти провідникові, напівпровідникові та практично непровідні, що визначає частотний діапазон їх застосування.

Провідниковими називають матеріали, основною електричною властивістю яких є сильно виражена електропровідність. Їх застосування в техніці зумовлене в основному цією властивістю, що визначає високу питому електричну провідність при нормальній температурі.

Напівпровідниковими називають матеріали, що за питомою провідністю знаходяться посередині між провідниковими та діелектричними матеріалами і особливою властивістю яких є сильна залежність питомої провідності від концентрації та виду домішок чи різноманітних дефектів, а також в більшості випадків від зовнішніх енергетичних впливів (температури, освітленості і т.д.)

Діелектричними називають матеріали, основною електричною властивістю яких є здатність до поляризації і в яких можливе існування електростатичного поля. Реальний діелектрик тим більше буде наближеним до ідеального, чим менша його питома провідність і чим слабше у нього виражені уповільнені механізми поляризації, пов'язані з розсіюванням електричної енергії та виділенням теплоти.

При застосуванні діелектриків – одного із найпоширеніших класів електротехнічних матеріалів – досить чітко визначилась необхідність застосування як пасивних, так і активних властивостей цих матеріалів.

Пасивні властивості діелектричних матеріалів застосовуються, коли їх використовують в якості електроізоляційних матеріалів та діелектриків конденсаторів звичайних типів. Електроізоляційними матеріалами називають діелектрики, які не допускають витоку електричних зарядів, тобто з їх допомогою відділяють поміж собою електричні кола чи струмоно-

сні частини (від корпусу, від землі та ін..) В цих випадках діелектрична проникливість матеріалу не відіграє особливої ролі чи вона повинна бути якомога меншою, щоб не вносити в схеми паразитних ємностей. Якщо матеріал застосовується в якості діелектрика конденсатора визначеної ємності і мінімальних розмірів, то за рівних умов бажано, щоб цей матеріал мав велику діелектричну проникливість.

Активними (керованими) діелектриками є сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики, електролюмінофори, матеріали для випромінювачів та затворів в лазерній техніці, електрети та ін.

Умовно до провідників відносять матеріали з питомим електричним опором $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, а до діелектриків – матеріали з $\rho > 10^8$ Ом·м. При цьому слід відзначити, щор питомий опір добрих провідників може складати всього 10-8 Ом·м, а у кращих діелектриків може перевищувати 10¹⁶ Ом·м.

Питомий опір напівпровідників в залежності від будови та складу матеріалів, а також від умов їх експлуатації може змінюватися в межах 10,5 - 10⁸ Ом·м.

Добрими провідниками електричного струму є метали. Із 105 хімічних елементів лише 25 є неметалами, причому 12 елементів можуть проявляти напівпровідникові властивості.

Але крім елементарних речовин існують тисячі хімічних сполук, сплавів чи композицій із властивостями провідників, напівпровідників чи діелектриків. Чітку межу між значеннями питомого опору різних класів матеріалів провести досить складно. Наприклад, більшість напівпровідників при низьких температурах поведуть себе як діелектрики. В той час діелектрики при сильному нагріванні можуть виявляти властивості напівпровідників. Якісна відмінність полягає в тому, що для металів провідний стан є основним, а для напівпровідників і діелектриків – збуреним.

Для розуміння електричних, магнітних і механічних властивостей матеріалів, а також причин старіння необхідно знати їх хімічний і фазовий склад, атомну структуру і структурні дефекти.

Сукупність науково-технічних знань про фізико-хімічну природу, методи дослідження і виготовлення різноманітних матеріалів складає основу матеріалознавства, провідна роль якого сьогодні загальною признана в багатьох областях техніки та промисловості. Успіхи матеріалознавства дозволили перейти від використання вже відомих до цілеспрямованого створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями.

При вивченні розділів, присвячених різним класам матеріалів, слід притримуватися схеми, що містить фізичну сутність явищ та процесів, що відбуваються в матеріалах при їх взаємодії з електромагнітним полем, аналіз властивостей матеріалів в різноманітних умовах експлуатації, а також найбільш важливі області застосування в приладах та пристроях електротехніки.

Однією із найважливіших умов стабільного розвитку економіки держави є надійне функціонування систем енергозабезпечення. Сучасна електроенергетика використовує в елементах конструкцій надзвичайно широкий спектр різноманітних, електротехнічних матеріалів від механічних, фізико-хімічних та ін. властивостей яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичного обладнання. Тому актуальним завданням забезпечення систем електроспоживання якісним обладнанням є розробка і впровадження нових, більш якісних матеріалів з кращими функціональними й експлуатаційними характеристиками.

При проектуванні та розробці нових електротехнічних приладів і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних та механічних властивостей використаних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього

завдання. Забезпечення високої надійності роботи електроенергетичного обладнання ґрунтується насамперед на чітких уявленнях про процеси, що відбувається в матеріалах протягом їх експлуатації, знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів на їх основі, вимогах діючих ДСТУ, нормативних та технічних умовах їх використання. Це є гарантом надійної роботи електричних мереж і всього комплексу енергетичного обладнання: генераторів, трансформаторів, комутаційних апаратів, компенсуючих пристроїв та ін., в конструкції яких використовують електротехнічні матеріали. Вони знаходяться під впливом різноманітних зовнішніх факторів, у тому числі сильних електромагнітних полів, високих температур, статичних та динамічних навантажень, атмосферних впливів. Тому знання умов забезпечення стабільності параметрів цих матеріалів під дією вказаних факторів є важливим для забезпечення безперебійного функціонування електрообладнання і всієї електроенергетичної системи в цілому.

Таким чином курс «Електротехнічні матеріали» можна розглядати як одну з базових дисциплін для всіх електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей, оскільки в ній комплексно розглядаються властивості матеріалів, у тому числі в реальних умовах експлуатації електроенергетичного обладнання.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. / -М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. и др. Электротехнические материалы. –Л.: Энергоатомиздат, 1985. -304 с.
3. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. –М.: Энергия, 1982. -320 с.
4. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. –М.: Высш. шк., 1986. -350 с.

Додаткова

1. Электротехнические материалы. Справочник. / Сост. В.В. Березник, Н.С. Прохоров и др. М.: Энергоатомиздат, 1963. -804 с.
2. В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. материалы электронной техники. -М.: Высшая школа, 1966. -365 с.
3. ГОСТ 2155-80 Материалы диэлектрические. Термины и определения.
4. ГОСТ 19880-80 Электротехника. Основные понятия. Термины и определения.
5. ГОСТ 2265-76 Материалы проводниковые. Термины и определения.
6. ГОСТ 22622-77 Материалы полупроводниковые. Термины и определения.
7. ГОСТ 19693-81 Материалы магнитные. Термины и определения.

РОЗДІЛ I. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

1 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Основні види поляризації діелектриків
- ✓ Класифікація діелектриків за видами поляризації

2 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Електропровідність газоподібних діелектриків
- ✓ Електропровідність рідких діелектриків
- ✓ Електропровідність твердих діелектриків

3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

- ✓ Види діелектричних втрат
- ✓ Діелектричні втрати в газах
- ✓ Діелектричні втрати в рідких діелектриках
- ✓ Діелектричні втрати у твердих діелектриках

4 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

- ✓ Пробій газів
- ✓ Пробій газу в однорідному полі
- ✓ Пробій газів у неоднорідному електричному полі

5 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Діелектрики належать до найбільш розповсюджених матеріалів, які застосовуються в електротехнічній промисловості. Якщо раніше ці матеріали використовували тільки як електричну ізоляцію, то в даний час, завдяки досягненням науки, вони одержали поширення в різних галузях електротехніки, радіоелектроніки й технічної кібернетики. У зв'язку з цим, раціональний вибір того чи іншого діелектричного матеріалу можливий тільки на підставі знань про їхні характеристики і вплив на них різних факторів. Це дозволить забезпечити надійну і стабільну роботу виробів, у яких застосовуються діелектричні матеріали.

1. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Основною властивістю діелектриків є здатність до поляризації під дією прикладеної напруги. Процес поляризації являє собою зміну розташування в просторі часток діелектрика, що мають електричні заряди. Елементарні диполі, що представляють зв'язані й невіддільні один від одного молекули діелектрика, позитивні й негативні заряди яких зміщені один відносно другого, характеризуються електричним моментом \mathbf{p} :

$$\mathbf{p} = q \mathbf{l}, \quad (1.1.1)$$

де q – заряд диполя; \mathbf{l} - відстань між зарядами.

Під дію електричного поля диполі починають орієнтуватися в просторі і створюють сумарний момент. Такий момент, віднесений до одиниці об'єму діелектрика, називається поляризованістю діелектрика \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i}{V}, \quad (1.1.2)$$

де V – об'єм діелектрика

Залежність поляризованості \mathbf{P} від напруженості електричного поля \mathbf{E} в діелектрику для більшості діелектриків має лінійний характер. При малих значеннях напруженості поля для ізотропних діелектриків можна записати

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} = \alpha \mathbf{E} \quad (1.1.3)$$

де χ - діелектрична сприйнятливість діелектрика. Вона зв'язана з відносною діелектричною проникністю діелектрика співвідношенням $\epsilon_r = 1 + \chi$;

α - абсолютна діелектрична сприйнятливість чи питома поляризованість.

Особливу групу складають сегнетоелектрики, електрети, а також деякі іонні кристали, для яких зв'язок між \mathbf{P} і \mathbf{E} нелінійний і залежить від попереднього значення \mathbf{E} .

Зсув зарядів у діелектрику приводить до утворення внутрішнього поля, спрямованого протилежно зовнішньому, що може бути представлено вектором електричного зсуву \mathbf{D} .

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} (1 + \chi) = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1.1.4)$$

де ϵ_0 – електрична постійна, рівна $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Перший доданок у цьому виразі пропорційний розподіленій щільності заряду, утвореного у вакуумі, а другий залежить від ступеня поляризації діелектрика. Відповідно до теореми Гаусса для поля вектора \mathbf{D} потік цього вектора крізь довільну замкнуту поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, охоплених цією поверхнею

$$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = q_{\text{внутр}} \quad (1.1.5)$$

Слід зазначити, що вектор \mathbf{D} являє собою суму двох зовсім різних величин, у зв'язку з чим він не має глибокого фізичного змісту і являє собою допоміжний вектор. Однак, у багатьох випадках вектор \mathbf{D} значно спрощує вивчення поля в діелектриках.

Наведені співвідношення (1.4) і (1.5) можуть бути використані як для ізотропних, так і для анізотропних діелектриків. Розмірність вектора \mathbf{D} та сама, що і вектора \mathbf{P} – Кл/м².

Використовуючи вираз (1.3) для ізотропного діелектрика, залежність вектора \mathbf{D} від вектора \mathbf{E} можна подати у виді

$$\mathbf{D} = \epsilon_0(1 + \chi)\mathbf{E} \quad \text{чи} \quad \mathbf{D} = \epsilon_0\epsilon_r\mathbf{E} \quad (1.1.6)$$

Кожний діелектрик з нанесеними на нього електродами, включений в електричну мережу, можна розглядати як конденсатор певної ємності. Заряд такого конденсатора Q дорівнює

$$Q = C U \quad (1.1.7)$$

де C – ємність конденсатора,

U – прикладена напруга.

При заданому значенні прикладеної напруги величина заряду Q складається із заряду Q_0 , який був би присутній на електродах, якщо їх розділяв вакуум, і заряду Q_d , що обумовлений поляризацією діелектрика, який фактично поділяє електроди:

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (1.1.8)$$

Здатність діелектрика утворювати ємність можна оцінити за допомогою параметра відносної діелектричної проникності ϵ_r , що представляє відношення заряду Q , отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду Q_0 , який можна було б одержати на конденсаторі тих же геометричних розмірів і при тій же напрузі, якби між електродами знаходився вакуум:

$$\epsilon_r = \frac{Q_d}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (1.1.9)$$

З наведеної формули видно, що значення ϵ_r будь-якого діелектрика більше одиниці і тільки якщо вакуум $\epsilon_r = 1$.

Фактично параметр ϵ_r показує, у скільки разів зміниться ємність конденсатора при заміні вакууму між його пластинами досліджуваним діелектриком:

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (1.1.10)$$

Крім параметра ϵ_r часто використовують параметр абсолютної діелектричної проникності:

$$\epsilon_a = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1.1.11)$$

Відносна діелектрична проникність використовується в багатьох рівняннях, що характеризують фізичні процеси, які протікають у діелектриках. Так, відповідно до закону Кулона сила взаємодії F двох точкових зарядів q_1 і q_2 , розташованих в неорганічному середовищі з відносною діелектричною проникністю ϵ_r на відстані h один від другого, дорівнює

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_0 \epsilon_r 4\pi h^2} \quad (1.1.12)$$

Значення діелектричної проникності важливо знати і для розрахунку напруженості електричного поля в багатошарових діелектриках. Наприклад, для випадку двошарового конденсатора (рис.1.1) напруженість електричного поля в шарах дорівнює

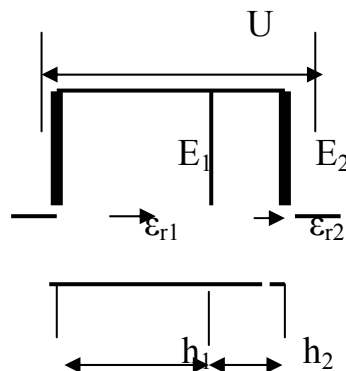


Рис.1.1 – Двошаровий конденсатор

$$E_1 = \epsilon_{r2} \frac{U}{h_1 \epsilon_{r2} + h_2 \epsilon_{r1}}, E_2 = \epsilon_{r1} \frac{U}{h_1 \epsilon_{r2} + h_2 \epsilon_{r1}} \quad (1.1.13)$$

Напруга на шарах

$$U_1 = \frac{\epsilon_{r2} h_1 U}{h_1 \epsilon_{r2} + h_2 \epsilon_{r1}}, \quad U_2 = \frac{\epsilon_{r1} h_2 U}{h_1 \epsilon_{r2} + h_2 \epsilon_{r1}} \quad (1.1.14)$$

З наведених формул виходить, що при меншій діелектричній проникності шару напруга на ньому збільшується. В особливо не вигідному положенні виявляються повітряні прошарки всередині ізоляції. У зв'язку з малим значенням ϵ_r і низкою електричною міцністю в таких прошарках легко виникають часткові розряди.

У тому випадку, коли діелектрик представляє суміш хімічно невзаємодіючих один з одним компонентів з різними діелектричними проникностями, загальну діелектричну проникність можна визначити приблизно на підставі рівняння Ліхтенеккера

$$\epsilon^x = \theta_1 \epsilon_1^x + \theta_2 \epsilon_2^x \quad (1.1.15)$$

де $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2$ - відповідно відносні діелектричні проникності суміші й окремих компонентів; θ_1, θ_2 - об'ємні концентрації компонентів, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; x - величина, що характеризує розподіл компонентів і приймає значення від +1 до -1.

При паралельному включенні компонентів $x = +1$ і вираз (1.15) має вигляд

$$\epsilon = \theta_1 \epsilon_1 + \theta_2 \epsilon_2 .$$

При послідовному включенні компонентів, коли $x = -1$,

$$1/\epsilon = \theta_1 / \epsilon_1 + \theta_2 / \epsilon_2 .$$

Якщо компоненти розподілені хаотично, то

$$\ln \epsilon = \theta_1 \ln \epsilon_1 + \theta_2 \ln \epsilon_2 \quad (1.1.16)$$

Електрична ємність конденсатора, крім геометричних розмірів і конфігурації конденсатора, залежить також від відносної діелектричної проникності діелектрика, що в ньому використовується.

Ємність плоского конденсатора визначається за формулою

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S / h, \quad (1.1.17)$$

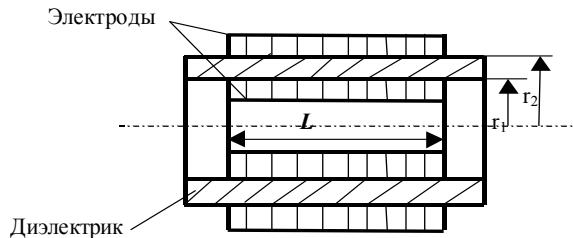
де S - площа електрода;

h - відстань між електродами.

Для циліндричного конденсатора (рис.1.2) запишемо

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi l}{\ln d_2 / d_1} \quad (1.1.18)$$

якщо $d_2 - d_1 \ll d_1$, то



$$C \approx \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} \quad (1.1.19)$$

Рис.1.2 – Циліндричний конденсатор

Для ізоляції кабелів, систем рівнобіжних проводів і т.п. вводиться поняття питомої (погонної) ємності, тобто ємності, віднесеної до одиниці довжини $K = C/L$. Так, для одножильного кабеля питома ємність (нФ/м) між жилою діаметром d_1 і металевою оболонкою чи екраном з діаметром d_2 дорівнює

$$K = 0,02416 \frac{\varepsilon_r}{\lg d_2 / d_1} \quad (1.1.20)$$

або при $d_2 - d_1 \ll d_1$

$$K \approx 0,0278 \varepsilon_r \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} \quad (1.1.21)$$

Для двох рівнобіжних круглих проводів діаметром d кожний при відстані між їхніми осями h , за умови $d \ll h$ і без урахування впливу землі питома ємність визначається за формулою

$$K = 0,01208 \frac{\varepsilon_r}{\lg 2h / d} \quad (1.1.22)$$

За цією ж формулою можна визначити питому ємність між проводом і землею.

Величина відносної діелектричної проникності для різних діелектриків змінюється в широких межах. Значення ε_r газів близьке до одиниці. Так, для

повітря $\epsilon_r = 1,00058$. Більшість практично застосовуваних рідких і твердих діелектриків мають значення ϵ_r порядку декількох одиниць, менше зустрічаються діелектрики, в яких ϵ_r складає кілька десятків і дуже рідко, коли ця величина перевищує значення сто одиниць. У сегнетоелектриках вона може досягати значення кілька десятків тисяч.

✓ Основні види поляризації діелектриків

Велика кількість різних механізмів поляризації діелектриків, що мають місце в діелектриках, можна розділити на два основних види:

- поляризації, що протікають під впливом електричного поля практично миттєво і не супроводжуються розсіюванням енергії, тобто без виділення тепла;
- поляризації, що протікають уповільнено і які супроводжуються розсіюванням енергії в діелектрику, тобто нагріванням. Такий вид поляризації називається релаксаційною.

До першого виду відносяться електронна й іонна поляризації. Інші механізми поляризації слід віднести до релаксаційних.

Електронна поляризація - це зсув орбіт електронів щодо атомних ядер. Даний механізм поляризації спостерігається у всіх діелектриків незалежно від наявності в них інших видів поляризації. При переміщенні діелектрика в зовнішнє електричне поле електронна поляризація встановлюється за час порядку 10^{-15} с. При підвищенні температури діелектрика у зв'язку з тепловим розширенням речовини і зменшенням числа часток в одиниці об'єму електронна поляризація зменшується. Однак слід зазначити, що температура не впливає на зсув і деформацію електронних орбіт атомів і іонів.

Іонна поляризація - це зсув один щодо одного іонів, що утворюють молекулу. Ця поляризація протікає за час порядку 10^{-13} с. При підвищенні температури іонна поляризація посилюється. Причиною цього є ослаблення пружних сил, що діють між іонами внаслідок збільшення відстані між ними при тепловому розширенні.

Дипольна поляризація - це орієнтація дипольних молекул у полярних діелектриках під дією електричного поля. Вона належить до числа релаксаційних поляризацій. Діелектрики, що містять електричні диполі, здатні орієнтуватися в зовнішньому електричному полі, називаються полярними. Очевидно, що дана поляризація буде виявлятися тим інтенсивніше, чим більше дипольний момент даного матеріалу. Залежно від величини електричних моментів диполів, в'язкості середовища, а також інтенсивності теплового руху молекул час установлення даної поляризації складає 10^{-2} – 10^{-10} с.

Дипольна поляризація властива полярним газам і рідинам. У цих діелектриках у зв'язку з незначною щільністю і невеликими розмірами молекул при впливі електричного поля відбувається поворот самих молекул. У твердих діелектриках також може спостерігатися дипольна поляризація. Але, на відміну від газоподібних і рідких діелектриків, поворот молекул тут неможливий, а відбувається орієнтація окремих груп атомів без порушення їхнього зв'язку з молекулами.

Зі збільшенням температури молекулярні сили слабшають, в'язкість речовини зменшується, тому спочатку дипольна поляризація посилюється. Однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, що зменшує вплив електричного поля, і коли тепловий рух стає інтенсивним, дипольна поляризація зменшується. Проміжок часу, протягом якого впорядкованість орієнтованих полем диполів після його зняття зменшується внаслідок теплового руху в e раз у порівнянні з початковим значенням, називається часом релаксації.

Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в іонних діелектриках з нещільним упакуванням іонів. Даний вид поляризації характерний для неорганічного скла, а також для деяких неорганічних кристалічних речовин. Слабко зв'язані іони під дією зовнішнього електричного поля крім хаотичних теплових переміщень одержують додаткові переміщення в напрямку поля. Після зняття електричного поля орієнтація іонів поступово слабшає за експонент-

ним законом. При підвищенні температури іонно-релаксаційна поляризація посилюється.

Електронно-релаксаційна поляризація виникає в діелектриках за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових "дефектних" електронів чи дірок. Даний вид поляризації характерний для діелектриків з електронною електропровідністю і значним внутрішнім електричним полем. Діелектрики з електронно-релаксаційною поляризацією мають високе значення відносної діелектричної проникності. У кривій залежності $\epsilon_r = f(T)$ спостерігається максимум навіть при негативних температурах. При збільшенні частоти дана поляризація, як правило, зменшується.

Міграційна поляризація характерна для неоднорідних діелектриків і обумовлена перерозподілом вільних зарядів у його об'ємі. Даний вид поляризації зв'язаний з наявністю в діелектрику шарів з різною діелектричною проникністю і провідністю, а також різних провідних і напівпровідних включень. На межі розподілу між шарами в шаруватих матеріалах і в приелектродних шарах може відбуватися нагромадження зарядів повільно рухаючих іонів, що створює ефект міжшарової поляризації. У результаті цього в такому діелектрику при внесенні його в електричне поле утворюються поляризовані області. При міграційній поляризації спостерігається значне розсіювання електричної енергії.

Мимовільна чи спонтанна поляризація спостерігається в сегнетоелектриках. У цих речовинах існують окремі області, що мають електричний момент навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. Орієнтація електричних моментів у доменах різна. При внесенні даного діелектрика в електричне поле відбувається орієнтація електричних моментів у напрямку поля, в результаті чого спостерігається сильна поляризація. На відміну від інших видів поляризації, при деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає насичення і подальше збільшення напруженості не приводить до посилення поляризації. Діелектрична поляризація в сегнетоелектриках нелінійно залежить

від величини напруженості електричного поля. При деякій температурі спостерігається характерний максимум на кривій залежності $\epsilon_r = f(T)$.

✓ Класифікація діелектриків за видами поляризації

Усі діелектрики залежно від впливу напруженості електричного поля на величину відносної діелектричної проникності розділяються на лінійні й нелінійні.

У лінійних діелектриках з малими втратами енергії заряд конденсатора змінюється пропорційно величині прикладеної напруги. Для нелінійних діелектриків ця залежність має вид петлі гістерезиса.

Ємність конденсатора з лінійним діелектриком залежить тільки від його геометричних розмірів і не міняється при зміні прикладеної різниці потенціалів.

У конденсаторі з нелінійним діелектриком ємність буде змінюватися при зміні прикладеної різниці потенціалів, тому що залежність $\epsilon_r = f(E)$ має нелінійний характер. У зв'язку з цим нелінійні діелектрики називають активними, чи керованими діелектриками.

Лінійні діелектрики можна розділити на кілька груп. Неполлярними діелектриками є гази, рідини й тверді речовини в кристалічному й аморфному стані, в яких спостерігається в основному тільки електронна поляризація. Такими діелектриками є водень, парафін, поліетилен та ін.

Полярні діелектрики – це органічні рідкі, напіврідкі й тверді речовини, в яких одночасно існують електронна і дипольно - релаксаційна поляризації. До них відносяться кремнійорганічні з'єднання, феноло - формальдегідні смоли, епоксидні компаунди, капрон та ін.

Іонні з'єднання складають тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною, іонно - релаксаційною та електронно - релаксаційною поляризаціями. З огляду на значне розходження їхніх електричних характеристик дану групу доцільно розбити на дві підгрупи: 1) діелектрики з іонною й електронною поляризаціями; 2) діелектрики з електронною, іонною і релаксаційними поляризаціями.

До першої підгрупи відносяться кристалічні речовини з щільним упакованням іонів, наприклад, слюда, кварц, корунд (Al_2O_3) та ін. До другої підгрупи належать неорганічне скло, багато видів кераміки, кристалічні діелектрики з нещільним упакованням часток у решітках.

✓ Вплив зовнішніх факторів на діелектричну проникність

Одним з таких факторів є частота прикладеної напруги. У неполярних діелектриках поляризація встигає установитися за час значно менший, ніж час напівперіоду прикладеної напруги. У зв'язку з цим у цих діелектриках ϵ_r від частоти практично не залежить.

У полярних діелектриках при підвищенні частоти відносна діелектрична проникність спочатку також залишається незмінною, але починаючи з деякої критичної частоти, коли поляризація вже не встигає установитися за один напівперіод, ϵ_r зменшується (рис 1.3).

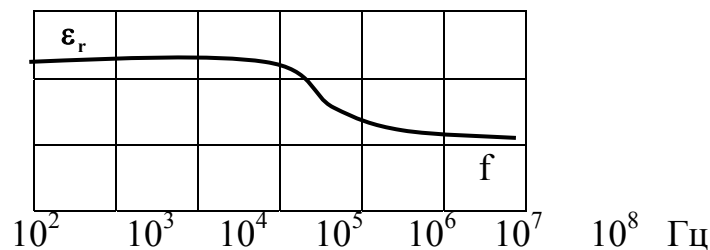


Рис.1.3 – Залежність діелектричної проникності від частоти для полярної рідини

Значний вплив на величину відносної діелектричної проникності в полярних діелектриках оказує температура. При низьких температурах орієнтація дипольних молекул утруднена, тому ϵ_r практично не змінюється. Підвищення температури супроводжується збільшенням ϵ_r , оскільки при цьому полегшується орієнтація дипольних молекул. Однак при подальшому збільшенні температури внаслідок хаотичних теплових коливань молекул ступінь упорядкованості орієнтації молекул знижується, тому ϵ_r , пройшовши через максимум, зменшується (рис 1.4).

У неполярних діелектриках ϵ_r слабо залежить від температури. Незначне зменшення ϵ_r пояснюється тепловим розширенням речовини і відповідно зменшенням кількості молекул, які поляризуються в одиницю об'єму. Різка зміна ϵ_r для парафіну відповідає температурі плавлення даної речовини і стрибко-подібній зміні його щільності (рис.1.5).

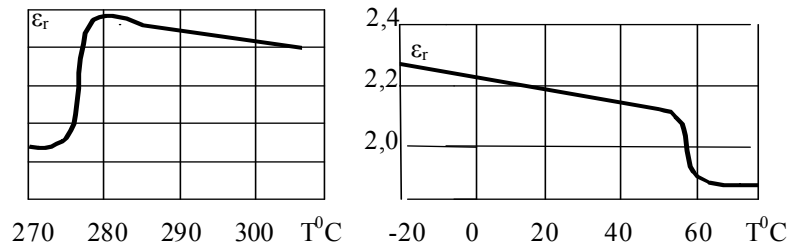


Рис.1.4 - Залежність $\epsilon_r = f(T)$

Рис.1.5- Залежність $\epsilon_r = f(T)$

для нітробензолу

для парафіну.

Діелектрики іонної будови характеризуються, як правило, зростаючою лінійною залежністю $\epsilon_r = f(T)$ (рис 1.6). Однак у деяких іонних кристалах, наприклад, Ti_2 , $CaTi_3$ та ін. ϵ_r при збільшенні температури зменшується.

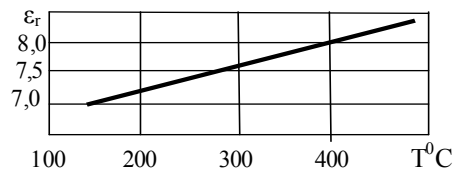


Рис.1.6 – Залежність $\epsilon_r = f(T)$ для безлужного скла

Температурна залежність діелектричної проникності від температури може бути представлена виразом

$$TK_{\epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dT} \quad (1.1.23)$$

Тут TK_{ϵ_r} – температурний коефіцієнт відносної діелектричної проникності. Даний коефіцієнт дозволяє визначити відносну зміну діелектричної проникності при зміні температури на 1°C або 1°K .

Значення TK_{ϵ_r} можна визначити і графічно (рис1.7). Для цього при визначеній температурі в цікавлячій нас точці (наприклад, А) проводять дотичну до кривої і будують на цій дотичній, як на гіпотенузі, прямокутний трикут-

ник довільних розмірів. Відношення його катетів з урахуванням масштабів ϵ_r і T , поділене на значення ϵ_r в точці А дорівнює TK_{ϵ_r} :

$$TK_{\epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta T} \quad (1.1.24)$$

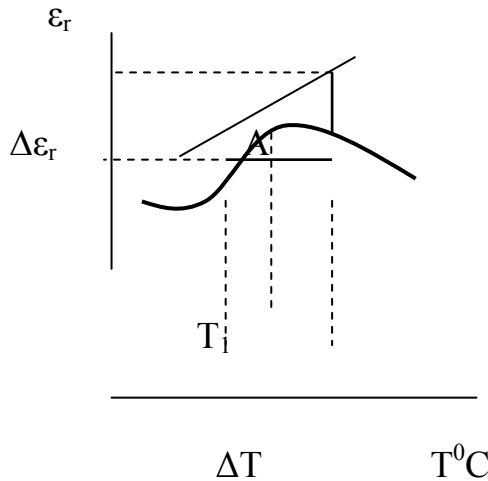


Рис.1.7 – Графічне визначення TK_{ϵ_r} ,

Таким чином, можна визначити TK_{ϵ_r} при будь-якому механізмі поляризації і для залежності $\epsilon_r = f(T)$ будь-якої форми.

Залежність ϵ_r від тиску. При підвищенні гідростатичного тиску значення ϵ_r дещо зростає, тому що при цьому збільшується густина речовини і, отже, кількість молекул, які поляризуються в одиниці об'єму. Для неполярних газів ϵ_r лінійно зростає з підвищенням тиску.

Тиск також впливає на діелектричну проникність рідин і твердих тіл. Так, ϵ_r води при збільшенні тиску монотонно зростає (рис.1.8)

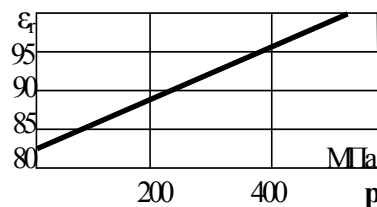


Рис.1.8 – Залежність $\epsilon_r = f(p)$ для води.

У ряді випадків у полярних рідинах в залежності $\epsilon_r = f(p)$ може спостерігатися максимум, наприклад, у гліцерині, касторовій олії і т.д. На рис.1.9

показана залежність $\epsilon_r = f(p)$ для нітробензолу. При підвищенні тиску у даній речовині спостерігається фазовий перехід з рідкого стану в твердий, що приводить до стрибкоподібної зміни ϵ_r .

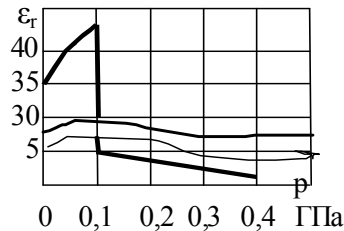


Рис.1.9 – Залежність $\epsilon_r = f(p)$ для нітробензолу.

Крім гідростатичного тиску на ϵ_r впливає і зміна густини речовини при зміні технології його виготовлення. На рис.1.10 показана залежність $\epsilon_r = f(D)$ для політетрафторетілену (фторлон-4).

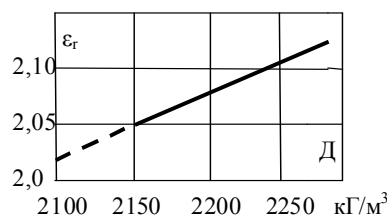


Рис.1.10 – Залежність $\epsilon_r = f(D)$ для політетрафторетілену (фторлон-4).

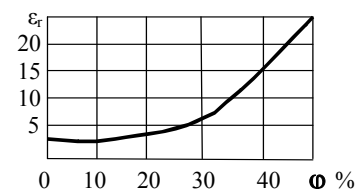
Залежність ϵ_r від тиску можна представити виразом

$$BK_{\epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dp}, \quad (1.1.25)$$

де BK_{ϵ_r} - баричний коефіцієнт відносної діелектричної проникності.

Залежність ϵ_r від вологості. У гігроскопічних діелектриках ϵ_r помітно зростає при збільшенні вологості (рис.1.11). Однак, при цьому погіршуються такі важливі показники діелектриків як питомий опір, електрична міцність, кут діелектричних втрат.

Рис.1.11 - Залежність відносної діелектричної проникності деревини від вологості



Залежність ϵ_r від напруги. Для більшості діелектриків, у яких спостерігається лінійна залежність величини електричного зсуву від прикладеної напруги, відносна діелектрична проникність практично не залежить від напруги. Але в полярних рідинах і газах може спостерігатися так званий "ефект насичення". Він може бути як позитивним, так і негативним. У тому випадку, коли збільшення напруженості електричного поля приводить до зменшення відносної діелектричної проникності, ефект називається негативним і позитивним - при збільшенні ϵ_r .

Помітний вплив на величину ϵ_r робить прикладена напруга у сегнетоелектриках.

Література: [1, с.16 – 30]

Контрольні запитання

1. Перелічіть основні механізми поляризації, вкажіть їхні головні особливості. Наведіть приклади діелектриків з різними механізмами поляризації.
2. Поясніть залежність діелектричної проникності твердих діелектриків від температури і частоти.
3. Наведіть приклади залежності діелектричної проникності рідких діелектриків від зовнішніх факторів.
4. Викладіть метод визначення температурного коефіцієнта діелектричної проникності, наведіть приклади його розрахунку.
5. Поясніть розходження між полярними і неполярними діелектриками.
6. Викладіть методи визначення відносної діелектричної проникності суміші, що містить два чи більше діелектриків, які не вступають один з одним у хімічні сполуки.
7. Наведіть класифікацію діелектриків за видами поляризації.

2. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

За своїм призначенням електроізоляційні матеріали не повинні пропускати електричний струм. Однак поляризаційні процеси зсуву зв'язаних зарядів у речовині обумовлюють появу поляризаційних струмів, чи струмів зсуву в діелектрику. Вони протікають до моменту встановлення рівноважного стану. При електронній і іонній поляризаціях ці струми протікають практично миттєво і приладами, як правило, не фіксуються.

Струми зсуву, обумовлені різними видами релаксаційних поляризацій, називають абсорбційними струмами.

При постійній напрузі абсорбційні струми спостерігаються тільки в період включення і вимикання напруги. Під впливом змінної напруги ці струми протікають весь час до моменту відключення напруги.

З огляду на те, що в технічних діелектриках є вільні заряди, здатні переміщуватися під дією електричного поля крім абсорбційних струмів протікає також струм наскрізної електропровідності. Загальний струм у діелектрику можна представити у вигляді суми наскрізного й абсорбційного струмів. Цей струм називається струмом витoku. Залежність струму витoku через діелектрик від часу показана на рис.2.1.

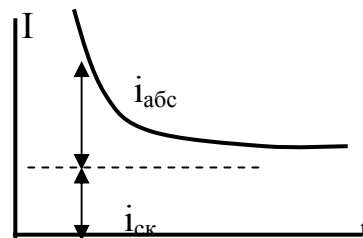


Рис.2.1—Залежність величини струму витoku через діелектрик від часу

Тривала робота твердих і рідких діелектриків може привести як до збільшення, так і до зменшення наскрізного струму. Зменшення наскрізного струму пояснюється тим, що електропровідність була обумовлена носіями зарядів, що містяться в домішках і з часом відбулося електричне очищення зразка. Збільшення струму зв'язано з протіканням у діелектрику необоротних процесів старіння речовини під напругою й участю в електропровідності зарядів, що є структурними елементами самої речовини.

Електропровідність діелектриків пояснюється наявністю в них вільних, тобто не зв'язаних з визначеними молекулами і здатних переміщуватися під дією електричного поля іонів, моліонів, електронів чи дірок.

Для багатьох електроізоляційних матеріалів характерна іонна електропровідність, пов'язана з переносом іонів, тобто з явищем електролізу. У ряді випадків електролізу піддається основна речовина діелектрика. Однак мають місце випадки (в основному для органічних діелектриків), коли молекули основної речовини діелектрика не мають здатності піддаватися дисоціації, але

іонна електропровідність виникає завдяки присутності неминучих забруднень – води, солей, кислот, лугів та ін. Навіть незначний вміст домішок помітно впливає на провідність діелектриків.

У діелектриків з іонним характером електропровідності дотримується закон Фарадея: кількість речовини, що виділилася при електролізі, пропорційна кількості пройшовшої через речовину електрики.

Моліонна електропровідність спостерігається в колоїдних системах, що представляють тісну суміш двох фаз, причому одна фаза (дисперсна) у виді дрібних часток рівномірно зважена в іншій (дисперсному середовищі). З колоїдних систем в електроізоляційній техніці найбільше часто зустрічаються емульсії (обидві фази рідини) і суспензії (дисперсна фаза – тверда речовина, дисперсне середовище – рідина). Стабільність колоїдних систем пов'язана з наявністю на поверхні часток дисперсної фази електричних зарядів. При впливі на колоїдну систему електричного поля частки починають рухатися, що проявляється як явище електрофорезу. При електрофорезі на відміну від електролізу, не спостерігається утворення нових речовин, а тільки змінюється відносна концентрація дисперсної фази в різних частинах об'єму системи.

Моліонна електропровідність спостерігається в рідких лаках і компаундах, у зволжених оліях і т.д.

У деяких діелектриках спостерігається електронна електропровідність. Так, рутил TiO_2 , ряд титанатів BaTiO_3 , CaTiO_3 та ін. виявляють електронний характер електропровідності. У сильних електричних полях можлива інжекція зарядів (електронів, дірок) у діелектрик з металевих електродів, а також утворення іонів і електронів у результаті ударної іонізації.

Провідність діелектрика можна визначити за формулою

$$G_{\text{из}} = (I_{\text{ут}} + I_{\text{абс}}) / U \quad (1.2.1)$$

де $I_{\text{ут}}$ – струм витоку;

$I_{\text{абс}}$ – сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації,

U - прикладена постійна напруга.

Для твердих діелектриків розрізняють об'ємну провідність ізоляції G_v , чисельно визначальну провідність через товщину матеріалу, і поверхневу провідність G_s , що характеризує наявність шару підвищеної електропровідності на поверхні розділу твердої ізоляції з навколишнім газоподібним чи рідким середовищем. Цей шар утворюється внаслідок неминучих забруднень, зволоження і т.д. Відповідно вводяться поняття об'ємного струму витоку I_v і поверхневого струму витоку I_s .

Для порівняльної оцінки об'ємної і поверхневої провідності різних матеріалів користаються значеннями питомого об'ємного опору ρ_v і питомого поверхневого опору ρ_s .

У системі СІ питомий об'ємний опір чисельно дорівнює опору куба з ребром в один метр, вирізаного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба. Розмірність цього опору Ом*м.

Для плоского зразка з постійним поперечним перерізом, вміщеного в однорідне поле, питомий об'ємний опір визначається за формулою

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} \quad (1.2.2)$$

де R_v - об'ємний опір, Ом;

S – площа електрода, м²;

h – товщина зразка, м.

Значення ρ_v для порівняно низькоякісних діелектриків (деревина, папір, асбестоцемент і т.д.) знаходиться в межах 10^6 - 10^8 Ом м. Для таких матеріалів як полістирол, поліетилен і т.д. значення ρ_v складає 10^{14} - 10^{16} Ом м, у неіонізованих газів значення ρ_v ще вище.

Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), думкою виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві його протилежні:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}, \quad (1.2.3)$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу між паралельно розташованими електродами, Ом; d – ширина електрода, м; l – відстань між електродами, м.

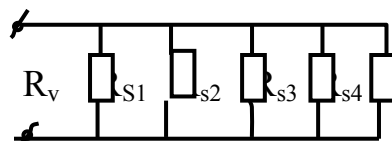
Розмірність питомого поверхневого опору – Ом.

Використовуючи значення питомого об'ємного і поверхневого опорів, можна визначити питому об'ємну провідність $\gamma_v = 1/\rho_v$ і відповідно питому поверхневу провідність $\gamma_s = 1/\rho_s$.

Повна провідність твердого зразка діелектрика дорівнює сумі об'ємної і поверхневої провідностей.

Розглянемо задачу: дві протилежні грані куба з ребром $a = 10\text{мм}$ з діелектричного матеріалу з питомим об'ємним опором $\rho_v = 10^{10}\text{Ом}\cdot\text{м}$ і питомим поверхневим опором $\rho_s = 10^{11}\text{Ом}$ покриті металевими електродами. Визначити струм, який протікає через ці грані при постійній напрузі $U = 2\text{кВ}$.

Наведемо еквівалентну схему заміщення даного діелектрика



Спочатку визначимо об'ємний і поверхневий опори діелектрика

$$R_v = \rho_v a / a^2 = \rho_v a = 10^{12}\text{Ом}$$

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = 10^{11}\text{Ом}$$

Опір ізоляції

$$R_b = R_v R_{s1} / (R_{s1} + 4R_v) = 2,44 * 10^{10}\text{Ом}$$

Струм, що протікає через діелектрик

$$I = U/R_b = 2 * 10^3 / 2,44 * 10^{10} = 8,2 * 10^{-8}\text{А}$$

✓ Електропровідність газоподібних діелектриків

Електропровідність у газах виникає тільки при наявності в них іонів чи вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу відбувається під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнення іонізованих часток самого газу, прискорених електричним полем, з молекулами газу. Зовнішніми факторами

є ультрафіолетові промені, рентгенівське випромінювання, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічне нагрівання газу. Іонізація відбувається внаслідок поглинання нейтральними молекулами фотонів. Енергія фотона визначається за формулою $W = h\nu$, де h – постійна Планка, $\nu = \frac{C}{\lambda}$ – частота випромінювання, $1/c$; C – швидкість світла; λ – довжина хвилі.

Іонізація молекул відбувається при перевищенні енергією кванта випромінювання величини потенціалу іонізації, $U_{\text{и}}$:

$$h\nu > eU_{\text{в}} = U_{\text{и}} \quad (1.2.4)$$

де $U_{\text{в}}$ – потенціал виходу (робота, яку необхідно затратити для видалення за межі атома частки, носія заряду), e – заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл)

З підвищенням частоти здатність молекул газу до іонізації збільшується.

Енергія, яку необхідно затратити на іонізацію молекул газу, вимірюється в електронвольтах (еВ). Енергія в 1 еВ дорівнює кінетичній енергії, що здобуває електрон при вільному русі між двома точками з різницею потенціалів у 1В. Отже, 1еВ дорівнює енергії $eU = 1,6 \cdot 10^{-19}$, Вт с (Дж).

Потенціал іонізації більшості газів знаходиться в межах 10-20 еВ.

Вільні електрони, знаходячись у русі, зіштовхуються з молекулами газу, при цьому частина з них рекомбінує, тобто захоплюється позитивними іонами, а частина, що захоплюється нейтральними молекулами, утворює негативні іони. Час життя вільного електрона складає близько 10^{-6} с. Оскільки процеси іонізації і рекомбінації проходять одночасно, то при визначеній температурі і тиску настає рівновага, при якій забезпечується постійна концентрація іонів. На підставі результатів досліджень встановлено, що в звичайних умовах середня концентрація позитивних іонів у повітрі складає 750 1/см^3 , а негативних – 650 1/см^3 .

Під впливом зовнішніх факторів газ здобуває хоч і дуже малу, але певної величини електропровідність, що називається несамостійною. При збільшенні напруги, що прикладається до газового проміжку, виникає ударна іонізація електронами, які під дією поля здобувають кінетичну енергію, достатню для

іонізації нейтральних молекул при їхньому зіткненні. Одночасно з іонізацією газу відбувається і рекомбінація позитивних і негативних іонів з утворенням нейтральних молекул. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, називається самостійною.

На рис.2.2. приведена вольтамперна характеристика газового проміжку. У випадку утворення електропровідності під дією зовнішніх факторів при незначній напрузі струм дуже малий і баланс процесів утворення іонів і їхньої рекомбінації зберігається. У розглянутому режимі виконується закон Ома

$$J = \gamma E = \gamma U / h \quad (1.2.5)$$

де J – щільність струму;

γ - питома провідність;

U – напруга, що прикладається;

h - відстань між електродами.

На рис 2.2. цей режим відповідає ділянці ОА.

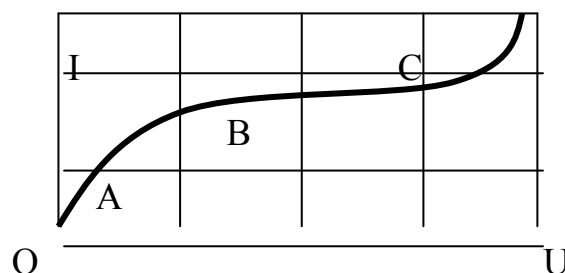


Рис 2.2 – Вольтамперна характеристика газового проміжку.

При подальшому збільшенні напруги баланс процесів утворення іонів і їхньої рекомбінації порушується, тому що іони несуться до електродів, не встигаючи рекомбінувати. Струм росте повільніше напруги (ділянка АВ). Зменшення концентрації іонів продовжується з ростом напруги і при певному його значенні настає насичення (ділянка ВС). Іони, що утворюються під впливом зовнішніх іонізаторів, несуться до електродів. Щільність струму в цьому випадку дорівнює

$$J = N q h, \quad (1.2.6)$$

де N – кількість позитивних і негативних іонів;

q – заряд іона;

h – відстань між електродами.

Подальше збільшення напруги супроводжується посиленням ударної іонізації і збільшенням кількості вільних електронів практично в геометричній прогресії, що приводить до різкого зростання струму.

✓ Електропровідність рідких діелектриків

Електропровідність у рідких діелектриках виникає при пересуванні іонів чи переміщенні відносно великих заряджених колоїдних часток, а також електронів.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність у порівнянні з неполярними, причому зростання діелектричної проникності приводить до зростання провідності.

У неполярних рідинах електропровідність визначається наявністю дисоційованих домішок, особливо вологи. Очищення рідких діелектриків від домішок, що містяться в них, забезпечує зменшення провідності. Однак повністю очистити рідкий діелектрик від домішок, що містяться в ньому, практично не вдається, що утруднює одержання електроізоляційної рідини з малою питомою провідністю.

На величину питомої провідності будь-якої рідини істотно впливає температура. З її підвищенням зростає провідність, тому що зменшується в'язкість рідини, зростає рухливість іонів і може збільшитися ступінь теплової дисоціації.

Відповідно до закону Вальдена, добуток питомої провідності рідкого діелектрика на його в'язкість є величиною постійною і не залежить від температури. Закон Вальдена виконується краще для чистих рідин і гірше при наявності в них домішок. Для неполярних рідин відступ від закону Вальдена більш помітний, ніж для полярних. На рис 2.3 наведена залежність струму від напруженості полю в рідких діелектриках.

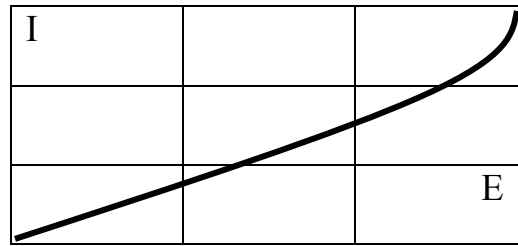


Рис 2.3 – Залежність струму від напруженості поля в рідкому діелектрику. Питома провідність залежно від концентрації іонів може бути представлена рівнянням $\gamma = nq(u_+ + u_-)$, де n – число іонів у см^3 ; q – заряд іона; u_+ і u_- – рухливість, відповідно позитивних і негативних іонів.

При невеликих значеннях напруженості електричного поля рухливість позитивних і негативних іонів незначна, порядку 10^{-4} $\text{см}^2/\text{сВ}$. У цьому випадку, внаслідок малої довжини вільного пробігу електрони не встигають одержати достатню кінетичну енергію для ударної іонізації. Струм підкоряється закону Ома. При напруженостях електричного поля 10 МВ/м і більше закон Ома вже не виконується, що пов'язано з появою електронної провідності внаслідок ударної іонізації і збільшенням числа іонів, що рухаються під дією поля. Питома провідність очищених технічних рідких діелектриків знаходиться в межах 10^{-8} – 10^{-13} 1/Ом м.

У колоїдних системах спостерігається моліонна чи електрофоретична електропровідність, при якій носіями зарядів є групи молекул – моліонів. Швидкість руху таких часток залежить від в'язкості рідини. Відповідно до закону Стокса стала швидкість руху кулі в в'язкому середовищі визначається як

$$V = \frac{F}{6\pi r\eta}, \quad (1.2.7)$$

де F – сила, що діє на кулю;

r – радіус кулі;

η – динамічна в'язкість.

Сила, що діє на електричний заряд і викликає його спрямоване переміщення, дорівнює $F = qE$. Тоді

$$V = \frac{qE}{6\pi r\eta} \quad (1.2.8)$$

Рухливість зарядів визначається як $u = V/E$. Звідси визначимо з наведеного рівняння рухливість носіїв зарядів у рідких діелектриках:

$$u = \frac{q}{6\pi r\eta} \quad (1.2.9)$$

З даного рівняння видно, що рухливість носіїв зарядів у рідких діелектриках істотно залежить від розмірів часток і в'язкості рідини.

У загальному виді питому провідність діелектриків можна представити у виді $\gamma = nqu$. Тоді, з урахуванням вищенаведеного рівняння, питому провідність рідкого діелектрика при моліонній електропровідності визначимо як

$$\gamma = \frac{nq}{6\pi r\eta} \quad (1.2.10)$$

Питома провідність рідких діелектриків сильно залежить від температури, тому що при її підвищенні зменшується в'язкість рідини і збільшується концентрація вільних носіїв зарядів унаслідок теплової дисоціації. Дана залежність має вигляд

$$\gamma = \gamma_0 \exp[a(T - T_0)] \quad (1.2.11)$$

де a – температурний коефіцієнт збільшення питомої провідності.

✓ Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих діелектриків обумовлена пересуванням іонів або наявністю в них вільних електронів.

Вид електропровідності можна встановити експериментально, використовуючи закон Фарадея. Іонна електропровідність супроводжується переносом речовини, тобто явищем електролізу. При електронній електропровідності дане явище не спостерігається.

У діелектриках з атомними чи молекулярними ґратками електропровідність залежить тільки від наявності домішок. Як правило, питома провідність таких матеріалів незначна.

Більшість застосовуваних на практиці твердих діелектриків мають іонну електропровідність. Це синтетичні й органічні полімери, неорганічне скло, керамічні матеріали, кристали і т.д. Пов'язано це з тим, що енергія звільнення іонів у твердих діелектриках не перевищує 5eВ, тоді як для електронів вона більше 5eВ.

Питому провідність у твердих діелектриках можна записати у вигляді

$$\gamma = nqu \quad (1.2.12)$$

де n – число носіїв в одиниці об'єму, м^{-3} ;

q – заряд носія, Кл;

u – рухливість $\text{м}^2/(\text{Вс})$.

При іонній електропровідності число дисоційованих іонів і їхня рухливість знаходяться в експонентній залежності від температури:

$$n_T = n \exp [- W_d / (k)] \quad (1.2.13)$$

$$u_T = u_{\max} \exp [- W_{\text{пер}} / (k)], \quad (1.2.14)$$

де n - загальне число електронів у 1м^3 ;

W_d – енергія дисоціації;

k -теплова енергія;

u_{\max} гранична рухливість іона;

$W_{\text{пер}}$ - енергія переміщення іона.

Підставляючи n_T і u_T у рівняння для питомої провідності (1.2.12) і об'єднавши постійні n , u_{\max} , і q в один коефіцієнт A , одержимо

$$\gamma = A \exp (- b/T) \quad (1.2.15)$$

де $b = (W_d + W_{\text{пер}})/ k$

З цієї формули випливає, що чим більше значення енергії переміщення й енергії дисоціації, тим значніше змінюється питома провідність при зміні температури.

У зв'язку з тим, що звичайно $W_d \gg W_{\text{пер}}$, температурна залежність питомої провідності визначається в основному зміною концентрації носіїв.

При напругах, близьких до значення напруги пробою, у створенні струму поряд з іонами беруть участь і електрони.

У речовинах кристалічної будови з іонними ґратками електропровідність зв'язана з валентністю іонів. Кристали з одновалентними іонами мають більшу провідність, ніж кристали з багатовалентними іонами.

В анізотропних кристалах питома провідність неоднакова по різних осях кристала.

У твердих пористих діелектриках при поглинанні ними вологи питома провідність істотно підвищується, особливо в тих випадках, коли в діелектрику є домішки, легко розчинні у воді. Для зменшення вологовбирання і вологопровідності пористих діелектриків їх піддають просоченню.

Література [1, с.30 – 43.]

Контрольні запитання:

1. Опишіть фізичну сутність процесу електропровідності в діелектриках.
2. Назвіть фактори, що впливають на поверхневу й об'ємну електропровідність.
3. Наведіть визначення питомих об'ємного і поверхневого опорів.
4. Викладіть сутність процесу електропровідності в газах, відзначте його особливості.
5. Опишіть характер електропровідності рідких діелектриків, поясніть її залежність від температури.
6. Перелічіть фактори, що впливають на поверхневу провідність, вкажіть способи її зменшення.
7. Наведіть приклади залежності електропровідності твердих діелектриків від зовнішніх факторів і поясніть їх.

3. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

Діелектричними втратами називають електричну потужність, що розсіюється в діелектрику в одиницю часу при впливі на нього електричного поля і викликає нагрівання діелектрика.

Втрати енергії в діелектрику спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі. При постійній напрузі діелектричні втрати обумовлені електропровідністю. При впливі змінної напруги в діелектриках, крім наскрізної електропровідності можуть проявлятися й інші механізми перетворення електричної енергії в теплову.

Для оцінки здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі використовують кут діелектричних втрат чи тангенс цього кута.

Кутом діелектричних втрат називається кут, що доповнює до 90° кут фазового зсуву між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі.

Чим більше потужність, що розсіюється, тим менше кут фазового зсуву і тим більше кут діелектричних втрат δ . У разі ідеального діелектрика вектор струму випереджає вектор напруги на 90° , тому кут діелектричних втрат буде дорівнювати нулю.

При постійній напрузі діелектричні втрати обумовлені практично тільки струмом наскрізної провідності, тому що втрати на однократну поляризацію незначні, а втрати, що виникають у результаті протікання поверхневого струму, розсіюються в навколишньому середовищі. Таким чином, діелектричні втрати, що розсіюються в об'ємі діелектрика і викликані струмом об'ємної наскрізної провідності при постійній напрузі, можна визначити за формулою

$$P_a = UI_{скв} = U^2 \gamma_v \frac{S}{h} \quad (1.3.1)$$

Для вивчення поведінки діелектрика з діелектричними втратами при змінній напрузі, доцільно подати його у вигляді еквівалентних схем, що вміщують ємність і активний опір, які включені між собою послідовно чи паралельно. Дані схеми представлені на рис.3.1.

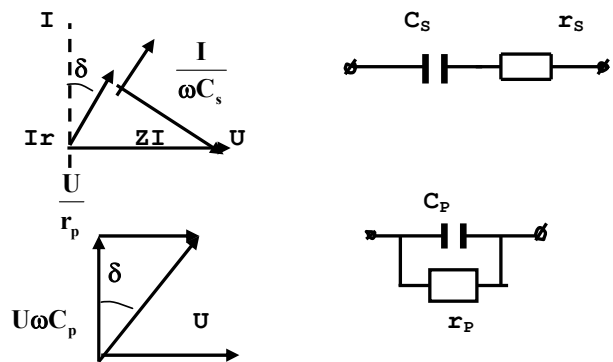


Рис.3.1. Векторні діаграми й еквівалентні схеми заміщення діелектрика

Ці схеми еквівалентні одна одній, якщо при рівності повних опорів $Z_1 = Z_2 = Z$ рівні, відповідно, їх активні й реактивні складові. Ця умова виконується, коли кути зсуву струму щодо напруги рівні і значення активної потужності однакові.

Для послідовної схеми запишемо

$$P_a = UI \cos \varphi = \frac{U^2 r_s}{x^2 + r_s^2} = \frac{U^2 r_s}{x^2 (1 + r_s^2)} = \frac{U^2 \omega C_t g \delta}{1 + tg^2 \delta} \quad (1.3.2)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_s r_s \quad (1.3.3)$$

Для паралельної схеми

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta \quad (1.3.4)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_p r_p} \quad (1.3.5)$$

Співвідношення між C_p і C_s , а також між r_p і r_s можна визначити, прирівнюючи один до одного співвідношення (1.3.2), (1.3.4) і (1.3.3), (1.3.5):

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2\delta}, \quad r_p = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right) \quad (1.3.6)$$

Для високоякісних діелектриків значенням $\operatorname{tg}^2\delta$ можна зневажити і вважати $C_p \approx C_s \approx C$. Потужність, що розсіюється в діелектрику, у цьому випадку буде однаковою для обох схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta \quad (1.3.7)$$

Якщо потрібно визначити розподіл діелектричних втрат у різних місцях діелектрика, то для розрахунку питомих діелектричних втрат у точці, де напруженість електричного поля дорівнює E , використовують формулу

$$p = \frac{P}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta}{Sh} = \frac{U^2 \omega \epsilon \epsilon_0 S \operatorname{tg}\delta}{Sh} = E^2 \omega \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg}\delta \quad (1.3.8)$$

Добуток $\epsilon \operatorname{tg}\delta$ називається коефіцієнтом діелектричних втрат. З наведеної формули можна зробити висновок, що при заданій частоті і напруженості електричного поля, діелектричні втрати пропорційні коефіцієнту діелектричних втрат.

Використання електроізоляційного матеріалу, що володіє великими діелектричними втратами, приводить до нагрівання виготовленого з нього виробу і передчасного його теплового старіння.

✓ Види діелектричних втрат

За фізичною природою діелектричні втрати розділяють на види:

- втрати, обумовлені поляризацією
- втрати на електропровідність

- іонізаційні втрати
- втрати, обумовлені неоднорідністю структури.

Втрати, обумовлені поляризацією, характерні для діелектриків, що володіють уповільненими видами поляризації. До таких діелектриків, зокрема, відносяться діелектрики з дипольною структурою і діелектрики з іонною структурою з нещільним упакуванням іонів.

Релаксаційні діелектричні втрати викликані порушенням теплового руху часток під впливом сил електричного поля. Це приводить до розсіювання енергії і нагрівання діелектрика.

При підвищенні частоти дані втрати зростають. Особливо вони значні на високих і надвисоких частотах.

У полярних діелектриків має місце характерний дипольний максимум у кривій залежності $tg\delta$ від температури (рис.3.2). При

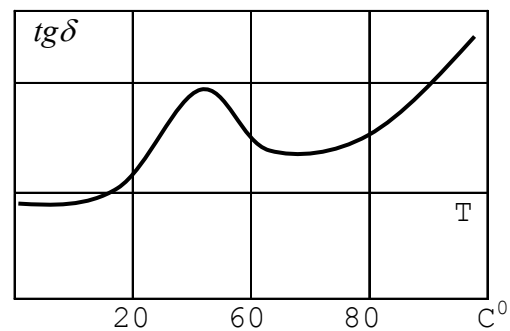


Рис.3.2 – Залежність $tg\delta = f(T)$ для полярних діелектриків

підвищенні частоти цей максимум зрушується в область більш високих температур.

У полярних діелектриках існують також **втрати від наскрізної електропровідності**, тому після переходу через дипольний максимум спостерігається ріст $tg\delta$ у зв'язку зі зростанням питомої провідності. При наявності декількох фізичних механізмів релаксаційних втрат у залежності $tg\delta = f(T)$ з'являються додаткові максимуми.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Особливо вони значні при температурах нижче точки Кюрі. При температурах вище точки Кюрі ці втрати зменшуються.

До діелектричних **втрат, викликаних поляризацією**, відносяться також **резонансні втрати**, що спостерігаються в діелектриках при високих частотах.

Дані втрати можуть виникати в газах при деяких частотах і у твердих діелектриках, коли частота змушених коливань, викликаних електричним полем, збігається з частотою власних коливань часток твердої речовини.

Діелектричні **втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю**, спостерігаються в діелектриках, що володіють значною об'ємною чи поверхневою провідністю. Тангенс кута діелектричних втрат у цьому разі визначається за формулою

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon_r f \rho} \quad (1.3.9)$$

При підвищенні температури діелектричні втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю, збільшуються за експонентним законом

$$P_{at} = P_{ao} \exp(\alpha T) \quad (1.3.10)$$

де P_{aT} - втрати при температурі T °С;

P_{ao} - втрати при температурі 0 °С;

α - постійна матеріалу.

Значення $\operatorname{tg}\delta$ при зміні температури змінюється за тим же законом, тому що значення реактивної потужності ($U^2 \omega C$) від температури практично не залежить.

Іонізаційні діелектричні втрати характерні для діелектриків у газоподібному стані. Ці втрати мають місце, як правило, в неоднорідних електричних полях, коли величина прикладеної напруги перевищує значення напруги іонізації. Визначити їх можна за формулою

$$P_{ai} = Af(U - U_u)^3 \quad (1.3.11)$$

де A – постійний коефіцієнт;

f – частота поля;

U – прикладена напруга;

U_u – напруга, що відповідає початку іонізації.

Приведена формула справедлива при лінійній залежності $\operatorname{tg}\delta$ від напруженості поля.

Діелектричні **втрати, обумовлені неоднорідністю структури**, виникають у пластмасах з наповненням, в пористій кераміці, в шаруватих діелектриках і т.д. Як правило, у такі діелектрики спеціально вводять в процесі виготовлення окремі компоненти для надання їм заданих властивостей. Крім того, через порушення технології виготовлення чи в процесі експлуатації, в діелектрику можуть утворюватися різні домішки, що змінюють його характеристики. Це приводить до того, що діелектрик стає неоднорідним за своєю структурою і в ньому виникають діелектричні втрати. Загальної формули для розрахунку цих втрат у зв'язку з розмаїтістю структур даних діелектриків не існує.

✓ Діелектричні втрати в газах

Коли напруженість електричного поля не перевищує значень, що відповідають появі ударної іонізації, діелектричні втрати в газах незначні й обумовлені тільки електропровідністю. Орієнтація дипольних молекул не супроводжується помітними втратами внаслідок малої в'язкості газів. Газ в цих умовах можна розглядати як ідеальний діелектрик. ($\rho_v \approx 10^{15}$; $\epsilon \approx 1$; $\text{tg}\delta \approx 4 \cdot 10^{-7}$ при $f=50$ Гц). Значення $\text{tg}\delta$ можна визначити за формулою (1.3.9).

Коли напруженість електричного поля значна, молекули газу іонізуються, у результаті чого виникають втрати на іонізацію. На лініях електропередачі внаслідок ударної іонізації повітря поблизу проводів виникає явище корони, що супроводжується значним збільшенням діелектричних втрат.

Зміна $\text{tg}\delta$ у твердих діелектриках, що містять газові включення, при збільшенні напруги показана на рис.3.3. Наведену залежність $\text{tg}\delta = f(U)$ називають **кривою іонізації**. За зростанням $\text{tg}\delta$ при збільшенні напруги можна судити про наявність газових включень у твердій ізоляції.

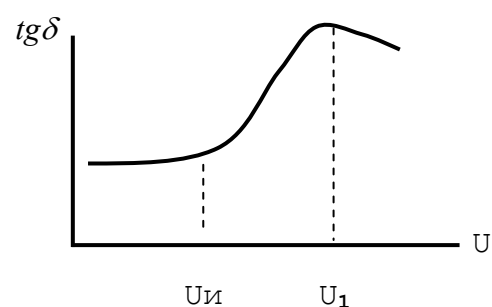


Рис. 3.3 - Залежність $\text{tg}\delta = f(U)$ для твердого діелектрика, який має газові включення

Коли газ вже іонізований ($U > U_1$), потрібна менша енергія на розвиток процесу і $\text{tg}\delta$ зменшується.

При високих частотах іонізаційні втрати можуть призвести до розігріву і руйнування діелектрика. Іонізація повітря, що заповнює пори у твердих діелектриках, супроводжується утворенням озону й окислів азоту, що призводить до хімічного руйнування речовини.

✓ Діелектричні втрати в рідких діелектриках

Діелектричні втрати в рідких діелектриках обумовлені електропровідністю і явищем поляризації. Носіями зарядів у технічних рідких діелектриках можуть бути іони, що утворюються внаслідок дисоціації молекул даної рідини, а також більш великі колоїдні частки, що можуть впорядковано рухатися в електричному полі.

Питома провідність неполярних чистих рідин незначна, у зв'язку з чим малі й діелектричні втрати.

Полярні рідини, крім втрат, обумовлених електропровідністю, можуть мати значні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією. Ці втрати при змінній напрузі значно перевершують утрати, викликані електропровідністю. На величину втрат, обумовлених дипольно-релаксаційною поляризацією, помітний вплив здійснює в'язкість рідини. При великій в'язкості молекули не встигають слідкувати за зміною поля, і діелектричні втрати при цьому незначні. Якщо в'язкість рідини мала, то орієнтація молекул відбувається практично без тертя і діелектричні втрати також незначні. При середній в'язкості діелектричні втрати збільшуються і при деякому значенні в'язкості мають максимум. На рис.3.4. подано залежність $\text{tg}\delta$ від температури.

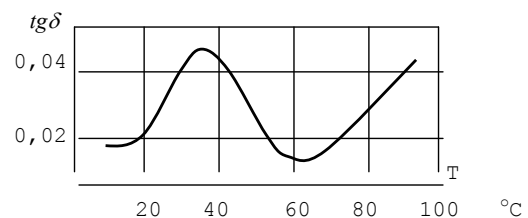


Рис. 3.4. Залежність $\text{tg}\delta = f(T)$ для полярної рідини

При дальшому збільшенні температури зростає електропровідність і відповідно ростуть втрати. Збільшення частоти зміщує представлену залежність в область більш високих температур.

Характер залежності потужності, що розсіюється, при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику від частоти представлений на рис.3.5.

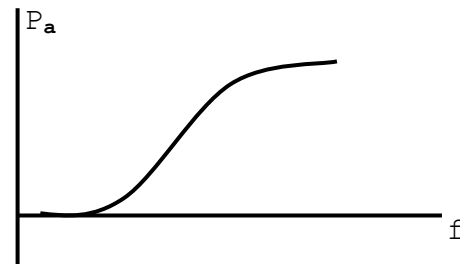


Рис.3.5-Залежність потужності, що розсіюється в діелектрику від частоти

Втрати змінюються доти, поки поляризація встигає орієнтуватися за зміною поля. Коли дипольні молекули вже не встигають орієнтуватися в напрямку поля, потужність, що розсіюється, залишається практично незмінною.

✓ Діелектричні втрати у твердих діелектриках

У зв'язку з тим, що тверді речовини мають різноманітний склад і будову, у них можливі всі види діелектричних втрат.

Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури залежать від виду молекул. Діелектрики з неполярними молекулами і які не мають домішок, мають мізерно малі діелектричні втрати. До таких діелектриків відносяться поліетилен, полістирол, політетрафторетилен (фторопласт – 4), церезин та ін. Вказані діелектрики в зв'язку з малими втратами доцільно використовувати при високих частотах.

Діелектрики з полярними молекулами, для яких характерна дипольно-релаксаційна поляризація, мають великі втрати, що істотно залежать від температури. До них відносяться: поліметилметакрилат (органічне скло), папір,

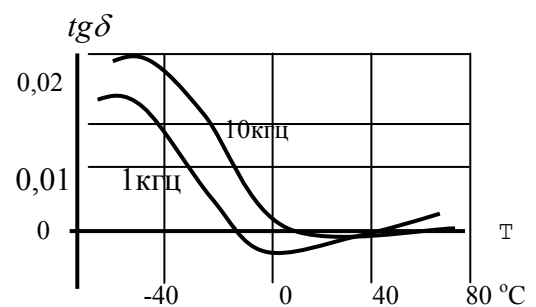


Рис.3.6 - Залежність $tg\delta = f(T)$ для паперу

картон, поліаміди (капрон та ін.), поліуретан, бакеліт, каучукові матеріали й ін. Крива залежності $\text{tg}\delta$ від температури для паперу показана на рис.3.6.

Зростання $\text{tg}\delta$ після переходу через мінімум пов'язано зі збільшенням втрат від електропровідності.

Діелектричні втрати у твердих речовинах з іонною структурою залежать від особливостей розташування іонів у ґратках. У речовинах з кристалічною структурою з щільним упакуванням іонів діелектричні втрати при відсутності домішок незначні. Наявність домішок, які приводять до зміни кристалічних ґраток, призводить до різкого збільшення діелектричних втрат. При високих температурах у цих діелектриках з'являються втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю. Ці речовини знайшли широке застосування при виробництві електротехнічної кераміки, наприклад, корунду (Al_2O_3).

Для кристалічних діелектриків з нещільним упакуванням іонів характерна релаксаційна поляризація, що викликає збільшення діелектричних втрат. При підвищенні температури число іонів, які беруть участь у релаксаційній поляризації, постійно зростає, внаслідок чого в залежності $\text{tg}\delta = f(T)$ відсутній максимум. Застосовуються ці матеріали в основному при виробництві ізоляторного фарфору, вогнестійкої кераміки. Прикладом таких речовин служать циркон (компонент вогнестійкої кераміки), муліт (компонент ізоляторного фарфору), γ - глинозем та ін.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах з іонною структурою мають характерні риси. Прикладом їх є неорганічні стекла. Внаслідок локальних неоднорідностей структури скла релаксаційні втрати характеризуються широким набором часу релаксації. Це приводить до розширення і деякого згладжування максимумів у температурній і частотній залежності тангенса кута діелектричних утрат. На величину діелектричних втрат у даних речовинах істотно впливають будь-які порушення структури (відпал, загартування, введення добавок і т.д.). Крім втрат, обумовлених поляризацією, у стеклах можуть виникати втрати, пов'язані з електропровідністю, що викликається пе-

ресуванням слабкозв'язаних іонів. Виявляються вони, як правило, при температурах 50-100 °С.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках вище, ніж у звичайних діелектриках. Вони мало змінюються при зміні температури в області мимовільної поляризації і різко зменшуються при температурі вище точки Кюрі, коли мимовільна поляризація зникає.

До твердих речовин неоднорідної структури належать матеріали, до складу яких входить не менше двох компонентів. Характерним представником таких діелектриків є кераміка. У складі кераміки розрізняють кристалічну, склоподібну і газову фази. Кількісне співвідношення між кристалічною і склоподібною фазами фактично і визначає діелектричні втрати в кераміці. Наявність газової фази призводить до збільшення діелектричних втрат у кераміці, коли при високих напруженостях поля виникає іонізація.

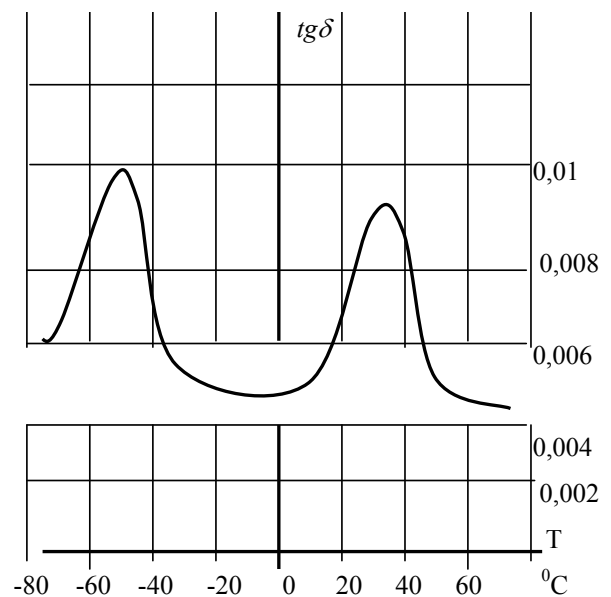


Рис.3.7 – Залежність $tg\delta$ від температури для папера, просоченого маслосолотаніфольним компаундом

Діелектричні втрати в просоченому папері залежать від електричних властивостей її компонентів (волокон целюлози і складу, що просочує), а також від наявності повітряних включень. Залежність $tg\delta$ від температури для паперу, просоченого маслосолотаніфольним компаундом, наведена на рис.3.7.

Перший максимум при негативних температурах пов'язаний з дипольно-релаксаційними втратами в целюлозі, а другий – з дипольно-релаксаційними втратами в компаунді, що просочує.

До неоднорідних діелектриків відносяться також широко застосовувані в електроізоляційній техніці різні пластмаси з наповнювачами, слюдяні вироби (міканіти, мікалекси), каучукові вироби з наповнювачами і т.д.

Розглянемо зміну $\operatorname{tg}\delta$ активних втрат у діелектрику від зовнішніх факторів на конкретному прикладі.

Задача. При кімнатній температурі тангенс кута діелектричних втрат ультрафарфору $\operatorname{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4}$, при зростанні температури до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ він збільшується в два рази. Чому дорівнює $\operatorname{tg}\delta$ цього матеріалу при температурі $200\text{ }^{\circ}\text{C}$? У скільки разів збільшиться активна потужність, що виділяється у високочастотному прохідному ізоляторі з цього матеріалу, при зміні температури від 20 до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$? Зміною діелектричної проникності кераміки можна знехтувати. Втрати в ультрафарфорі обумовлені наскрізною електропровідністю, тому тангенс кута діелектричних втрат збільшується з температурою за експонентним законом

$$\operatorname{tg}\delta_T = \operatorname{tg}\delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]$$

де $\operatorname{tg}\delta_0$ – значення при $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

α - температурний коефіцієнт $\operatorname{tg}\delta$, що може бути знайдений з виразу

$$\alpha = \frac{\ln \operatorname{tg}\delta_{100} - \ln \operatorname{tg}\delta_0}{100 - 20} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Тоді $\operatorname{tg}\delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$.

У зв'язку з тим, що активна потужність в ізоляторі P_a росте з температурою пропорційно $\operatorname{tg}\delta$, запишемо

$$\frac{P_{a200}}{P_{a0}} = \frac{\operatorname{tg}\delta_{200}}{\operatorname{tg}\delta_0} = \frac{2,38 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,76.$$

Література: [1 с.43 –57.]

Контрольні запитання:

1. Опишіть процеси, що обумовлюють діелектричні втрати в діелектриках.
2. Перелічіть параметри, що характеризують діелектричні втрати в матеріалах.
3. Наведіть схеми заміщення діелектрика з втратами, вкажіть умови їхньої еквівалентності. Побудуйте векторні діаграми для кожної схеми.
4. Опишіть види діелектричних втрат, дайте їм коротку характеристику.
5. Вкажіть фактори, що впливають на величину діелектричних втрат.
6. Дайте характеристику діелектричних втрат у газах.
7. Дайте характеристику діелектричних втрат у рідких діелектриках.
8. Дайте характеристику діелектричних втрат у твердих діелектриках.

4. ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

При перевищенні прикладеної до діелектрика напруги вище деякого критичного значення ізоляційні властивості порушуються і відбувається утворення провідного каналу. При цьому струм витoku через діелектрик різко зростає, а опір відповідно зменшується. Явище утворення в діелектрику провідного каналу під дією електричного поля називається пробоем. Залежність струму від прикладеної напруги показана на рис.4.1.

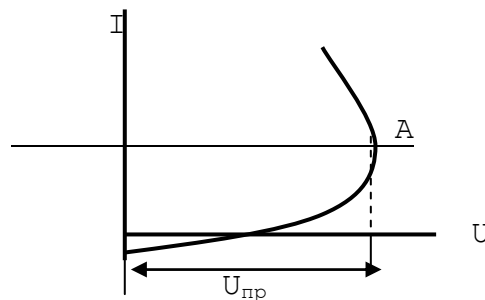


Рис. 4.1 – Вольт-амперна характеристика електричної ізоляції

Точка А, для якої $dI/dU = \infty$, відповідає пробію. Значення напруги, при якому відбувається пробій, називається **пробивною напругою** $U_{пр}$, а відповідне значення напруженості електричного поля – **електричною міцністю** $E_{пр}$. Для найпростішого випадку однорідного електричного поля в діелектрику

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}$$

де h – товщина діелектрика. У більшості випадків при збільшенні h значення $E_{пр}$ зменшується нелінійно.

Електрична міцність високоякісних твердих діелектриків, як правило, вище рідких і тим більше газоподібних діелектриків. Однак газоподібні й рідкі діелектрики, на відміну від твердих, після пробію можуть через деякий проміжок часу відновити свої властивості при відсутності напруги.

Для надійної роботи будь-якого електротехнічного пристрою робоча напруга його ізоляції повинна бути значно менше пробивної напруги.

Фізична сутність розвитку пробію різна.

Розрізняють наступні **види пробію**:

- чисто електричний,
- електротепловий,
- електромеханічний,
- електрохімічний,
- іонізаційний.

Чисто електричний пробій являє собою безпосереднє руйнування структури діелектрика силами електричного поля, що впливають на електрично заряджені частки в діелектрику. Цей вид пробою розвивається практично миттєво. Якщо одразу після додавання напруги не відбувся електричний пробій, то теоретично цю напругу діелектрик повинен витримувати тривалий час. Це положення не відноситься до пробою діелектрика короткочасними імпульсами.

Електротепловий пробій пов'язаний з нагріванням діелектрика в електричному полі в результаті діелектричних втрат. Процес нагрівання діелектрика протікає, постійно підсилюючись. Це приводить до істотної зміни структури діелектрика (розплавлення, обвуглювання, розтріскування) і зменшенню його електричної міцності. При цьому достатньо, щоб розігрілося яке-небудь місце діелектрика, в якому тепловіддача гірше або підвищені питомі втрати, а середня температура всього діелектрика може практично не відрізнитися від первісної. При гарному тепловідводі може наступити рівновага між теплом, що виділяється в діелектрику, і його відводом у навколишнє середовище. У цьому разі діелектрик може тривалий час працювати під напругою. Якщо відведення тепла утруднене, то навіть незначна напруга, прикладена до діелектрика, через якийсь час може викликати пробій. При електротепловому пробіі $U_{пр}$ залежить як від частоти прикладеної напруги, так і від температури навколишнього середовища, зменшуючись при їхньому збільшенні.

Електромеханічний пробій виникає в результаті механічного руйнування діелектрика (утворення макроскопічних тріщин) силами електричного поля. У

ряді випадків механічні руйнування в діелектриках виникають у результаті тиску електродів.

Електрохімічний пробій – це вид пробою, який повільно розвивається і пов'язаний з хімічною зміною матеріалу в електричному полі. Цей вид пробою спостерігається як при постійній, так і при змінній напрузі внаслідок розвитку в матеріалах електролітичних процесів.

Іонізаційний пробій пояснюється дією на діелектрик хімічно агресивних речовин, що утворюються в газових порах діелектрика при часткових розрядах, а також ерозією діелектрика на межі пор іонами газу.

✓ Пробій газів

Повітря є найпоширенішим ізоляційним середовищем, що використовується в різних електротехнічних системах. Пробій повітря та інших газів слід розглядати як наслідок розвитку процесів ударної іонізації і фотоіонізації.

При впливі поля позитивні й негативні іони й електрони, що містяться в газі та знаходяться в безладному тепловому русі, починають переміщуватися в напрямку поля. При цьому вони одержують додаткову енергію

$$W = qU_{\lambda}$$

де q – заряд,

U_{λ} – різниця потенціалів на довжині вільного пробігу.

При однорідному полі можна вважати, що

$$U_{\lambda} = El$$

де E – напруженість поля, l – довжина вільного пробігу зарядженої частки.

Тоді

$$W = qEl \quad (1.1)$$

Ця енергія віддається атомам чи молекулам газу в момент зіткнення. Якщо ця енергія досить велика, то при зіткненні відбувається збудження атомів або молекул і навіть іонізація молекул.

Енергію іонізації звичайно характеризують іонізаційним потенціалом $U_{и} = W_{и} / q$. Іонізаційний потенціал різних газів знаходиться в межах від 4 до 25В, що відповідає енергії іонізації від 4 до 25eВ.(табл.4.1)

Таблиця 4.1. Іонізаційний потенціал деяких газів

Газ	H ₂	N ₂	O ₂	Cl ₂	Xe	Kr	Ar	He
Потенціал іонізації, В	15,4	15,6	12,1	11,5	12,1	14	15,8	24,6

Швидкість і відповідно енергія електронів, яку вони здобувають при русі в електричному полі, визначаються в основному характером їхніх зіткнень з молекулами й атомами даного газу. Якщо електрони в газі при зіткненні з молекулами чи атомами випробують відносно велике число непружних зіткнень, що характерно для складних молекул газу, то для досягнення ними енергії, необхідної для іонізації, потрібна велика напруженість електричного поля. Електрична міцність такого газу буде високою. Тому часто газу з малим іонізаційним потенціалом відповідає велика електрична міцність і навпаки. Так, одноатомні гази Ne, He, хоча і мають високий іонізаційний потенціал, але мають низьку електричну міцність. Зіткнення позитивних і негативних іонів з частками газу навіть при енергіях порядку тисячі електрон-вольт не приводить до іонізації газу. Пояснюється це тим, що:

- ✓ електрони мають у 100-1000 разів більшу рухливість, ніж іони;
- ✓ електрони мають на порядок більшу довжину вільного пробігу, ніж іони;
- ✓ енергія, передана іоном периферичному електрону нейтральної частки мала, тому умови для відщеплення електрона несприятливі.

У той же час, позитивні іони можуть вивільняти електрони з металу, бомбардуючи поверхню катода.

У ряді випадків електрон, розігнаний електричним полем, не іонізує молекулу, а переводить її в збуджений стан. При переході в урівноважений стан ця молекула віддає свою надлишкову енергію у вигляді випромінювання – випускає фотон. Якщо цей фотон буде поглинутий якою-небудь молекулою, то це може привести до її іонізації. Швидкість руху фотона більша, ніж швидкість руху електронної лавини. Вона складає $3 \cdot 10^8$ м/с. Фотони обганяють

електронну лавину й іонізують частки газу попереду основної лавини. Звільнені при цьому електрони породжують нові лавини далеко перед першою. У наступних стадіях окремі лавини, наганяючи одна одну, утворюють суцільний канал іонізованого газу з підвищеною провідністю, який називається стрімером.

Одночасно з ростом стрімера, спрямованого від катода до анода, починається утворення зустрічного лавинного потоку позитивно заряджених часток, спрямованого до катода. Утворюється розрядний канал у вигляді плазми з надлишковим позитивним зарядом.

Під впливом ударів позитивних іонів на катоді утворюється катодна пляма, що випромінює електрони.

У результаті зазначених процесів і виникає пробій газу. Чим більше прикладена напруга до газового проміжку, тим швидше відбувається пробій.

Якщо напруга подається у вигляді імпульсу, то чим менше тривалість імпульсу, тим більше пробивна напруга. Ця зміна пробивної напруги характеризується коефіцієнтом імпульсу

$$\beta = \frac{U_{примп}}{U_{пр}}$$

де $U_{примп}$ - напруга пробою при імпульсній напрузі,

$U_{пр}$ - напруга пробою при постійній напрузі чи змінній напрузі з частотою 50 Гц.

Регламентуються дві форми випробувальних імпульсів:

- ✓ грозовий імпульс з тривалістю переднього фронту 1,2 мкс і тривалістю імпульсу 50 мкс;
- ✓ комутаційний імпульс з тривалістю переднього фронту імпульсу 250 мкс і тривалістю імпульсу 2500 мкс.

Грозовий імпульс умовно позначають символом 1,2/50, а комутаційний – 250/2500.

Для газових проміжків з однорідним чи слабо неоднорідним полями коефіцієнт імпульсу для стандартних імпульсів практично дорівнює одиниці. У випадку сильно неоднорідного поля в газовому проміжку коефіцієнт імпульсу залежить від полярності імпульсу, ступеня неоднорідності, довжини проміжку і для грозового імпульсу може істотно перевищувати одиницю.

✓ Пробій газу в однорідному полі

Однорідне електричне поле може бути отримане між плоскими електродами із закругленими краями, а також між сферами, якщо відстань між ними не перевищує їхнього діаметра. Час розвитку пробою в однорідному полі складає $10^{-7} - 10^{-8}$ с, причому величина напруги пробою залежить від температури і тиску наповнюючого газу. При нормальному тиску (0,1 Мпа) і температурі 20°C електрична міцність повітря при відстані між електродами в 1 см складає близько 3,2 МВ/м. Зі зменшенням відстані між електродами електрична міцність збільшується, що пояснюється труднощами формування розряду.

Відповідно до закону Пашена в однорідному електричному полі при незмінній температурі напруга пробою є функцією тиску наповнюючого газу і відстані між електродами $U_{\text{пр}} = f(p, h)$. Дана залежність наведена на рис.4.2. Мінімальне значення пробивних напруг для різних газів складає 280-420 В. Для повітря - біля 300В. При підвищенні тиску понад 100кПа відстань між молекулами зменшується, у результаті чого зменшується довжина вільного пробігу електронів і відповідно збільшується електрична міцність. Спадання напруги спостерігається при зменшенні тиску нижче атмосферного до певної величини.

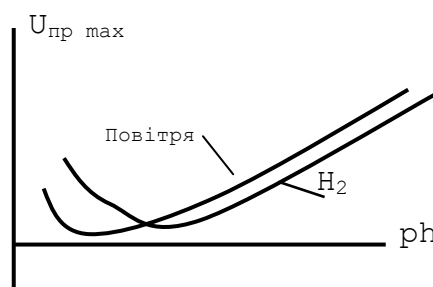


Рис.4.2 – Залежність $U_{\text{пр max}} = f(p, h)$ для повітря і водню

Подальше зменшення тиску приводить до зростання електричної міцності, що пояснюється зменшенням числа молекул в одиниця об'єму газу і зниженням імовірності зіткнень електронів з молекулами. При високому вакуумі електрична міцність досягає великих значень (порядку 10^2 МВ/м). У цьому разі на величину електричної міцності впливає матеріал і стан поверхні електродів, тому що можливе виникнення "холодної" емісії електронів з поверхні електродів.

Електрична міцність залежить від хімічного складу газу. Меншою електричною міцністю в порівнянні з повітрям володіють інертні гази, що використовуються для заповнення джерел світла і електровакуумних приладів. Високою електричною міцністю відрізняються деякі важкі гази з високою молекулярною масою. Прикладом може служити елегаз (SF_6), фреон (CCl_2F_2). Їхня електрична міцність практично в 2,5 раза вище, ніж у повітря.

✓ Пробій газів у неоднорідному електричному полі

Неоднорідне електричне поле виникає між електродами: голкою і площиною, двома голками, двома сферами, при відстані між ними, що перевищує радіус сфер, проводами і т.д. Пробій газу в неоднорідному електричному полі підкоряється вже іншим закономірностям. Особливістю даного пробою є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість електричного поля досягає критичних значень, з наступним переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги. При цьому в газах спостерігається ефект полярності, який полягає в тому, що величина напруги пробою залежить від полярності підведеної напруги. При рівних умовах для несиметричних електродів голка-площина пробивна напруга при позитивній полярності голки значно нижче, ніж при негативній. Цей ефект викликаний тим, що в неоднорідному

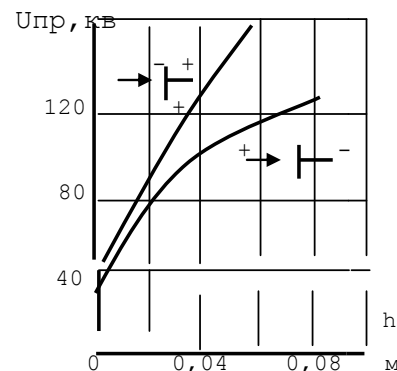


Рис. 4.3 - Залежність $U_{пр}=f(h)$ для неоднорідного електричного поля

ефект полярності, який полягає в тому, що величина напруги пробою залежить від полярності підведеної напруги. При рівних умовах для несиметричних електродів голка-площина пробивна напруга при позитивній полярності голки значно нижче, ніж при негативній. Цей ефект викликаний тим, що в неоднорідному

рідному електричному полі в місці найбільшої неоднорідності, тобто поблизу голки виникають позитивні об'ємні заряди. Ці заряди створюють електричне поле, напруженість якого при позитивній полярності голки спрямована згідно з напруженістю зовнішнього електричного поля. Унаслідок цього результуюча напруженість електричного поля збільшується і пробій настає при меншій напрузі. При негативній полярності голки поле просторового позитивного заряду частково компенсує зовнішнє електричне поле, тому пробивна напруга більше.

4.2. Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики мають більш високу електричну міцність ніж гази, що обумовлено значно меншою довжиною вільного пробігу електронів. Теорію електричного пробою, розглянуту для газів, можна застосувати і для рідких діелектриків за умови, що вони будуть максимально очищені від домішок.

Електрична міцність технічних рідких діелектриків істотно залежить від наявності забруднень, зменшуючись у міру збільшення полярності рідини і, відповідно, зростання її дисоціюючої здатності. Різке зниження електричної міцності спостерігається при влученні в рідкий діелектрик навіть невеликої кількості води. У трансформаторній олії вода звичайно знаходиться у вигляді емульсії, тобто у вигляді дрібних зважених часток. Під впливом електричного поля частки води поляризуються і утворюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких і відбувається пробій.

Досвід експлуатації рідких діелектриків свідчить, що електрична міцність істотно знижується при наявності в них волокнистих домішок. Це пов'язано з високою гігроскопічністю волокон, зволоження яких підвищує їхню діелектричну проникність. Під впливом електричного поля волокна прагнуть вишикуватися уздовж силових ліній поля, що полегшує умови пробою.

На пробій рідких діелектриків впливає форма электродів: зі збільшенням ступеня неоднорідності електричного поля пробивна напруга рідкого діелектрика зменшується.

Зміна електричної міцності спостерігається в міру збільшення числа пробоїв у тому самому об'ємі рідини, що пов'язано із забрудненням діелектрика продуктами розкладання в місці пробою.

При збільшенні температури електрична міцність чистих рідких діелектриків практично не змінюється доти, поки не починається кипіння легких масляних фракцій і утворення при цьому пухирців пару, що приводить до утворення газового містка між електродами. З цього моменту $E_{пр}$ рідкого діелектрика починає зменшуватися.

В очищених від домішок рідинах при високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися виривання електронів з металевих електродів і, як і у випадку пробою газів, руйнування молекул самої рідини за рахунок зіткнень із зарядженими частками.

4.3. Пробій твердих діелектриків

Для твердих діелектриків характерні такі види пробою:

- електричний;
- електротепловий;
- електрохімічний.

Залежно від різних факторів у тому самому діелектрику можуть виникати зазначені види пробою.

Електричний пробій за своєю природою є електронним процесом, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі утворюється електронна лавина. Він обумовлений ударною іонізацією чи розривом зв'язків між частками діелектрика під дією електричного поля. Відповідно до теорії А.А.Воробйова, електрична міцність діелектриків збільшується зі зростанням енергії кристалічних ґраток. У рівномірному електричному полі вільні електрони, появі яких сприяє автоелектронна емісія, прискорюються і, зіштовхуючись з вузлами кристалічних ґраток, віддають їм накопичену енергію. Електрони, що досягли критичної швидкості, роблять відщеплення нових електронів, і стаціонарний стан порушується унаслідок виникнення ударної іонізації.

У процесі ударної іонізації при взаємодії носіїв зарядів з електронами відбувається порушення хімічних зв'язків і перехід твердої речовини в стан частково іонізованої газової плазми, яка поширюється в напрямку потоку носіїв заряду. Потенціал заряду вноситься в головну частину каналу. Процес далі йде доти, поки канал не перетне весь розрядний проміжок.

Чисто електричний пробій має місце, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, а також відсутня іонізація газових включень. Цей вид пробою протікає практично миттєво за час 10^{-7} - 10^{-8} с.

Більшість технічних діелектриків відрізняються неоднорідністю структури. Наявність у них включень з підвищеною провідністю і діелектричною проникністю приводить до викривлення електричного поля, утворення всередині діелектрика ділянок з підвищеною провідністю. Це приводить до зменшення електричної міцності неоднорідних діелектриків.

У сильно неоднорідному електричному полі у твердих діелектриках може мати місце **ефект полярності**, причому менша пробивна напруга відповідає позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни. Незважаючи на те, що у твердих діелектриках ефект полярності виражений слабкіше, ніж у газоподібних, розходження пробивних напруг може досягати 20-30%.

Низькою електричною міцністю відрізняються пористі діелектрики, наприклад, непросочений папір, дерево, кераміка і т.д. З метою підвищення електричної міцності проводять їхнє просочення чи покриття спеціальними складами, що обмежують доступ вологи всередину діелектрика.

Тепловий пробій твердих діелектриків виникає в тому випадку, коли кількість теплової енергії, що виділяється в діелектрику внаслідок діелектричних втрат, стійко перевищить кількість енергії, що діелектрик здатний передати в навколишнє середовище. Необмежений ріст температури закінчується тепловим руйнуванням діелектрика. Таким чином, тепловим пробоем називається пробій, обумовлений порушенням теплової рівноваги діелектрика внаслідок діелектричних втрат.

Пробій, як правило, відбувається в тому місці діелектрика, де умови тепловідводу найгірші, тому величина $U_{пр}$ залежить від властивостей того середовища, у якому знаходиться діелектрик. З ростом температури навколишнього середовища пробивна напруга експоненціально зменшується, що пов'язано зі збільшенням кількості енергії, яка виділяється в діелектрику в результаті діелектричних втрат, і зменшенням кількості енергії, яку діелектрик здатний відводити в навколишнє середовище.

При пробіі товстих зразків тепловідведення від внутрішніх областей утруднений, тому вони перегріті більше, і в результаті цього в міру збільшення товщини зразків $E_{пр}$ зменшується.

Зменшення $E_{пр}$ спостерігається також при тривалій витримці зразка під напругою, тому що діелектрик за цей час нагрівається більше за рахунок діелектричних втрат.

Розглянемо методику спрощеного розрахунку пробивної напруги при тепловому пробіі однорідного діелектрика, в якому переважними є втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю. Значення потужності, що розсіюється в діелектрику, виражається формулою

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (1.2)$$

З огляду на, що $\operatorname{tg} \delta$ експоненційно залежить від температури, наведену формулу можна перетворити до виду

$$P_a = \frac{U^2 f \varepsilon S \operatorname{tg} \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,810^{10} h} \quad (1.3)$$

де U - прикладена напруга;

f - частота;

ε - відносна діелектрична проникність (вважаємо її незалежною від температури);

$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат при температурі навколишнього середовища;

α - температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних утрат;

- T - температура нагрітого за рахунок діелектричних втрат матеріалу;
 T_0 - температура навколишнього середовища;
 S - площа електрода;
 h - товщина діелектрика.

Якщо товщина діелектрика не дуже велика, то можна припустити, що температура по всьому об'єму матеріалу, що знаходиться між електродами, однакова, тобто крайовим ефектом можна знехтувати.

Оскільки теплопровідність металу електродів на два-три порядки більше, ніж теплопровідність діелектрика, то тепловідводом через торцеву поверхню діелектрика зневажаємо і припускаємо, що тепловідвід від нагрітого об'єму, розповсюджується в навколишнє середовище через електроди. Потужність, що відводиться від діелектрика, виразимо за допомогою формули Ньютона:

$$P_l = 2\sigma S(T - T_0) \quad (1.4)$$

де σ - сумарний коефіцієнт теплопередачі від діелектрика в зовнішнє середовище.

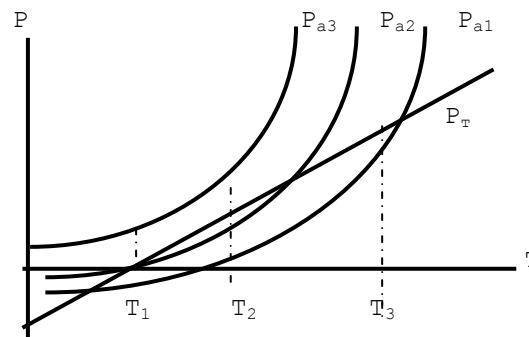


Рис. 4.4 -Залежності $P_a = f(T)$ при різних напругах і $P_T = f(T)$

На рис. 4.4 наведені експоненти тепловиділення $P_a = f(T)$ при різних значеннях прикладеної напруги і пряма теплопередачі $P_T = f(T)$.

Коли до діелектрика прикладається напруга, він нагрівається до температури T_1 , при якій настає стійка тепла рівновага, тому що потужність тепловиділення дорівнює потужності, що відводиться від зразка. Ця напруга не є небезпечною для зразка, якщо нагрів до температури T_1 не приводить до механічного чи хімічного руйнування структури матеріалу. При перевищенні те-

температури діелектрика з якихось причин, він повинний мимовільно повернутися в стійкий стан у зв'язку з тим, що ордината потужності, що відводиться, більше ординати тепловиділення.

Підвищення напруги супроводжується нагріванням діелектрика до температури T_2 , коли настає хитка теплова рівновага.

Незначна зміна температури приведе до перевищення потужності тепловиділення над потужністю, що відводиться від зразка. Температура діелектрика збільшується, що з часом приводить до його теплового руйнування. При подальшому збільшенні напруги (крива P_{a3}) теплова рівновага не настає і температура діелектрика постійно росте. Напруга, при якій має місце хиткий граничний режим, може бути прийнята за напругу теплового пробою $U_{пр}$. Його можна визначити за двома умовами:

$$P_a = P_T \quad (1.5)$$

$$\partial P_a / \partial T = \partial P_T / \partial T \quad (1.6)$$

Умова (1.5) виконується тільки для граничного режиму, а умова (1.6) - для усіх випадків усталеної роботи діелектрика під напругою.

Використовуючи вирази (1.3) – (1.4), маємо

$$\frac{U^2 f \varepsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2 \sigma S (T - T_0) \quad (1.7)$$

$$\frac{\alpha U^2 f \varepsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2 \sigma S \quad (1.8)$$

Розділивши вираз (1.8) на (1.7), одержимо

$$1/\alpha = T - T_0 \quad (1.9)$$

Підставляючи (1.9) у (1.8) і вирішуючи його відносно U , визначимо $U_{пр}$:

$$U_{пр} = K \sqrt{\frac{\sigma h}{f \varepsilon \alpha t g \delta_0}}, \quad (1.10)$$

де K - числовий коефіцієнт, рівний $1,15 \cdot 10^5$, якщо усі величини, що мають розмірності, виражені в системі СІ.

З отриманого виразу випливає, що напруга теплового пробою буде вище, якщо умови тепловідводу краще і діелектрик має більшу товщину. Збільшення частоти прикладеної напруги, коефіцієнта діелектричних втрат $\epsilon \tan \delta$ і тангенса кута діелектричних втрат зменшує напругу пробою.

Коли перегрів діелектрика обумовлений тільки втратами на електропровідність, то вираз (1.10) за допомогою (1.3.9) і (2.11) перетвориться до виду

$$U_{пр} = K_1 \sqrt{\sigma h / (\alpha_\gamma \gamma_0)}, \quad (1.11)$$

де $K_1=0,86$; α_γ - температурний коефіцієнт питомої провідності.

У реальних умовах явище теплового пробою протікає більш складно, чим було розглянуто. По товщині діелектрика виникає перепад температури, середній шар виявляється нагрітим вище, ніж прилягаючі до електродів, опір його падає, що призводить до викривлення електричного поля і підвищення градієнта напруженості в поверхневих шарах. Має значення також теплопровідність матеріалу електродів. Усе це призводить до пробою діелектрика при більш низьких напругах, ніж ті, які одержані в результаті розрахунку.

Різновидом теплового пробою можна вважати іонізаційний пробій. Він характерний для неоднорідних діелектриків, що містять включення зі зниженою електричною міцністю, наприклад, газові включення. Таке включення можна представити у вигляді елементарного конденсатора, на обкладках якого при додаванні зовнішнього поля починає накопичуватися заряд. У зв'язку з тим, що діелектрична проникність включення завжди менше значення проникності навколишнього матеріалу, в перерізі діелектрика відбувається перерозподіл напруженості поля, що приводить до збільшення напруженості у включенні. Навіть при помірній напрузі, прикладеній до діелектрика, напруженість у включенні може досягти величини, достатньої для виникнення іонізаційного процесу, що приводить до розряду. Пробій газового чи рідкого включення діелектрика називається частковим розрядом.

Після завершення розряду напруга на включенні знову починає наростати доти, поки наступить новий пробій. Кожен розряд супроводжується нейтралізацією деякого заряду ΔQ . Для оцінки інтенсивності іонізації використовують добуток середнього значення компенсованого заряду при одному імпульсі на кількість імпульсів у секунду n . Цей добуток має розмірність струму $i = \Delta Q_x n$ й одержав назву **відносної інтенсивності іонізації**.

У результаті іонізаційних втрат розігрівається поверхня закритих пір, виникають локальні перепади температури і пов'язані з ними термомеханічні напруги. Це може призвести до розтріскування діелектрика.

Електрохімічний пробій спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли електричне поле викликає необоротні зміни електроізоляційного матеріалу. Унаслідок цього зменшується електричний опір доти, поки не наступить пробій. Даний процес називається **електрохімічним старінням матеріалу**.

Для розвитку електрохімічного пробію потрібен тривалий час, тому що він зв'язаний з процесом електропровідності. Він може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, що супроводжується тепловим ефектом і відновленням, наприклад у кераміці, окислів металів змінної валентності.

Електрохімічний пробій діелектриків має істотне значення при підвищених температурах і високій вологості.

Поверхневий пробій являє собою пробій рідини чи газу поблизу поверхні твердого діелектрика. У разі поверхневого пробію електрична міцність твердого діелектрика не порушується, але утворення провідного каналу на поверхні істотно обмежує робочу напругу ізолятора.

Чим сильніше виражені гідрофільні властивості діелектрика, тим значніше зменшується поверхнева пробивна напруга, особливо в умовах підвищеної вологості.

Значення поверхневої пробивної напруги багато в чому залежить від конфігурації електродів, габаритних розмірів і форми твердого діелектрика. Коли діелектрик експлуатується на повітрі, то напруга поверхневого пробою залежить від температури, тиску, відносної вологості повітря і частоти прикладеної напруги.

Для запобігання поверхневого пробою доцільно збільшувати довжину розрядного шляху уздовж поверхні твердого діелектрика. З цією метою створюють ребристі поверхні ізоляторів, виконують проточки різних канавок, виготовляють конструкції з "утопленими" електродами. Підвищення робочих напруг досягається також згладжуванням неоднорідностей електричного поля за рахунок зміни форми електродів чи оптимізації конструкції ізолятора. Аналогічний ефект може бути отриманий при нанесенні на поверхню ізолятора напівпровідних покриттів чи діелектричних плівок з підвищеною діелектричною проникністю.

Ефективним заходом боротьби з поверхневим пробоєм є заміна повітря рідким діелектриком. Підвищена в порівнянні з повітрям діелектрична проникність рідин сприяє зниженню напруженості поля на поверхні твердого діелектрика, що дозволяє підвищити робочу напругу.

Розглянемо приклад розрахунку пробивної напруги твердого діелектрика на конкретному прикладі.

Задача. Маємо листовий ізоляційний матеріал "міканіт", що складається з дев'яти шарів бакелітового лаку товщиною по 5мкм, які служать діелектричним зв'язуванням, і десяти шарів, що містять частки слюди товщиною по 25мкм. Визначити пробивна напруга листа міканіту в постійному електричному полі й у змінному електричному полі, вважаючи, що для слюди $E_{пр1}=75$ МВ/м, для лаку $E_{пр2}=50$ МВ/м

При розрахунку пробивної напруги міканіту замінимо його двошаровим конденсатором (рис.4.5), сумарна товщина шарів слюди якого дорівнює $h_1 = 25 \times 10 = 250$ мкм, а сумарна товщина шарів лаку $h_2 = 5 \times 9 = 45$ мкм.

Коли до матеріалу прикладена змінна напруга

$$U_1 / U_2 = \varepsilon_2 h_1 / \varepsilon_1 h_2,$$

Підставивши числові значення, одержимо

$$U_1 / U_2 = 4,0 * 250 / 8,0 * 45 = 2,7$$

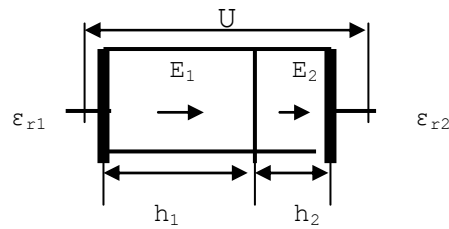


Рис. 4.5 - Двошаровий конденсатор.

У зв'язку з тим, що $h_2 \ll h_1$ і $E_{np2} < E_{np1}$, спочатку визначимо, при якій зовнішній напрузі відбудеться пробій лаку:

$$U = \frac{E_{np2}(\epsilon_1 h_2 + \epsilon_2 h_1)}{\epsilon_1 \sqrt{2}} = \frac{50 \cdot 10^6 (8 \cdot 45 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 250 \cdot 10^{-6})}{8 \sqrt{2}} = 6 \text{ кВ}$$

Після пробою лаку вся зовнішня напруга буде прикладена до слюди, пробій якої відбудеться при збільшенні зовнішньої напруги до значення

$$U_{np} = E_{np1} h_1 / \sqrt{2} = 13,2 \text{ кВ}$$

При впливі постійного поля

$$U_1 / U_2 = R_1 / R_2 = \rho_1 h_1 / \rho_2 h_2 = 10^{14} \cdot 250 \cdot 10^{-6} / (10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6}) = 5,5 \cdot 10^3$$

Напруженість поля в слюді значно більше, ніж у лаку, тому пробій міканіту відбудеться при зовнішній напрузі, що відповідає напруженості електричного поля в слюді

$$U_{np} = E_{np} (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) / \rho_1 = \frac{75 \cdot 10^6 (10^{14} \cdot 250 \cdot 10^{-6} + 10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6})}{10^{14}} = 18,7 \text{ кВ}$$

Література: [1. с.58-73]

Контрольні запитання:

1. Перелічіть основні види пробою діелектриків, дайте їм коротку характеристику.
2. Опишіть процес пробою газів в однорідному електричному полі, вкажіть фактори, що впливають на величину напруги пробою.
3. Опишіть процес пробою газів у неоднорідному електричному полі, вкажіть основні закономірності його розвитку.
4. Наведіть приклади зміни величини напруги пробою від тиску газу, що наповняє, і відстані між електродами.
5. Опишіть процес пробою технічних рідких діелектриків, укажіть фактори, що роблять вплив на їхню електричну міцність.
6. Перелічіть основні механізми пробою твердих діелектриків.
7. Опишіть закономірності розвитку електротеплового пробою.

5. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Вибір електроізоляційного матеріалу для конкретного електротехнічного виробу проводиться з урахуванням не тільки його електричних характеристик, але й тих зовнішніх факторів, що можуть впливати на стабільність його характеристик у процесі експлуатації. До таких факторів слід віднести вологість і температуру навколишнього середовища, механічні впливи, радіоактивні випромінювання, вплив хімічно агресивних речовин і т.д.

Гігроскопічність електроізоляційних матеріалів. Багато електроізоляційних матеріалів гігроскопічні, тобто мають здатність вбирати в себе вологу з навколишнього середовища і вологопроникливі, тобто здатні пропускати крізь себе пари води. В атмосферному повітрі завжди міститься деяка кількість водяного пару.

Абсолютна вологість повітря - це маса водяного пару, що міститься в одиниці об'єму повітря.

Відносною вологістю повітря називають відношення

$$\varphi_v = \frac{m}{m_{\text{макс}}} 100\% \quad (1.5.1)$$

де m - маса водяного пару в одиниці об'єму;

$m_{\text{макс}}$ - максимально можлива маса водяного пару при тій же температурі.

Нормальними умовами вважають вологість 60-70% при температурі повітря 20 ± 5 °С.

Вплив підвищеної вологості повітря в першу чергу впливає на поверхневий опір діелектрика. Для захисту поверхні електроізоляційних деталей з полярних твердих діелектриків від дії вологості їх покривають лаками, що не змочуються водою. Здатність матеріалу змочуватися водою характеризується крайовим кутом змочування.

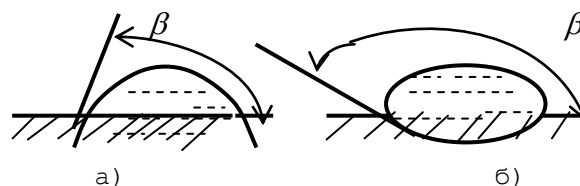


Рис. 5.1 - Крапля води на поверхнях, що змочуються (а) і що не змочуються (б).

Для поверхонь, що змочуються $\beta < 90^\circ$, для тих, що не змочуються $\beta > 90^\circ$.

Попадання води в пори твердого діелектрика приводить до різкого зниження їхніх електричних властивостей. Розмір молекул води складає $\approx 2,5 \cdot 10^{-10}$ м, що дозволяє їм проникати навіть у внутрішньо молекулярні пори електроізоляційних матеріалів.

Вологовбирання зразка матеріалу визначають за формулою

$$\omega_a = 100(m_t - m) / m$$

де m - початкова маса зразка;

m_t - маса зразка після його витримки протягом t часу у вологому середовищі.

Сухий зразок матеріалу, вміщений у вологе повітря, буде поступово поглинати вологу з повітря, його вологість з часом буде підвищуватися, наближаючись до рівноважної вологості ψ_p (рис 5.2, крива 1). Якщо зразок буде мати вологість більшу, ніж вологість навколишнього повітря, то через якийсь час його вологість зменшиться, наблизившись до значення рівноважної вологості (рис.5.2, крива 2).

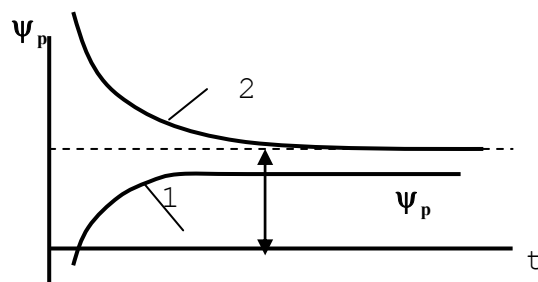


Рис.5.2 - Зміна вологості зразка матеріалу при зволоженні (1) і сушінні (2) при постійних значеннях відносної вологості навколишнього повітря і температури

Коли електричній ізоляції доводиться працювати в умовах зіткнення не тільки з повітрям, що містить пари води, але і з водою (атмосферні опади, заглибні установки і т.д.) то становить інтерес визначення водопоглинання. Однак водопоглинання і вологопоглинання не повністю відображають ступінь можливих змін електричних властивостей матеріалу при зволоженні. У тому випадку, якщо поглинена волога здатна утворювати всередині ізоляції нитки чи плівки, що можуть пронизувати весь проміжок між електродами, навіть малі кількості вологи, що поглинається, приводять до різкої зміни електричних властивостей ізоляції. Якщо волога розподіляється по об'єму матеріалу у вигляді окремих, не з'єднаних між собою малих включень, то вплив її на електричні властивості матеріалу менш істотний. Аналогічно для матеріалів, що

не змочуються, зменшення питомого поверхневого опору при витримці у вологому середовищі незначне, тому що волога навіть у випадку утворення окремих крапель, не створює суцільну плівку.

При змінній напрузі найбільш чутливим до зволоження параметром діелектриків є $\operatorname{tg}\delta$, що помітно зростає при зволоженні. Менш чутлива величина ϵ , однак у зв'язку з великим значенням діелектричної проникності води ($\epsilon \approx 80$), при зволоженні матеріалу ϵ його, як правило, зростає.

Для оцінки якості матеріалів, які застосовуються для захисних покриттів (оболонки кабелів, компаундні заливання, лакові покриття і т.д.) важливо знати вологопроникність електроізоляційних матеріалів, тобто здатність пропускати крізь себе пари води.

Кількість вологи m (у мікрограмах), що проходить за час t (годину) через ділянку поверхні S (см²) шару ізоляційного матеріалу товщиною h (см) під дією різниці тисків водяних парів p_1 і p_2 (мм.рт.ст.) з двох сторін шару, дорівнює

$$m = \Pi \frac{(p_1 - p_2) S t}{h} \quad (1.5.2)$$

Коефіцієнт Π є вологопроникність даного матеріалу.

Вологопроникність ізоляційних матеріалів змінюється в широких межах. Так, для парафіну значення Π дорівнює 0,0007; для полістиролу – 0,03; для триацетату целюлози – близько 1 мкг/(см год мм.рт.ст.). Зменшити гігроскопічність і вологопроникність ізоляційних матеріалів можна в результаті їхнього просочення. Однак з огляду на те, що молекули рідини, яка просочує, значно більше молекул води, просочення не дозволяє повністю закрити доступ волозі в пори матеріалу.

Для олій, лаків, заливальних і просочуючих компаундів важливою характеристикою є в'язкість.

Відповідно до закону Пуазейля, об'єм рідини V з динамічною в'язкістю η , що протікає за час τ під дією тиску p крізь капіляр довжиною l і радіусом r дорівнює

$$V = \frac{1}{8} \frac{\pi r^4 \tau p}{\eta l} \quad (1.5.3)$$

Швидкість руху твердої кульки радіусом r у неорганічному середовищі з динамічною в'язкістю η під впливом безупинно впливаючого зусилля F постійна і має величину, обумовлену законом Стокса

$$v = \frac{1}{6\pi\eta} \frac{F}{r} \quad (1.5.4)$$

У системі СІ вимірюються в Паскаль-секундах

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ кг} / \text{м} \cdot \text{с} = 10 \text{ Пуаз}$$

Кінематична в'язкість ν дорівнює відношенню динамічної в'язкості рідини до її щільності

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.5.5)$$

Розмірність кінематичної в'язкості - $\text{м}^2/\text{с}$.

Умовна в'язкість пов'язана з динамічною і кінематичною в'язкостями емпіричними формулами. Це відношення часу витікання з віскозиметра Енглера 200мл випробувальної рідини (при заданій температурі випробувань) до постійного приладу. Для віскозиметра Енглера постійна приладу являє собою час витікання 200 мл дистильованої води при 20 °С. Вимірюється умовна в'язкість у градусах Енглера.

Теплові властивості діелектриків. Ці властивості характеризуються наступними параметрами: нагрівостійкістю, морозостійкістю, теплопровідністю і тепловим розширенням.

Здатність електроізоляційних матеріалів без шкоди для них як короткочасно, так і довгостроково витримувати вплив високої температури, а також різкі зміни температури називається **нагрівостійкістю**.

Для неорганічних матеріалів нагрівостійкість визначають за зміною їхніх електричних властивостей ($\text{tg}\delta, \rho$). Величину нагрівостійкості оцінюють відповідними значеннями температури, при якій відбулися ці зміни.

Нагрівостійкість органічних діелектриків можна визначати за початком механічних деформацій і зміною електричних характеристик.

Одним із способів оцінки нагрівостійкості є спосіб Мартенса. Він застосовується для оцінки якості пластмас і подібних їм матеріалів. За цим способом нагрівостійкість характеризують таким значенням температури, при якому згинаюча напруга 50 кГ/см^2 викликає помітну деформацію випробуваного зразка.

У процесі експлуатації в діелектриках спостерігається **теплове старіння** – необоротне погіршення якості ізоляції при тривалому впливі підвищеної температури внаслідок повільно протікаючих хімічних процесів. Крім температури на швидкість теплового старіння можуть впливати: наявність озону чи інших хімічних реагентів, вплив електричного поля, ультрафіолетового випромінювання, механічні навантаження і т.д. Для перевірки стійкості електроізоляційних матеріалів до теплового старіння їх тривалий час витримують при підвищеній температурі, потім порівнюють їхні властивості з властивостями вихідного матеріалу.

Матеріали, що використовуються для ізоляції електричних машин, трансформаторів і апаратів за нагрівостійкістю, розділяються на сім класів. Для кожного класу встановлюється певна максимальна температура, при якій матеріал може довгостроково працювати без погіршення своїх властивостей (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 Класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів

Позначення класу	Температура, що характеризує клас ($^{\circ}\text{C}$)	Основні групи електроізоляційних матеріалів, що відповідають даному класу
У	90	Волокнисті матеріали з целюлози, бавовни, натурального шовку, поліамідів; полівінілхлорид, вулканізований натуральний каучук
А	105	Волокнисті матеріали, просочені олійними, олійно-смоляними

		та іншими лаками
Е	120	Синтетичні волокна, плівки, смоли, шаруваті пластики, ізоляція емальованих проводів на епоксидних лаках
В	130	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна в сполученні з органічними в'язучими
Ф	155	Ті ж матеріали в сполученні із синтетичними в'язучими; ізоляція емальованих проводів на поліефірамідних лаках
Н	180	Ті ж матеріали з кремнійорганічними в'язучими; кремнійорганічні еластомери
С	>180	Слюда, скло, кварц, азбест, фторопласт-4.

Морозостійкість - це здатність ізоляції працювати без погіршення експлуатаційної надійності при низьких температурах. Електричні властивості ізоляції при низьких температурах, як правило, поліпшуються, але багато матеріалів при зниженні температури стають крихкими і твердими, що затрудняє їхнє використання.

Теплопровідність матеріалів характеризують **питомою теплопровідністю** γ_T , що може бути визначена відповідно до рівняння Фур'є

$$\Delta P_T = \gamma_T \frac{dT}{dl} \Delta S \quad (1.5.5)$$

де ΔP_T - потужність теплового потоку через площадку ΔS , нормальну до потоку енергії; $\frac{dT}{dl}$ - градієнт температури.

Електроізоляційні матеріали мають значно меншу питому теплопровідність, ніж метали. Найменше значення γ_T мають пористі електроізоляційні матеріали з повітряними включеннями. При просоченні, а також при ущільненні матеріалів зовнішнім тиском, γ_T збільшується. Як правило, кристалічні діелектрики мають більш високе значення γ_T , ніж аморфні.

Теплове розширення діелектриків оцінюють температурним коефіцієнтом лінійного розширення:

$$TK_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} \quad (1.5.6)$$

Матеріали, що мають мале значення коефіцієнта лінійного розширення, як правило, мають високу нагрівостійкість. Органічні діелектрики мають більше значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, ніж неорганічні.

Встановити значення ТКІ можна за методом аналогічним для визначення ТК ϵ .

Механічні властивості діелектриків. У процесі експлуатації електроізоляційні матеріали піддаються впливу механічних навантажень. У зв'язку з цим велике практичне значення мають механічна міцність і здатність їх не деформуватися від механічних напружень. Характеристиками, за допомогою яких можна оцінити механічні властивості електроізоляційних матеріалів, є міцність на розрив, стиснення і вигин. Значення цих характеристик для волокнистих, шаруватих і подібних їм матеріалів залежить від напрямку прикладення навантаження. При підвищенні температури механічна міцність електроізоляційних матеріалів, як правило, зменшується. У деяких випадках практичне значення мають такі механічні характеристики матеріалів, як крихкість і твердість. Пов'язано це з тим, що багато матеріалів, володіючи порівняно високою міцністю стосовно статичних навантажень, легко руйнуються під дією динамічних зусиль. Для оцінки здатності матеріалу витримувати динамічне навантаження їх піддають випробуванням з метою визначення питомої ударної в'язкості. Цей параметр визначається відношенням витраченої на злам зразка енергії на поперечний переріз зразка. У системі СІ **питома ударна в'язкість** має розмірність Дж/м².

Твердість - це здатність поверхневого шару матеріалу протистояти деформації від стискаючого зусилля, переданого за допомогою предметів малих розмірів. Даний параметр можна визначити різними методами: для неорганічних діелектриків – за мінералогічною шкалою, для органічних – за способом Брінелля чи за допомогою маятника Кузнєцова.

В основі мінералогічної чи умовної десяткової шкали твердості лежить ряд природних матеріалів, розташований за їх зростаючою твердістю. Твердість талька прийнята за одиницю:

Тальк	Гіпс	Кальцит	Флюорит	Апатит	Ортоглаз	Кварц	Топаз	Корунд	Алмаз
1	1,4	10	27	44	900	1500	5500	360000	5000000

Твердість речовини визначають за опором нанесенню на його поверхні подряпин. Наприклад, корундом можна нанести подряпини на поверхні зразків мінералів 1 – 8. Слід зазначити, що наведені цифри приблизно характеризують правдиві співвідношення твердості окремих мінералів.

Спосіб Брінелля полягає в тому, що загартована кулька діаметра D вдавлюється в зразок з певним зусиллям P . Після зняття навантаження, виміряється глибина h відбитка кульки на поверхні матеріалу чи діаметр d лунки. Твердість за Брінеллем визначається за формулою

$$T_B = \frac{P}{\pi D h} \quad (1.5.7)$$

Хімічні властивості діелектриків. У процесі виготовлення та експлуатації електроізоляційні матеріали піддаються впливу різних хімічних речовин. У зв'язку з цим важливо, щоб при тривалій роботі матеріали не викликали корозію дотичних з ними металів, а також не руйнувалися з виділенням побічних продуктів. Крім того, вони не повинні реагувати з навколишніми речовинами.

Розчинність твердих матеріалів оцінюється кількістю матеріалу, що перейшла в розчин за одиницю часу, з одиниці поверхні матеріалу, що стикається з розчинником. Ця характеристика важлива для підбору придатних розчинників, лаків, а також для прогнозування стійкості твердих матеріалів до впливу різних рідин.

При визначенні хімічної стійкості зразки матеріалів на тривалий час вміщують в умови, по можливості близькі до експлуатаційних з погляду вибору концентрації хімічно активного середовища, температури, тиску і т.д. Після цього визначають зміну зовнішнього вигляду зразків, їхньої маси та інших параметрів.

Для олій та інших електроізоляційних рідин вимірюють **кислотне число**, що характеризує вміст у речовині вільних кислот. Ця величина визначає технологічні особливості матеріалу, а також здатність діелектрика викликати коро-

зію дотичних з ним тіл. У трансформаторній олії високе кислотне число є ознакою поганого очищення чи тривалого процесу старіння олії.

Кислотне число - це кількість грамів їдкого калію, що потрібна для того, щоб нейтралізувати всі вільні кислоти, які містяться в одному кілограмі випробуваного матеріалу.

Література:[1.с.73 – 88]

Контрольні запитання:

1. *Опишіть способи зменшення гігроскопічності діелектриків.*
2. *Перелічіть параметри, що характеризують теплові властивості діелектриків. Дайте їм коротку характеристику.*
3. *Перелічіть класи нагрівостійкості, на які розділяються електроізоляційні матеріали.*
4. *Перелічіть параметри, що характеризують механічні властивості діелектриків, укажіть фактори, що впливають на них .*
5. *Перелічіть параметри, що характеризують хімічні властивості діелектриків.*

РОЗДІЛ II . ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

1. Провідникові матеріали
2. Основні положення теорії електропровідності
3. Електропровідність металів
4. Провідникові матеріали: мідь, алюміній, їх сплави
5. Сплави високого опору
6. Надпровідники
7. Кріопровідники

Використання будь-якого електротехнічного матеріалу завжди супроводжується його вибором з існуючої номенклатури. З кожним роком номенклатура матеріалів, які застосовуються в електротехнічній промисловості, розширюється, що ускладнює завдання відбору відповідного матеріалу. Вибір слід проводити, виходячи з усього комплексу властивостей, якими він володіє. Для забезпечення надійної роботи проектованого електротехнічного виробу необхідні дані про вплив різних зовнішніх факторів на характеристики використовуваних матеріалів. Таким чином, тільки на підставі комплексного вивчення характеристик електротехнічних матеріалів може бути здійснений раціональний вибір того чи іншого електротехнічного матеріалу.

1. Провідникові матеріали

Провідниковими називаються матеріали, які мають високу питому провідність завдяки наявності в них великої кількості часток з електричними зарядами.

Класифікацію провідникових матеріалів за їхньою питомою провідністю можна представити у наступному вигляді:

- Надпровідники;
- Кріопровідники;
- Метали;
- Сплави металів;
- Електроліти;

- Напівпровідники.

Розходження між окремими матеріалами полягає не тільки в значеннях їхньої питомої провідності, але й у механізмі електропровідності. Для багатьох матеріалів характерна *електронна електропровідність*. Такі матеріали називаються *провідниками першого роду*. В електролітах та деяких інших провідниках проявляється *іонна електропровідність*. Вони називаються *провідниками другого роду*. *Молекулярна (електрофоретична) електропровідність* також характерна для провідників другого роду.

Як провідники, можуть бути використані тверді речовини, рідини й, за певних умов, гази.

Твердими провідниками є метали, сплави металів, а також деякі модифікації вуглецю. З металевих провідникових матеріалів слід виділити метали високої питомої провідності, питомий опір яких при нормальній температурі не перевищує $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, і сплави високого опору, що мають питомий опір при нормальній температурі не менше $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

До **рідких провідників** відносять розплавлені метали й електроліти. При нормальній температурі, як рідкий провідник, може використовуватися лише ртуть, яка має температуру плавлення -39°C або галій $-29,8^{\circ}\text{C}$. Інші метали можуть бути рідкими провідниками лише при підвищених або високих температурах.

Електролітами є розчини кислот, лугів і солей, а також розплави іонних з'єднань. Електропровідність електролітів пов'язана з переносом іонів, у результаті чого склад електроліту поступово змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Всі гази й пари при низькій напруженості електричного поля не є провідниками. Однак коли напруженість електричного поля перевищує деяке критичне значення, що відповідає появі ударної і фотонної іонізації, газ стає провідником з електронною та іонною електропровідністю. Особливе рівноважне

провідне середовище представляє сильно іонізований газ із рівною кількістю електронів і позитивно заряджених іонів в одиниці об'єму, – **плазмою**.

Дуже малий питомий опір при низьких температурах мають **кріопровідники** й **надпровідники**.

2. Основні положення теорії електропровідності

Виведемо загальну формулу, що виражає зв'язок питомої провідності речовини з фізичними величинами, які характеризують носії заряду, наявні в речовині. Припустимо, що в речовині є тільки однакові за своєю природою, абсолютним значенням і знаком електричні заряди. Будемо вважати, що в одиниці об'єму речовини з ребром, рівним одиниці довжини, перебуває n носіїв зарядів. Тоді сумарний заряд цього об'єму відповідно дорівнює $n \cdot q$. Якщо в розглянутій частині речовини діє електричне поле з напруженістю E , яка перпендикулярна до однієї з граней куба, то на кожний носій заряду діятиме сила, рівна $F = n \cdot q$. Ця сила створює впорядковану складову V_d швидкості носія заряду, що називається швидкістю дрейфу на відміну від V_T – невпорядкованого теплового руху. У позитивних зарядів швидкість дрейфу збігається з напрямком напруженості електричного поля, а в негативних зарядів спрямована проти вектора напруженості. У зв'язку з тим, що швидкості різних носіїв зарядів відрізняються одна від одної й до того ж змінюються в часі, під V_d і V_T матимемо на увазі середню швидкість для всіх носіїв зарядів за деякий досить великий проміжок часу.

Добуток $n \cdot q \cdot V_d$ представляє кількість електрики, що проходить за одиницю часу через одиницю поперечного перерізу провідної речовини, тобто щільність струму

$$\gamma = n \cdot q \cdot V_d \quad (1.1)$$

З огляду на те, що питома провідність матеріалу визначається як коефіцієнт пропорційності між щільністю струму й напруженістю електричного поля, що викликала цей струм, запишемо

$$J = \gamma E \quad (1.2)$$

$$\gamma = \frac{nq \mathfrak{S}_\delta}{E} \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{E}{nq\mathfrak{S}_\delta} \quad (1.4)$$

Відношення дрейфової швидкості носія заряду до напруженості, що викликає цю швидкість, електричного поля, називається рухливістю носія заряду:

$$u = \frac{\mathfrak{S}_\delta}{E} \quad (1.5)$$

Очевидно, що для зв'язаних зарядів $\bar{u} = 0$, а для вільних зарядів $\bar{u} \neq 0$, причому для позитивних зарядів $\bar{u} \geq 0$ – позитивне, а для негативних $\bar{u} \leq 0$ – негативне.

Запишемо загальну формулу питомої провідності в найпростішому вигляді

$$\gamma = n \cdot q \cdot u \quad (1.6)$$

З цієї формули можна зробити висновок, що незалежно від знаку носіїв заряду питома провідність завжди позитивна. Якщо в речовині присутнє одночасно m носіїв зарядів різного виду, то незалежно від їхнього знаку внески різних видів носіїв у питому провідність речовини повинні підсумовуватися арифметично:

$$\gamma = \sum_{i=1}^m n_i q_i u_i \quad (1.7)$$

Дана формула справедлива для ізотропних речовин. Якщо речовина анізотропна, то формула прийме вигляд

$$\begin{aligned} J_x &= \gamma_{xx} E_x + \gamma_{xy} E_y + \gamma_{xz} E_z \\ J_y &= \gamma_{yx} E_x + \gamma_{yy} E_y + \gamma_{yz} E_z \\ J_{zy} &= \gamma_{zx} E_x + \gamma_{zy} E_y + \gamma_{zz} E_z \end{aligned} \quad (1.8)$$

2. Електропровідність металів

У металах і сплавах у більшості випадків є велика кількість вільних електронів. Ці електрони й атоми решітки роблять хаотичні рухи, швидкість яких тим більше, чим вище температура металу. Розміри електронів надзвичайно малі в порівнянні з розмірами атомів і тим більше в порівнянні з відстанями

між атомами. Таким чином, ці електрони певною мірою нагадують молекули газу, тому їх образно називають "електронним" газом.

Коли на метал не діє зовнішнє електричне поле, розподіл швидкостей теплового руху електронів V_T за різними напрямками рівноімовірний. У зв'язку з цим геометрична сума цих швидкостей у будь-який момент часу дорівнює нулю й відповідно струм у відсутності прикладеної напруги не протікає. Якщо до металу прикласти напругу, то в ньому створюється напруженість електричного поля E і на кожний електрон діятиме додаткове механічне зусилля $F = E \cdot q$. Розглядаючи електрон як матеріальну частку, що володіє масою й не зустрічає перешкод своєму рухові у вигляді тертя навколишнього середовища, можна сказати, що електрон одержує постійне прискорення переважно в напрямку поля:

$$a = F/m = E(e/m) \quad (1.9)$$

Через час t з моменту початку руху складова швидкості електрона, обумовлена зовнішнім електричним полем, досягне значення

$$V_d = a \cdot t = E(e/m) \cdot t \quad (1.10)$$

Повна швидкість електрона буде дорівнювати геометричній сумі швидкості дрейфу V_d і швидкості теплового руху V_T . Швидкість дрейфу електрона не може зростати під дією електричного поля безмежно, тому що електрон буде випробовувати зіткнення з атомами решітки і атомами домішок. Після кожного такого зіткнення швидкість електрона падатиме до нуля, а потім збільшуватися з тим же прискоренням.

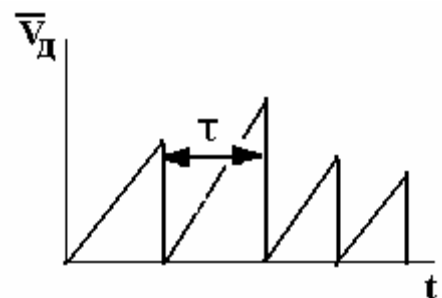


Рис.1.1 - Залежність середньої швидкості дрейфу електрона від часу.

Найбільше значення V_d електрона матиме наприкінці кожного періоду, що має тривалість τ - час вільного пробігу.

$$V_{d \max} = E(e/m) \tau \quad (1.11)$$

Відповідно середня швидкість V_d дорівнює

$$\bar{V} = E(e/m)\tau/2 \quad (1.12)$$

Середнє значення τ для всіх електронів можна визначити приблизно, полягаючи відповідно до електронної теорії металів, що швидкість теплового руху значно більше, ніж швидкість дрейфу $V_T \gg V_d$. Тоді

$$\bar{\tau} = l/\bar{V}_T \quad (1.13)$$

де l – середня довжина вільного пробігу електрона;

V_T – середня швидкість теплового руху електронів.

Таким чином, середнє значення швидкості дрейфу електрона для всіх електронів у будь-який момент часу можна подати у вигляді

$$\bar{V}_d = E(e/m)l/2V_T \quad (1.14)$$

Завдяки наявності складові швидкості дрейфу й теплової швидкості створюється впорядкований рух зарядів у напрямку градієнта електричного поля, тобто через метал протікає електричний струм. Питому провідність металу можна визначити за формулою (1.6), підставляючи замість q заряд електрона, а замість значення V_d середнє значення швидкості дрейфу з формули (1.14):

$$j = \frac{ne^2 \bar{l}}{2mV_T} \quad (1.15)$$

Відзначимо, що величина напруженості електричного поля в дану формулу не входить, що відповідає незалежності опору металевого провідника від прикладеної до даного провідника напруги (відповідно до закону Ома).

Важливе значення має характер залежності питомого опору металів від температури. Припускаючи, що кінематична енергія теплового руху вільних електронів підкоряється тим же закономірностям, що й тепла енергія молекул ідеального газу, запишемо :

$$\frac{1}{2} m \bar{V}_T^2 = \frac{3}{2} kT \quad (1.16)$$

де k - постійна Больцмана.

Визначимо V_T з (1.16) і, підставивши в (1.3), матимемо

$$\gamma = \frac{ne^2 l}{2\sqrt{3kTm}}; \quad (1.17)$$

$$\rho = \frac{2\sqrt{3kT}}{ne^2 l}$$

З отриманих формул можна зробити висновок, що при збільшенні температури питомий опір металу повинен дещо зростати. Пояснюється це тим, що при підвищенні температури посилюються коливання вузлів кристалічних решіток, зменшується довжина вільного пробігу електронів і, як наслідок, зростає опір. Таким чином, температурний коефіцієнт питомого опору TK_ρ є величиною позитивною.

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1.18)$$

Відповідно до класичної електронної теорії Друде - Лоренца, значення температурного коефіцієнта питомого опору чистих металів у твердому стані повинне бути близьким до температурного коефіцієнта розширення ідеального газу, тобто $\frac{1}{273} \text{K}^{-1} = 0,00367$.

Для практичних розрахунків використовуємо формулу

$$\rho_2 = \rho_1 \left[1 + \bar{\alpha}_\rho (T_2 - T_1) \right] \quad (1.19)$$

де $\bar{\alpha}_\rho$ - середнє значення температурного коефіцієнта питомого опору металу в діапазоні температур від T_1 до T_2 .

При плавленні у більшості металів спостерігається різке збільшення питомого опору (рис.1.2).

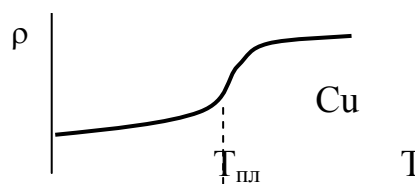


Рис 1.2 - Графік залежності $\rho = f(T)$ для міді.

Однак існують метали, в яких питомий опір при плавленні зменшується. Збільшення питомого опору спостерігається в тих металів, у яких при плавленні збільшується об'єм, тобто зменшується щільність. У металів, що зменшують свій об'єм при плавленні, питомий опір зменшується. Прикладом таких металів є: вісмут ρ зменшується на 54%; галій – на 53%; сурма - на 28-29%.

Домішки до чистих металів, а також порушення їхньої структури, як правило, приводять до збільшення питомого опору.

Якщо при сплавленні двох металів відбувається утворення твердого розчину, тобто, при затвердінні вони спільно кристалізуються і атоми одного металу входять у кристалічні решітки другого, то відбувається істотне збільшення питомого опору:

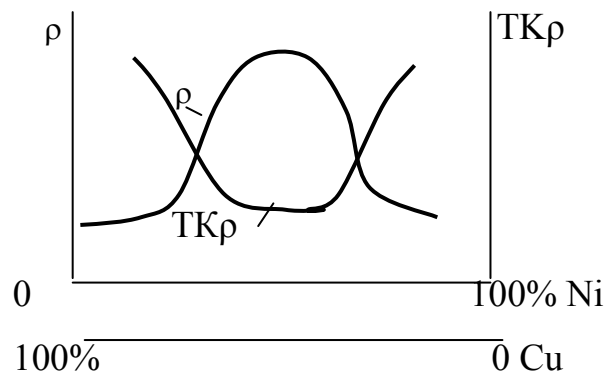


Рис 1.3 - Графік залежності ρ і $TK\rho$ залежно від процентного вмісту компонентів

Перекручування кристалічних решіток, що викликаються механічними деформаціями, як і домішки, приводять до зростання питомого опору. При відпалюванні металу спостерігається зменшення питомого опору.

Велике практичне значення має теплопровідність металів, що в основному визначається тими ж вільними електронами, які викликають електропровідність. Коефіцієнт теплопровідності металів γ_T значно вище, ніж у діелектриків, що обумовлено більшою кількістю вільних електронів в одиниці об'єму. За інших рівних умов, чим більше питома провідність металу, тим більше повинен бути коефіцієнт теплопровідності. Відповідно до закону Відемана - Франца- Лоренца

$$\frac{\gamma_T}{\gamma} = L_0 T, \quad (1.20)$$

де L_0 – число Лоренца; $L_0 = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2}$

Для більшості металів даний закон справедливий в області нормальних або дещо підвищених температур.

Важливою властивістю металів є контактна різниця потенціалів. Обумовлена вона різним значенням роботи виходу електронів з різних металів, а також різною концентрацією електронів у них.

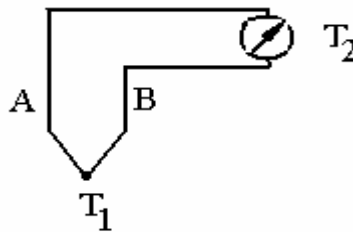


Рис.1.4 - Схема термопари

Якщо температура кінців термопари однакова, то різниця потенціалів замкнутого ланцюга дорівнює нулю. Коли один спай має температуру T_1 , а другий T_2 між ними виникає термо-е.р.с.:

$$U = \frac{k}{e} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_{oa}}{n_{ob}} = \phi(T_2 - T_1), \quad (1.21)$$

де n_{oa} і n_{ob} - відповідно концентрації електронів у металі A и B; k - постійна Больцмана; ϕ - постійний для даної пари коефіцієнт термо-е.р.с.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення провідників визначається за формулою

$$TKI = \alpha_1 = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \quad (1.22)$$

Цей коефіцієнт необхідно враховувати не тільки при розгляді роботи різних сполучених матеріалів у тій чи іншій конструкції, тому що можливе її меха-

нічне руйнування при зміні температури (розтріскування скла, кераміки), але й при розрахунку температурного коефіцієнта електричного опору

$$\text{TKR} = \alpha_R = \alpha_p - \alpha_1 \quad (1.23)$$

Для чистих металів, як правило, $\alpha_1 \ll \alpha_p$, тому значенням α_1 можна знехтувати й вважати $\alpha_R \approx \alpha_p$. Але для сплавів значенням α_1 зневажати не можна.

При підвищенні температури значення α_1 в металів, як правило, зростає.

Розглянемо, як можуть змінюватися геометричні розміри провідникового матеріалу при зміні температури на наступному прикладі. Необхідно визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення α_1 і подовження ніхромового дроту, якщо відомо, що при підвищенні температури від 20 до 1000°C електричний опір дроту змінюється від 50 до 56,6 Ом. Довжина дроту в холодному стані $l = 50$ м. Температурний коефіцієнт питомого опору ніхрому приймаємо рівним $15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Температурний коефіцієнт опору дроту знаходимо за формулою

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} = \frac{56,6 - 50}{50(1000 - 20)} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

Тоді

$$\alpha_1 = \alpha_p - \alpha_R = (15 - 13,5)10^{-5} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Звідси

$$\Delta l = l\alpha_1\Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}$$

3. Провідникові матеріали

Вимоги, пропоновані до провідникових матеріалів:

- висока питома провідність;
- задовільні механічні властивості як при обробці, так і при експлуатації;
- легко й надійно паятися, зварюватися і т.д.;
- бути доступними на вітчизняному ринку;
- мати низьку вартість.

Практичне застосування як провідникові матеріали одержали мідь і алюміній.

За хімічним складом мідь підрозділяється на кілька марок: М1, М00к, М0к, М0ку, М00б, М0б, М1б, М1у, М1к, М1ф, М1р. Цифри 00, 0, і 1 показують вміст міді, букви **к**, **ку** позначають катодну мідь, **б** - безкисневу, **у** - катодну переплавлену, **р**, **ф** - розкислену.

Значення міді в цих марках становить від 99,9 до 99,99%. Максимальне значення міді містять марки М00к і М00б. Як провідникові матеріали використовують мідь М1 і М0. Найбільш шкідливою домішкою в міді є кисень. При підвищенні його вмісту істотно погіршуються механічні й технологічні властивості міді. Проявляється так звана "воднева хвороба" міді. У процесі одержання міді її віджигают у захисній атмосфері. Якщо ця атмосфера містить водень або вуглеводи, то вони при високій температурі здатні проникати в мідь, де з'єднуються з киснем, у результаті чого утворюються молекули води. Тиск пару, що утвориться при нагріванні води, приводить до утворення мікротріщин. Мідь, що містить більше 0,1% кисню, стає ослабленою і легко ламається. Кращими механічними властивостями володіє мідь марки М0 (99,95%Cu), у тому числі не більше 0,02% кисню.

За механічними характеристиками розрізняють мідь марок МТ і ММ.

Мідь МТ (твердотягнута) одержують методом холодного протягання. Завдяки впливу наклепу вона має високу межу міцності при розтягуванні й мале відносне подовження, а також твердість і пружність.

Мідь ММ (м'яка відпалена) має малу твердість, невелику міцність і значне подовження при розриві.

Помітний вплив на механічні й електричні характеристики міді має температура. При нагріванні вище 200°C у результаті процесу рекристалізації механічні й електричні характеристики міді погіршуються. Крім того, питома провідність міді істотно залежить від наявності домішок. Так при вмісті в міді 0,5% домішок Zn, Cd, або Ag її питома провідність зменшується на 5%.

До недоліків міді варто також віднести її схильність до атмосферної корозії з утворенням окисних і сульфідних плівок. Швидкість окислювання зростає при нагріванні, але міцність зчеплення окисної плівки з металом не велика. Внаслідок окислювання мідь не придатна для слабкострумкових контактів, тому що металеве відшаровування і термічне розкладання викликає підвищене зношування мідних контактів при великих струмах.

Механічні й електричні характеристики провідникової міді визначають області її застосування.

М'яка мідь, питомий опір якої при 20 °С не повинен перевищувати 0,017241 мкОм*м. у вигляді дротів різного перерізу й форми, як правило, застосовується для виготовлення струмопровідних жил кабелів, обмотувальних і монтажних проводів, екранів силових кабелів, обмоток трансформаторів і т.д.

Тверда (холоднокатана) мідь, питомий опір якої має бути не більше 0,0180 мкОм*м, застосовується в основному там, де необхідно забезпечити високу механічну міцність, твердість, пружність і опірність стираючим навантаженням. Такі вимоги пред'являються до міді при виготовленні контактних проводів, шин розподільних пристроїв, колекторних пластин електричних машин і т.д.

Сплави міді. У ряді випадків замість чистої міді як провідниковий матеріал застосовують її сплави з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм. Такі сплави, які називають бронзами, мають більше високі механічні характеристики, ніж чиста мідь. Відповідно до нормативних документів бронзи, які застосовують для виготовлення конструкційних і струмопровідних частин приладів і апаратів, розділяються на наступні групи:

- бронзи олов'яні, які обробляються тиском;
- бронзи олов'яні ливарні;
- бронзи безолов'яні ливарні.

Провідникові бронзи (кадмієва, фосфориста, берилієва, хромиста) застосовують для виготовлення контактних проводів, колекторних пластин, струмопровідних пластин, контактів і т.д.

Сплави міді з цинком – латуні, як і бронзи, володіють у порівнянні з міддю більш високими механічними характеристиками зокрема більшим відносним подовженням перед розривом і більшою межею міцності при розтяганні. Ця властивість забезпечує латуням технологічну перевагу в порівнянні з міддю при штампуванні, глибокій витяжці й т.п.

В основному латуні застосовують при виготовленні різних струмопровідних деталей.

Другим за значенням провідниковим матеріалом є алюміній - найпоширеніший матеріал у природі. Його зміст у земній корі становить близько 7,5%. Алюміній має знижені в порівнянні з міддю як електричні, так і механічні властивості. Питомий опір алюмінію в 1.6 раза більше питомого опору міді, але алюміній в 3,5 раза легше міді. Завдяки малій щільності забезпечується більша провідність на одиницю маси, тобто при однакових опорі й довжині алюмінієві дроти у два рази легше мідних, незважаючи на більший поперечний переріз. Тому для виготовлення проводів однієї й тої ж провідності при даній довжині алюміній вигідніше міді в тому випадку, якщо тонна алюмінію дорожче міді не більш ніж у два рази.

В електротехнічній промисловості використовується алюміній, що містить не більше 0,5% домішок, марки А1. Більш чистий алюміній марки АВ00 (не більше 0,03% домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів, корпусів оксидних конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти марки АВ0000 містить домішок не більше 0.004%.

Алюміній активно окисляється і покривається тонкою плівкою окису з більшим електричним опором. Ця плівка охороняє алюміній від корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів, що

унеможлиблює пайку алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію застосовують спеціальні пасти-припої або ультразвукові паяльники.

Важливе практичне значення має проблема захисту від гальванічної корозії місць контакту міді й алюмінію. Коли область контакту піддається впливу вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що струм на зовнішній поверхні контакту спрямований від алюмінію до міді, внаслідок чого алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Для усунення цього місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути ретельно захищені від зволоження.

До недоліків алюмінію слід віднести:

- низьку механічну міцність; відпалений алюміній у три рази менш міцний на розрив ніж відпалена мідь.
- питомий опір практично в 1,6 рази більше, ніж у міді;
- піддається електролітичній корозії.

Сплави алюмінію Прикладом такого сплаву є альдрей (0, 3-0,5% Mg, 0,4 – 0,7% Si, 0,2 –0,3% Fe, інше Al). Високі механічні властивості альдрей здобуває після спеціальної обробки. Альдрей має наступні характеристики:

$$\rho = 0,0317 \text{ мкОм} \cdot \text{м}; \alpha_{\rho} = 0,0036 \text{ К}^{-1}; \alpha_{l} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}; \Delta l / l = 6,5\%$$

Таким чином, альдрей, практично зберігає легкість алюмінію, близький до нього за питомою провідністю і в теж час наближається за механічною міцністю до твердотянутої міді.

У високовольтних лініях електропередачі широко застосовують сталевалюмінієві проводи, які являють собою осердя зі сталевих жил, обкручених алюмінієвим дротом. У таких проводах механічна міцність визначається головним чином сталевим осердям, а електрична провідність – алюмінієм.

4. Сплави високого опору

Ці матеріали застосовують для виготовлення електровимірювальних і електронагрівальних приладів, зразкових опорів, реостатів і т.д. При нормальних умовах величина їхнього питомого опору становить не менш $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Манганін – це мідно-нікелевий сплав, що містить в середньому 2,5 – 3,5% нікелю, 11,5 – 13,5 % марганцю, 85,0 – 89,0% міді. Питомий електричний опір манганіну при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ перебуває в межах $0,40 - 0,52 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, причому, в результаті спеціальної обробки питомий опір залишається стабільним у діапазоні температур від -100 до $+100 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт питомого електричного опору становить $(10 - 25) 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Манганін має мале значення термо-е.р.с. у парі з міддю і високу стабільність питомого опору в часі, що дозволяє використовувати його для виготовлення резисторів і електровимірювальних приладів найвищих класів точності.

Константан – це також мідно-нікелевий сплав, але з іншими співвідношеннями компонентів: нікель – 39-41%, марганець – 1-2%, мідь - 56,1 - 59,1%. Свою назву цей сплав одержав у зв'язку з тим, що його питомий електричний опір практично не залежить від температури. Значення його температурного коефіцієнта питомого електричного опору не перевищує $2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. За нагрівостійкості константан перевершує манганін, що дозволяє використовувати його в реостатах і нагрівальних приладах, які працюють при температурі до $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Константан має високе значення термо-е.р.с. у парі з міддю і залізом, ця властивість з успіхом використовується при виготовленні термопар, але виключає застосування цього сплаву в електровимірювальних приладах високого класу точності. Константан є пластичним матеріалом, у зв'язку з чим з нього можна виготовляти тонкий дріт, стрічку, фольгу. При нагріванні на поверхні константану утворюється плівка окислу, яка має електроізоляційні властивості, що дозволяє виготовляти з неї реостати без ізоляції між витками. Однак наявність у складі константану великої кількості дефіцитного нікелю обмежує його використання у виробках масового застосування.

Хромонікелеві сплави (ніхроми) – сплави на основі заліза, що містять залежно від марки 15-25% хрому, 55-78% нікелю, 1,5% марганцю. Застосовуються в основному для виготовлення електронагрівальних елементів. Питомий електричний опір при 20°C цих сплавів перебуває в межах 1,02-1,12 мкОм*м. Ніхроми мають високу технологічність, легко протягуються в тонкий дріт або стрічку. Стійкість хромонікелевих сплавів при високій температурі на повітрі пояснюється близькими значеннями температурного коефіцієнта лінійного розширення сплавів і їхніх окисних плівок. Однак при різких змінах температури може відбуватися розтріскування шару окислів і кисень, проникаючи в тріщини, додатково окислює сплав, що приводить до його перегорання. Термін служби електронагрівальних елементів, виготовлених з ніхрому, істотно підвищується при виключенні доступу кисню до поверхні дроту, наприклад, при переміщенні спирали у тверде інертне середовище типу глини-шамоту.

Серед сплавів високого опору слід також назвати жаростійкі сплави фехрالی й хромалі. Вони відносяться до системи Fe- Cr-Al і містять у своєму складі 0,7% марганцю, 0,6% нікелю, 12-15% хрому, 3, 5-5,5% алюмінію, інше - залізо. Ці сплави відрізняються високою стійкістю до хімічного руйнування поверхні під впливом різних газоподібних середовищ при високих температурах. Добрі механічні характеристики й задовільні технологічні властивості цих сплавів дозволяють виготовляти з них дріт, стрічки, прутки, які здатні зварюватися і витримувати великі механічні навантаження при високих температурах без істотних деформацій.

5. Надпровідники

Явище надпровідності було виявлено нідерландським вченим Х. Камерлінг-Оннесом в 1911 році, коли в процесі дослідження електропровідності металів при температурі скраплення гелію (4,2 К) він установив, що опір кільця із замороженої ртуті різким стрибком падає до надзвичайно малого, біля 10^{-25} Ом*м значення. Це в 10^{17} разів менше опору міді при кімнатній температурі

Речовини, що переходять у надпровідний стан називаються надпровідниками, а температура T_c , при якій речовина переходить у цей стан, - температурою надпровідного переходу.

У наш час відомо близько 35 металів, які володіють надпровідниковими властивостями при «гелієвих» температурах, і більше тисячі надпровідникових сплавів і хімічних сполук. Ряд елементів проявляє надпровідні властивості при низьких тисках, наприклад, такі напівпровідники, як кремній, германій, селенів, сурма і т.д. Разом з тим такі метали як мідь, срібло, платина, золото та інші перевести в надпровідний стан не вдалося.

Явище надпровідності відповідно до квантової теорії виникає в результаті притягання електронів один до одного. Таке притягання можливе тільки в середовищі, що містить позитивно заряджені іони, поле яких послабляє сили кулонівського відштовхування між електронами. Притягаються тільки ті електрони, які беруть участь у процесі електропровідності. У результаті такого притягання електронів з протилежними напрямками імпульсів і спінів утворюють так звані куперовські пари. Вирішальну роль в утворенні цих пар відіграє взаємодія електронів з тепловими коливаннями решітки - фононами. Обмінна фононна взаємодія й викликає сили притягання між електронами. Електрон, що рухається серед позитивно заряджених іонів, електростатичними силами притягає до себе найближчі іони. У результаті такого зсуву іонів в околиці траєкторії електрона локально зростає щільність позитивного заряду. Другий електрон, що рухається у слід за першим, може притягатися областю з надлишковим позитивним зарядом. За рахунок непрямой взаємодії з решітками між першим і другим електронами виникають сили притягання. Другий електрон стає партнером першого – утворюється куперовська пара. При абсолютному нулі всі електрони зв'язані в пари. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії відбувається розрив деякої частини електронних пар. Перехід речовини в надпровідний стан при його охолодженні відбувається в дуже вузькому діапазоні температур (соті частки градуса). Установ-

лено, що порушення надпровідності відбувається не тільки при підвищенні температури, що перевищує значення T_c , але також при виникненні на поверхні надпровідника магнітного поля з магнітною індукцією, що перевищує значення індукції переходу B_c . Причому для чистих надпровідникових металів (надпровідників першого роду) байдуже, чи створюється ця індукція струмом, що протікає по надпровіднику або зовнішнім джерелом магнітного поля. У надпровідників першого роду цей перехід відбувається стрибкоподібно, як тільки напруженість поля досягне критичного значення (рис.1.5).

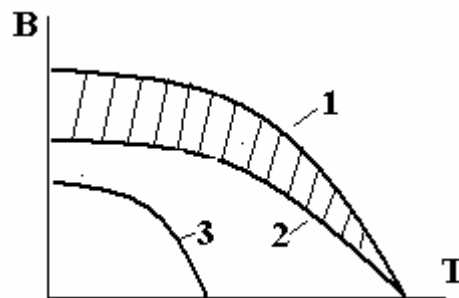


Рис.1.5 - Діаграма стану надпровідника другого (криві 1 і 2) і першого (крива 3) роду.

Надпровідники другого роду переходять з одного стану в інший поступово; для них розрізняють нижню $H_{св1}$ і верхню $H_{св2}$ критичні напруженості поля. В інтервалі між ними матеріал перебуває в проміжному гетерогенному стані, в якому співіснують нормальна й надпровідна фази. Співвідношення між їхніми обсягами залежить від напруженості поля. Надпровідниками другого роду в основному є інтерметалічні з'єднання й сплави. Із чистих металів до надпровідників другого роду можна віднести лише ніобій, ванадій і технецій.

Критична напруженість магнітного поля для надпровідників першого роду становить близько 10^5 А/м, а для надпровідників другого роду значення верхньої критичної напруженості може перевищувати 10^7 А/м.

Слід зазначити, що особливістю надпровідників є те, що магнітне поле не проникає в товщу зразка. Силкові лінії поля обгинають надпровідник. Це явище одержало назву ефекту Мейснера. Обумовлено воно тим, що в поверхневому шарі надпровідника виникає круговий незатухаючий струм, що повністю компенсує зовнішнє поле в товщині зразка. У результаті цього надпровід-

ники є ідеальними діамагнетиками з магнітною проникністю, рівною нулю. Експериментально це підтвердив В.К.Аркад'єв, продемонструвавши дослід, коли постійний магніт висів у повітрі над кільцем з надпровідного матеріалу, в якому циркулювали індуковані магнітом незатухаючі струми.

Однак розподіл речовин за їхніми надпровідними властивостями на два види не є абсолютним. Будь-який надпровідник першого роду можна перетворити в надпровідник другого роду, якщо створити в ньому достатню концентрацію дефектів кристалічних решіток. Надпровідність ніколи не спостерігається в системах, в яких існує ферро- і антиферромагнетизм. Утворенню надпровідного стану в напівпровідниках і діелектриках перешкоджає мала концентрація вільних електронів. Але в матеріалах з великою діелектричною проникністю сили кулонівського відштовхування між електронами ослаблені, тому в деяких з них може спостерігатися явище надпровідності.

У цей час надпровідники знаходять застосування для виготовлення магнітних систем, що втримують плазму в реакторах керованого термоядерного синтезу, в магнітогидродінамічних (МГД) перетворювачах теплової енергії в електричну, як індуктивні накопичувачі енергії для покриття пікових потужностей. Застосування надпровідників в електричних машинах для створення обмоток збудження дозволяє виключити з машин осердя з електротехнічної сталі. Проводяться дослідження зі створення надпровідних ліній електропередачі на постійному й змінному струмах. Перспективним є створення надшвидкісного транспорту на магнітній подушці.

1.6. Кріопровідники

Це матеріали, які при глибокому охолодженні (нижче $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$) здобувають високу електричну провідність, але не переходять у надпровідний стан. Пояснюється це тим, що при низькій температурі питомий опір провідника визначається, як правило, наявністю домішок і дефектами кристалічних ґрат.

Застосування кріопровідників замість надпровідників в електротехнічних пристроях має такі переваги:

використання як холодоагента рідкого водню або рідкого азоту замість рідкого гелію спрощує конструкцію теплової ізоляції, зменшує витрату потужності на охолодження і відповідно знижує вартість установки;

усувається небезпека раптового звільнення великої кількості енергії, що має місце в надпровідниках, тому що при підвищенні температури відбувається плавне збільшення опору. При випадковому порушенні надпровідності звільняється енергія магнітного поля, величина якої дорівнює $L I^2/2$ Дж.

Як кріопровідники практичний інтерес представляють при температурі рідкого водню алюміній, а при температурі рідкого азоту - берилій. Проблема полягає в тому, що алюміній досить дешевий матеріал, але рідкий водень вибухонебезпечний. Берилій дорогий і дефіцитний матеріал, але як холодоагент можна використовувати дешевий рідкий азот.

Для одержання кріопровідників потрібна винятково висока чистота металу й відсутність наклепу (відпалений стан).

Література [1, с. 186-229].

Контрольні питання:

1. Наведіть класифікацію провідникових матеріалів.
2. Перелічіть основні характеристики провідникових матеріалів.
3. Укажіть, які вимоги ставляться до провідникових матеріалів.
4. Перелічіть основні марки міді й алюмінію.
5. Назвіть умови, при яких у матеріалах може спостерігатися явище надпровідності.
6. Перелічіть сплави, що володіють високим питомим опором.
7. Укажіть умови виникнення термо е.р.с.
8. Укажіть, які достоїнства й недоліки має алюміній у порівнянні з міддю як провідниковий матеріал.
9. Перелічіть сплави міді й області їх застосування.
10. Перелічіть сплави алюмінію й області їх застосування.
11. Назвіть матеріали, які застосовуються в якості кріопровідників.

РОЗДІЛ III. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

- 1 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ
- 2 ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД
- 3 ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА В НАПІВПРОВІДНИКАХ
- 4 ФОТОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ
- 5 ЕФЕКТ ХОЛЛА
- 6 ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙ НА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ
- 7 ПРОСТІ НАПІВПРОВІДНИКИ
- 8 БІНАРНІ З'ЄДНАННЯ

До напівпровідників належить велика група речовин з електронною електропровідністю, що за своєю питомою провідністю займає проміжне місце між провідниками й діелектриками. При кімнатній температурі питомий опір напівпровідникових матеріалів перебуває в межах 10^{-6} – 10^9 Ом*см. Відмінною рисою напівпровідників є їхня здатність змінювати свої властивості під впливом зовнішніх факторів (температури, електричних і магнітних полів і т.д.). Крім того, властивості напівпровідників істотно залежать від різного роду домішок, що існують в речовині. При нагріванні напівпровідників у досить широкому діапазоні температур спостерігається зменшення опору, тобто ці речовини на відміну від металів мають негативний температурний коефіцієнт опору.

Електричний струм у напівпровідниках, як і в металах, обумовлений дрейфом носіїв заряду. Однак на відміну від металів поява носіїв зарядів у напівпровідниках залежить від ряду зовнішніх факторів, у першу чергу від температури й хімічної чистоти матеріалу. Залежно від ступеня чистоти напівпровідники розділяють на власні й домішкові.

Власний – це такий напівпровідник, в якому при даній температурі можна знехтувати впливом домішок. Відповідно до зонної теорії напівпровідник при температурі абсолютного нуля можна розглядати як ідеальний діелект-

рик, у якого валентна зона повністю заповнена, а зона провідності вільна. Процес електропровідності повністю відсутній у зв'язку з наявністю забороненої зони. При підвищенні температури зростає ймовірність того, що деякі електрони зможуть подолати потенційний бар'єр і перейти в зону провідності. Кожний перехід електрона в зону провідності супроводжується утворенням дірки у валентній зоні. Наявність дірок у валентній зоні дозволяє електронам брати участь у процесі електропровідності в результаті переходів на більш високі енергетичні рівні. Такі переходи можна подати як рух дірок, що мають позитивний заряд і деяку ефективну масу. Одночасно з генерацією в напівпровіднику протікає процес рекомбінації, тобто повернення електрона у валентну зону й зникнення пари носіїв заряду. У результаті цих процесів у напівпровіднику встановлюється рівноважна концентрація електронів n_0 і дірок p_0 при будь-якій температурі. У власних напівпровідниках рівноважні концентрації електронів n_i і дірок p_i рівні між собою:

$$n_i = p_i, \quad n_i + p_i = 2n_i$$

Домішковим називають напівпровідник, електрофізичні властивості якого визначаються в основному домішками. Як правило, домішки створюють додаткові рівні в забороненій зоні.

Коли домішкові атоми перебувають у вузлах кристалічних решіток, вони називаються домішками заміщення, а якщо в міжвузловому просторі - домішками впровадження.

Домішки можуть поставляти електрони в зону провідності напівпровідника або приймати їх з рівнів валентної зони. Коли домішкові рівні розташовані в забороненій зоні поблизу нижнього краю зони провідності, то під впливом зовнішніх факторів електрони з домішкових рівнів можуть переходити у вільну зону й брати участь у процесі електропровідності. При цьому витрачається значно менше енергії, ніж необхідно для іонізації власних атомів напівпровідника.

Домішки, які поставляють електрони в зону провідності напівпровідника, називаються донорами. У таких матеріалах концентрація електронів перевищує концентрацію дірок, тому вони називаються **напівпровідниками n-типу**.

У ряді випадків введення домішок створює незаповнені рівні в забороненій зоні поблизу верхньої межі валентної зони. Електрони можуть із валентної зони під дією теплової енергії перейти на вільні домішкові рівні, але участі в процесі електропровідності вони не беруть у зв'язку з роз'єднаністю атомів домішок. Концентрація дірок у таких напівпровідниках вище концентрації електронів, тому вони називаються **напівпровідниками p-типу**. Домішки, які захоплюють електрони з валентної зони, одержали назву акцепторів.

У напівпровідниках можуть одночасно перебувати як донорна, так і акцепторна домішки. Такі напівпровідники називають компенсованими.

3.1 Електропровідність напівпровідників.

Під дією електричного поля з напруженістю \vec{E} вільні носії зарядів, що перебувають у напівпровіднику, здобувають спрямований рух. У власному напівпровіднику носіями зарядів є вільні електрони й дірки, концентрації яких однакові.

Щільність електронної складової струму, що протікає в напівпровіднику під впливом зовнішнього електричного поля визначається за формулою

$$j = qn v_n \quad (3.1)$$

де q – заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

n – концентрація електронів у зоні провідності, м^{-3} ;

v_n - середня швидкість упорядкованого руху електронів (дрейфова швидкість).

Швидкість дрейфу v_n пропорційна напруженості поля

$$v_n = \mu E \quad (3.2)$$

де μ - коефіцієнт пропорційності, який називають рухливістю носія заряду, $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

З урахуванням (3.1) рівняння (3.2) можна представити у вигляді

$$j = E\sigma = \frac{E}{\rho_n} \quad (3.3)$$

де $\sigma = qn\mu_n$ - питома електрична провідність напівпровідника, обумовлена електронами, См/м;

$\rho = 1/\sigma$ - питомий електричний опір, Ом*м.

Аналогічно визначаємо складову щільності струму, обумовлену дірковою електропровідністю:

$$j_p = q\rho\mu_p \cdot E \quad (3.4)$$

де ρ – концентрація дірок валентної зони, (м⁻³);

μ_p - рухливість дірок, м²/В*с.

Питома електрична провідність напівпровідника, обумовлена дірками:

$$\sigma_p = q\rho\mu_p \quad (3.5)$$

Сумарна щільність струму через власний напівпровідник

$$j = j_n + j_p = (qn\mu_n + q\rho\mu_p)E \quad (3.6)$$

Питома електрична провідність власного напівпровідника визначається за формулою

$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + q\rho\mu_p = qn_i(\mu_n + \mu_p) \quad (3.7)$$

Провідність у домішкових напівпровідниках при кімнатній температурі визначається вільними носіями заряду, електронами й дірками:

$$\sigma_n = qn_n\mu_n, \quad \sigma_p = q\rho_p\mu_p \quad (3.8)$$

де n_n і ρ_p концентрація основних носіїв заряду електронів і дірок відповідно. У зв'язку з тим, що концентрація вільних носіїв заряду має експонентну залежність від температури, а їхня рухливість - степеневу, то питома провідність напівпровідників також залежить від температури. Для власного напівпровідника запишемо

$$\sigma_i = \sigma_o e^{-\Delta E/(kT)} \quad (3.9)$$

де ΔE - ширина забороненої зони;

k – постійна Больцмана;

T - абсолютна температура;

σ_o - множник, що не залежить від температури й виражає провідність, коли всі валентні електрони перейшли в зону провідності.

Прологарифмувавши вираз (3.9) одержимо

$$\ln \sigma = \ln \sigma_o - \frac{\Delta E}{k} \frac{1}{T} \quad (3.10)$$

Тангенс кута нахилу a дає величину $\Delta E/k$, звідки встановлюємо значення ΔE для напівпровідника.

Для домішкових напівпровідників електропровідність

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\Delta E/(kT)} + \sigma_2 e^{-\Delta E_\alpha/(kT)} \quad (3.11)$$

де ΔE_α - енергія іонізації домішок.

На рис.3.1 показана температурна залежність електропровідності для напівпровідників з різною концентрацією домішки.

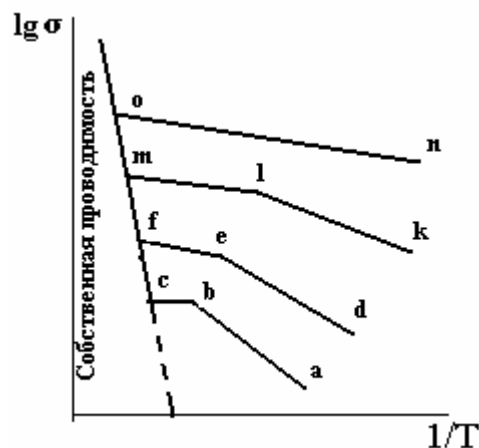


Рис.3.1 - Залежність електропровідності від температури для напівпровідника з різною концентрацією домішок.

При підвищенні температур спостерігається зростання питомої провідності, що пояснюється збільшенням концентрації вільних носіїв заряду в результаті іонізації домішки (ділянки ab, de, kl). Зі збільшенням концентрації домішки енергія іонізації зменшується і відповідно зменшується нахил кривих до осі абсцис. При подальшому підвищенні температури настає виснаження домішки - повна її іонізація. У цих умовах концентрація вільних носіїв практично від температури не залежить, і температурна залежність питомої провід-

ності напівпровідника визначається залежністю рухливості носіїв заряду від температури. Різке збільшення питомої провідності при подальшому підвищенні температури відповідає області власної електропровідності.

Напівпровідники, застосовувані на практиці, можуть мати кілька видів домішок з різною енергією іонізації, тому температурні залежності їхньої електропровідності будуть дещо відрізнятися від наведених на рис.3 1.

У сильних електричних полях у напівпровідниках спостерігається порушення лінійної залежності закону Ома. Мінімальна величина напруженості електричного поля, починаючи з якої, не виконується лінійна залежність струму від напруги, називається критичною. Величина критичної напруженості залежить від природи напівпровідника, концентрації домішок і температури навколишнього середовища.

У зв'язку з тим, що питома провідність залежить від концентрації вільних носіїв заряду і їхньої рухливості, то як тільки одна із цих величин почне залежати від напруженості поля, лінійна залежність у законі Ома порушиться.

Особливістю напівпровідників є залежність рухливості носіїв зарядів від напруженості поля, причому вона може як збільшуватися, так і зменшуватися залежно від температури навколишнього середовища.

Під впливом сильного електричного поля концентрація вільних носіїв заряду в напівпровіднику збільшується. Розрізняють кілька механізмів підвищення концентрації вільних носіїв заряду в напівпровіднику під дією зовнішнього електричного поля - електростатичний, термоелектронний і за рахунок ударної іонізації.

У сильному електричному полі можливий перехід електрона з валентної зони й домішкових рівнів у зону провідності без зміни енергії шляхом так званого *тунельного просочування* електрона через заборонену зону. Такий механізм збільшення концентрації вільних носіїв під дією сильного електричного поля називається електростатичною іонізацією. Виникає вона при напруженостях поля порядку 10^8 В/м.

Коли вільний електрон під дією зовнішнього електричного поля отримує енергію, достатню для переходу електрона з валентної зони в зону провідності, може виникнути *ударна іонізація*. На рис.3.2 наведена залежність питомої провідності від напруженості поля.

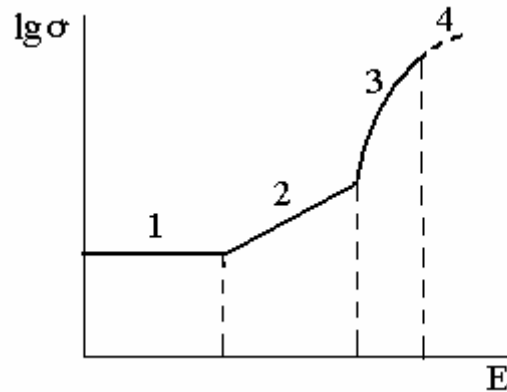


Рис.3.2 - Залежність провідності напівпровідника від напруженості зовнішнього електричного поля

На ділянці 1 виконується лінійна залежність закону Ома, на ділянці 2 має місце термоелектронна іонізація, на ділянці 3 може виникати електростатична й ударна іонізації, а на ділянці 4 виникає пробій напівпровідника.

3.2 Електронно - дірковий перехід (p-n перехід)

Електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має електропровідність p - типу, а інша - n-типу, називають *електронно-дірковим переходом або p-n - переходом*. Такі переходи одержують шляхом введення в напівпровідник донорної і акцепторної домішок таким чином, щоб одна частина напівпровідника володіла електронною, а інша - дірковою електропровідністю. Створити електронно-дірковий перехід механічним з'єднанням двох напівпровідників з різними типами електропровідності неможливо.

Допустимо, що n- і p-напівпровідники стикаються один з одним (рис. 3.3).

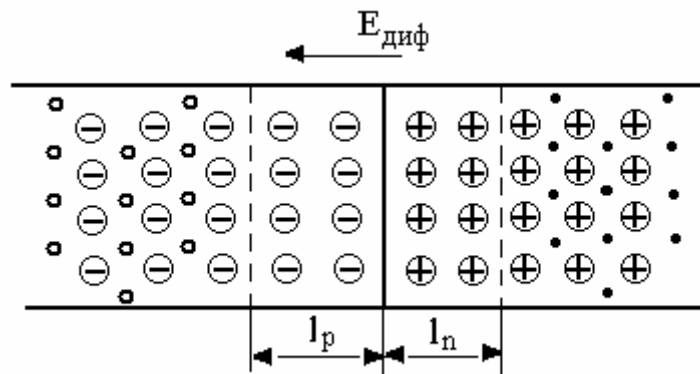


Рис.3.3 - Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника при відсутності зовнішнього електричного поля.

Оскільки в n-напівпровіднику міститься велика кількість електронів, а в p-напівпровіднику – дірок, то між ними почнеться обмін носіями зарядів. У результаті цього в приконтактній області напівпровідника n-типу утворюється некомпенсований позитивний заряд іонів донорної домішки, а в напівпровіднику p – типу виникає негативний заряд іонів акцепторної домішки. Область розподілу напівпровідників n- і p- типу виявиться збідненою вільними носіями заряду й, незважаючи на малу ширину ($h \approx 10^{-6} - 10^{-8} \text{ м}$), буде володіти більшим опором, який значно перевищує опір іншої частини напівпровідників. Наявність негативного і позитивного об'ємного зарядів приводить до утворення електричного поля, що перешкоджає подальшому дифузійному потоку носіїв заряду.

Якщо до p-області прикласти позитивний полюс джерела живлення, а до n-області - негативний, то зовнішнє електричне поле буде спрямоване зустрічно електричному полю, обумовленому об'ємними зарядами (рис. 3.4).

Основні носії заряду в p- і n- напівпровідниках, які мають найбільшу енергію, одержують можливість проникнути через збіднений шар в області, де вони рекомбінуються. При такій полярності зовнішньої напруги електронно-дірковий перехід буде «відкритий» і через нього протікатиме прямий струм.

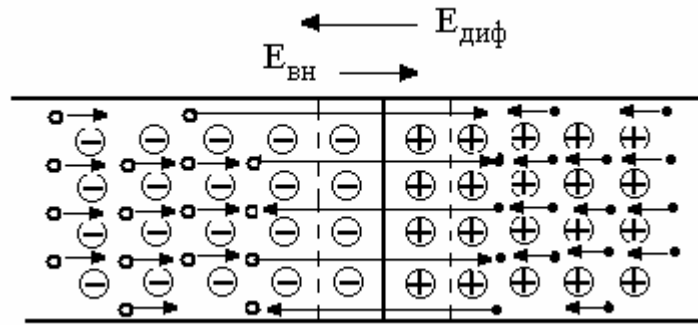


Рис.3.4 - Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника, коли зовнішнє електричне поле спрямоване зустрічно дифузійному.

При зміні полярності зовнішньої напруги електричне поле об'ємних зарядів і зовнішнє поле будуть збігатися за напрямком. У результаті дії сумарного електричного поля основні носії починають рухатися від переходу й перетнути перехід зможуть тільки неосновні носії (рис.3.5).

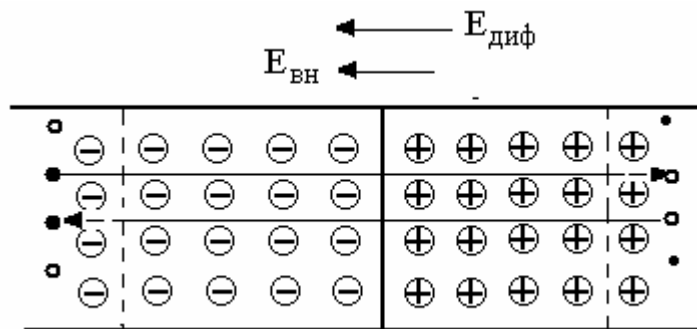


Рис. 3.5 - Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника, коли зовнішнє електричне поле збігається за напрямком з дифузійним.

Оскільки кількість неосновних носіїв у багато разів менше основних, то й струм, викликаний ними, буде менше, ніж струм, що з'являється при прямому включенні. При такому включенні електронно-дірковий перехід «закритий» і через нього протікає тільки малий зворотний струм неосновних носіїв заряду.

Вольт - амперна характеристика р-п переходу наведена на рис. 3.6. Для опису цієї залежності використовується вираз

$$I = I_S (e^{qU/kT} - 1) \quad (3.12)$$

де I_s - струм насичення (при зворотному включенні р-n переходу цей струм дорівнює зворотному струму); U – прикладена напруга; $q/k \approx 40 \text{ В}^{-1}$ при кімнатній температурі.

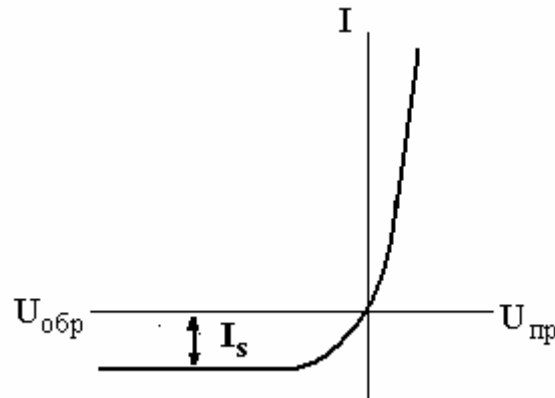


Рис.3.6- Вольт - амперна характеристика р-n переходу.

3.3 Термоелектричні явища в напівпровідниках

Серед термоелектричних явищ, що мають місце в напівпровідниках, слід виділити ефекти Зеєбека, Пельт'є і Томпсона.

Ефект Зеєбека полягає в тому, що в електричному колі, яке складається з послідовно з'єднаних різнорідних напівпровідників або напівпровідника й металу, виникає е.р.с., якщо між кінцями цих матеріалів існує різниця температур. Величину цієї е.р.с. можна визначити за формулою

$$U = \alpha(T_2 - T_1) \quad (3.13)$$

де α - коефіцієнт термо-е.р.с., що визначається матеріалами ділянок ланцюга; T_1 і T_2 – відповідно температури першого й другого спаїв.

У напівпровіднику, де основними носіями є електрони, потік їх від гарячого кінця до холодного буде більше, ніж від холодного до гарячого. У результаті цього на холодному кінці буде накопичуватися негативний заряд, а на гарячому - залишатися некомпенсований позитивний заряд. Електричне поле, яке виникне викличе потік електронів від холодного кінця до гарячого. Стационарний стан установиться при рівній кількості електронів на кінцях напівпровідника.

У напівпровіднику, де основними носіями заряду є дірки, позитивний потенціал виникає на холодному кінці. Таким чином, за знаком термо-е.р.с. можна судити про тип електропровідності.

Ефект Пельт'є полягає в тому, що при проходженні струму через контакт двох різнорідних напівпровідників або напівпровідника й металу відбувається поглинання або виділення теплоти залежно від напрямку струму. Кількість поглиненої теплоти, або тієї, яка виділяється в контакті, пропорційна значенню струму I , що протікає:

$$Q_{\Pi} = \Pi * I * t \quad (3.14)$$

де Q_{Π} – теплота Пельт'є; t – час проходження струму; Π – коефіцієнт Пельт'є, що залежить від природи матеріалів які контактують, температури й напрямку струму.

Ефект Томпсона полягає у виділенні або поглинанні теплоти при проходженні струму в однорідному матеріалі, в якому існує градієнт температур. Наявність градієнта температур у напівпровіднику приводить до утворення термо-е.р.с. Якщо напрямок зовнішнього електричного поля буде збігатися з електричним полем, що викликане термо-е.р.с., то не вся енергія підтримуюча струм, забезпечується зовнішнім джерелом, частина роботи відбувається за рахунок теплової енергії самого напівпровідника. У результаті цього він охолоджується.

При зміні напрямку зовнішнього електричного поля воно виконуватиме додаткову роботу, що приведе до виділення теплоти додатково до теплоти Джоуля.

Теплота Томпсона Q_T дорівнює

$$Q_T = \tau(T_2 - T_1)t * I \quad (3.15)$$

де τ - коефіцієнт Томпсона.

3.4 Фотопровідність напівпровідників

Під впливом падаючого на напівпровідник світла електрони одержують додаткову енергію. При цьому величина енергії, яка передається кожному електрону, залежить від частоти світлових коливань і не залежить від сили світла джерела випромінювання. Зі збільшенням сили світла джерела випромінювання збільшується число електронів, які поглинають енергію, але не енергія, одержувана кожним з них. Енергія фотона визначається виразом

$$E_{\phi} = h\nu = 1,23 / \lambda \quad (3.16)$$

де h – постійна Планка;

ν - частота світлових коливань;

λ - довжина хвилі падаючого світла.

Фотопровідність напівпровідника визначається як різниця питомої електропровідності при освітленні й у темряві:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{CB} - \sigma_T \quad (3.17)$$

Темнова електропровідність визначається за формулою

$$\sigma_T = q * n * \mu_n \quad (3.18)$$

Електропровідність, що виникає в напівпровіднику при впливі на нього світлового випромінювання, запишемо у вигляді

$$\sigma_{CB} = q(n + \Delta n)\mu_n \quad (3.19)$$

де Δn - додаткове число електронів, які утворилися в напівпровіднику внаслідок його опромінення.

Таким чином, фотопровідність буде дорівнювати

$$\sigma_{\phi} = q * \Delta n * \mu_n \quad (3.20)$$

Електрони, які з'явилися під впливом випромінювання, перебувають у зоні провідності короткий час ($10^{-3} - 10^{-7}$ с). При відсутності зовнішнього електричного поля вони хаотично переміщуються в міжатомних проміжках. Під впливом поля ці електрони беруть участь в електропровідності.

При завершенні освітлення напівпровідника електрони переходять на більше низькі енергетичні рівні – домішкові або у валентну зону. Безперервне освіт-

лення супроводжується встановленням динамічної рівноваги між процесами утворення додаткових носіїв заряду і їхньої рекомбінації.

Зі зменшенням температури *фотопровідність* збільшується у зв'язку зі зменшенням концентрації теплових носіїв заряду й зменшенням імовірності рекомбінації носіїв заряду напівпровідника, що утворюються в результаті освітлення.

3.5 Ефект Холла

Цей ефект належить до гальваноманітних ефектів, тобто до тих фізичних явищ, які виникають у напівпровіднику при одночасному впливі на нього електричного й магнітного полів. Якщо напівпровідник, уздовж якого тече електричний струм, помістити в магнітне поле, перпендикулярне до напрямку струму, то в напівпровіднику виникне поперечне електричне поле, перпендикулярне до струму й магнітного поля. Це явище одержало назву ефекту Холла, а виникаюча поперечна е.р.с. - е.р.с. Холла (рис.3.8).

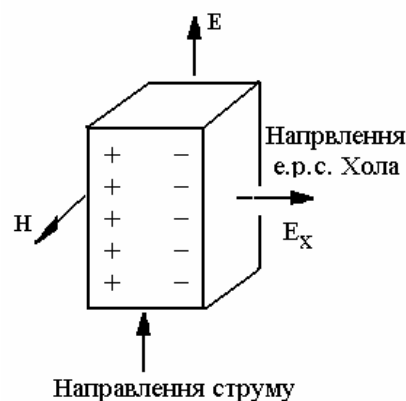


Рис.3.7 - Виникнення ефекту Холла в напівпровідниках

Поява е.р.с. Холла обумовлена тим, що на носії заряду, які рухаються зі швидкістю v , у магнітному полі з індукцією \mathbf{B} , діє сила Лоренца, що відхиляє їх до однієї з бічних граней пластини.

Для напівпровідника n-типу умову рівноваги діючої на електрон сили в скалярній формі запишемо у вигляді

$$q * v_n * B = q * E_x \quad (3.21)$$

де v_n - середня швидкість спрямованого руху електрона;

B - магнітна індукція в зразку;

E_x – напруженість поперечного електричного поля, яке виникнуло.

Вважаючи поперечне електричне поле однорідним, одержимо

$$E_x \cdot a = U_x \quad (3.22)$$

де a – ширина пластини; U_x – е.р.с. Хола.

Щільність струму, що протікає в зразку під дією зовнішнього електричного поля, дорівнює

$$j = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = q \cdot n \cdot v_n \quad (3.23)$$

Використовуючи (3.23), з (3.21) одержимо

$$E_x = j \cdot B / (q \cdot n) = R_x \cdot j \cdot B \quad (3.24)$$

де $R_x = 1 / (q \cdot n)$ – називається коефіцієнтом Холла.

У напівпровіднику n-типу е.р.с. Холла визначається за формулою

$$U_x = -R_x \cdot \frac{I \cdot B}{b} \quad (3.25)$$

де b – товщина пластини.

Знак мінус вказує на те, що носіями заряду в даному напівпровіднику є електрони. Для напівпровідників p - типу вираз має аналогічний вигляд, тільки е.р.с. Холла буде позитивною. Ця обставина використовується для визначення типу електропровідності в напівпровіднику.

Рівняння (3.25) справедливо тільки для вироджених напівпровідників, коли можна не враховувати розподіл носіїв заряду за швидкостями. Більш точне вираження R_x буде відрізнятися від наявного у рівнянні (3.25) множником A . Для різних напівпровідників чисельне значення A змінюється залежно від механізму розсіювання при різних температурах від 1 до 2.

Вимірявши е.р.с. Холла в деякому діапазоні температур, можна одержати експериментальні дані для побудови залежності концентрації носіїв заряду від температури, за якою визначити енергію іонізації донорів або акцепторів.

3.6 Вплив деформацій на провідність напівпровідників

Провідність твердого кристалічного тіла змінюється при впливі на нього різного виду деформацій у зв'язку зі зміною міжатомних відстаней і зміни концентрації і рухливості носіїв заряду.

Концентрація змінюється внаслідок зміни ширини енергетичних зон напівпровідника й зсуву домішкових рівнів, що приводить, у свою чергу, до зміни енергії активації носіїв заряду й, отже, до зменшення або збільшення концентрації.

Рухливість змінюється через збільшення або зменшення амплітуди коливань атомів при їхньому зближенні або віддаленні.

Величиною, що чисельно характеризує зміну питомої провідності напівпровідника при певному виді деформації, є тензочутливість

$$d_p = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} \quad (3.26)$$

яка є відношенням відносної зміни питомого опору до відносної деформації в даному напрямку.

3.7 Прості напівпровідники

Одним з найбільш вивчених напівпровідникових матеріалів є *германій*, існування якого передбачив Д.І. Менделєєв у 1870 році.

Чистий германій має металевий блиск, характеризується високою твердістю і крихкістю. Температура його плавлення становить 937 °С, щільність при температурі 25°С складає 5,33. У твердому стані германій є типовим ковалентним кристалом.

Кристалічний германій хімічно стійкий на повітрі при кімнатній температурі. Роздрібнений у порошок при нагріванні на повітрі до температури ≈ 700 °С він легко утворює діоксид германію GeO_2 . Германій слабо розчинний у воді й практично не розчинний в соляній і розведеної сірчаній кислоті. Активним розчинником германію в нормальних умовах є суміш азотної й плавико-

вої кислот і розчин перекису водню. При нагріванні германій інтенсивно взаємодіє з галогенами, сіркою і сірчанокислими з'єднаннями.

Германій, який застосовується у напівпровідникових приладах, має питомий опір від мільйонних часток $\text{Ом}\cdot\text{м}$ до значень, близьких до питомого опору власного германію. На електричні властивості германію сильний вплив робить режим термообробки. Якщо зразок германію n-типу нагріти до температури порядку 550°C , а потім різко остудити, то відбудеться зміна типу електропровідності. Аналогічна термообробка германію p-типу приводить до зменшення питомого опору, без зміни типу електропровідності. Відпал загартованих зразків при температурі $500\text{-}550^\circ\text{C}$ відновлює не тільки тип електропровідності, але й первісний питомий опір. При розплавленні германія його питомий опір стає близьким до питомого опору рідких металів.

Застосовують германій для виготовлення діодів, датчиків Холу, тензодатчиків, фото діодів, модуляторів світла, оптичних фільтрів і т.д.

Кремній є одним з найпоширеніших матеріалів у земній корі (близько 29%). Але у вільному стані в природі він не зустрічається, а є присутнім тільки в з'єднаннях у вигляді окисла й у солях кремнієвих кислот. **Технічний кремній**, який одержують шляхом відновлення природного діоксиду SiO_2 (кремнезем) в електричній дузі між графітовими електродами, містить близько 1 % домішок і як напівпровідник використовуватися не може. Він є вихідною сировиною для одержання кремнію напівпровідникової чистоти, в якому вміст домішок не повинне перевищувати $10^{-6}\%$.

Об'ємні кристали кремнію одержують шляхом вирощування з розплаву й при безтигельній вертикальній зонній плавці. Перший метод застосовують для одержання великих монокристалів з відносно невеликим питомим опором ($< 2.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Другий метод використовують для одержання високоомних монокристалів кремнію з малим вмістом залишкових домішок. Кристали кремнію n- і p-типу одержують шляхом введення при вирощуванні відповідних домішок, серед яких найбільш часто використовують фосфор і бор.

Питомий опір кремнію змінюється в широких межах залежно від концентрації в ньому домішок. Завдяки більш широкій забороненій зоні власний питомий опір кремнію більш ніж на три порядки перевершує власний питомий опір германію. При плавленні кремнію трохи збільшується його густина (на 8%) і стрибкоподібно зменшується питомий опір (в 30 разів). У розплавленому стані кремній має питомий опір порядку 10^{-4} Ом*м і поводить себе подібно до рідких металів.

У наш час *кремній* є базовим матеріалом напівпровідникової техніки. Він використовується для створення інтегральних мікросхем, різного типу діодів, польових транзисторів, стабілітронів, тиристорів, фотоелементів сонячних батарей і т.д.

Карбід кремнію є єдиним бінарним з'єднанням, утвореним напівпровідниковими елементами IV групи таблиці Менделєєва. Це напівпровідниковий матеріал з великою шириною забороненої зони (2, 8-3,1 еВ). Застосовується для виготовлення напівпровідникових приладів, що працюють при високих температурах (до 700°C).

Кристали карбіду кремнію напівпровідникової чистоти одержують методом сублімації в печах із графітовими нагрівачами й екранами. Процес кристалізації проводять в атмосфері аргону при температурі 2400-2600°C. Карбід кремнію є одним з найбільш твердих речовин, він стійкий проти окислювання до температур понад 1400°C. При кімнатній температурі карбід кремнію не реагує ні з якими кислотами.

Електропровідність кристалів карбіду кремнію при нормальній температурі домішкова. Тип електропровідності й фарбування кристалів карбіду кремнію залежать від сторонніх домішок. Чистий карбід кремнію безбарвний. Домішки V групи (N, P, As, Sb, Bi) і заліза дають зелене фарбування і електропровідність n-типу, а елементи II групи (Ca, Mg) і III групи (B, Al, Ga, In) - блакитне й фіолетове фарбування і електропровідність p-типа. Надлишок Si приводить до електронної електропровідності Si, а надлишок C - до діркової.

Застосовується *карбід кремнію* для виготовлення варисторів, світлодіодів, високотемпературних діодів, транзисторів, терморезисторів, лічильників частот високої енергії здатних працювати в хімічно агресивних середовищах.

3.8 Бінарні з'єднання

Серед бінарних з'єднань практичне застосування одержали з'єднання $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$.

Напівпровідникові з'єднання $A^{III}B^V$ утворюються в результаті взаємодії елементів III-б підгрупи періодичної таблиці (бору, алюмінію, галію, індію) з елементами V-б підгрупи (азотом, фосфором, миш'яком, сурмою). З'єднання $A^{III}B^V$ прийнято класифікувати за металоїдним елементом. Відповідно розрізняють *нітриди, фосфіди, арсеніди й антимоніди*. Одержують ці з'єднання або з розплаву, що містить елементи в рівних атомних концентраціях або з розчину з'єднання, що має в надлишку елементи III групи, а також з газової фази.

Кристали антимонідів, арсенідів галію та індію, як правило, вирощують з розплаву витягуванням на запал з-під інертного газу. Шар рідкого флюсу, що перебуває під тиском інертного газу, забезпечує повну герметизацію тигля й придушує випар летучих компонентів з розплаву. Однак монокристали, отримані з розплаву, мають недостатню високу хімічну чистоту й потребують додаткового очищення.

Особливе положення серед з'єднань $A^{III}B^V$ займає *арсенід галію*. Більша ширина забороненої зони, висока рухливість електронів дозволяють створювати на його основі прилади, які працюють на високих частотах і при високих температурах. Він використовується для виготовлення світлодіодів, тунельних діодів, діодів Ганна, сонячних батарей і т.д.

Антимонід індію має дуже малу ширину забороненої зони й дуже високу рухливість електронів. Застосовується для виготовлення детекторів в інфрачервоній області спектра, датчиків Холла, термоелектричних генераторів, тензометрів і т.д.

Фосфід галію, що має велику ширину забороненої зони, широко застосовується для виготовлення світлодіодів.

Антимонід галію відрізняється від інших з'єднань групи $A^{III}B^V$ високою чутливістю до механічних напружень. Так, при впливі на зразок тиску його питомий опір збільшується у два рази. Завдяки високій чутливості до механічних деформацій антимонід галію використовується для виготовлення тензометрів.

До напівпровідникових з'єднань $A^{II}B^{VI}$ відносять *халькогеніди цинку, кадмію, ртуті*. Широкозонні напівпровідники $A^{II}B^{VI}$ мають високу температуру плавлення й високий тиск дисоціації в точці плавлення. Застосовують їх для виготовлення люмінофорів, фоторезисторів, датчиків Холла, приймачів інфрачервоного випромінювання.

Література [1.с. 231-267]

Контрольні запитання

1. Пояснити, які матеріали називаються напівпровідниковими.
2. Перелічіть основні властивості напівпровідникових матеріалів.
3. Укажіть, які енергетичні зони існують у напівпровідникових матеріалах.
4. Поясніть, що таке власний, домішковий і компенсований напівпровідник.
5. Перелічіть носії заряду, які забезпечують електропровідність напівпровідників.
6. Перелічіть зовнішні фактори, які впливають на електропровідність напівпровідників.
7. Поясніть причини виникнення термоелектричних явищ у напівпровідниках.
8. Поясніть методику визначення типу провідності в напівпровідниках.
9. Поясніть у чому полягає ефект Холла і при яких умовах він виникає.
10. Перелічіть особливості режимів роботи p-n переходу.
11. Перелічіть, які матеріали застосовуються для виготовлення світлодіодів.
12. Перелічіть основні технологічні операції, які застосовуються у виробництві напівпровідників.
13. Поясніть, у чому полягає ефект Томпсона.
14. Опишіть процес фотопровідності в напівпровідниках.
15. Поясніть, у чому полягає ефект Пельт'є.

РОЗДІЛ IV. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

1. Класифікація речовин за магнітними властивостями
2. Феромагнетики. Процеси при намагнічуванні феромагнетиків
3. Магнітні втрати
4. Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків
5. Магнітом'які й магнітотверді матеріали

Кожна речовина при розміщенні її в магнітне поле здобуває деякий магнітний момент \mathbf{M} . Магнітний момент одиниці об'єму речовини називають *намагніченістю*:

$$\mathbf{J}_M = \mathbf{M}/V \quad (4.1)$$

При нерівномірному намагнічуванні речовини $\mathbf{J}_M = \mathbf{d} \mathbf{M} / \mathbf{d}V$.

Намагніченість є векторною величиною. В ізотропних речовинах вона спрямована паралельно або антипаралельно напруженості магнітного поля. У системі СІ намагніченість виражається в одиницях напруженості магнітного поля (А/м).

З напруженістю магнітного поля намагніченість зв'язана співвідношенням

$$\mathbf{J}_M = \mathbf{k} \mathbf{H} \quad (4.2)$$

де \mathbf{k} – безрозмірна величина, що характеризує здатність речовини намагнічуватися в магнітному полі й називається магнітною сприйнятливістю. Вона чисельно дорівнює намагніченості при одиничній напруженості поля.

Намагнічене тіло, що перебуває в зовнішньому полі, створює власне поле, яке в ізотропних матеріалах спрямоване паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. У зв'язку з цим *магнітна індукція* в речовині визначається алгебраїчною сумою індукції зовнішнього й власного полів:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_i = \mu_o \mathbf{H} + \mu_o \mathbf{J}_M \quad (4.3)$$

де $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнітна постійна в системі СІ.

Підставивши значення намагніченості в рівняння (4.3), одержимо

$$\mathbf{B} = \mu_o \mathbf{H} (1 + \mathbf{k}_M) = \mu_o \mu \mathbf{H} \quad (4.4)$$

де μ_r - відносна магнітна проникність, що показує, в скільки разів магнітна індукція поля в даному середовищі більша, ніж магнітна індукція у вакуумі.

Причиною магнітних властивостей речовини є внутрішні сховані форми руху електричних зарядів, що являють собою елементарні кругові струми, які володіють магнітними моментами. Такими струмами є електронні спіни й орбітальне обертання електронів в атомах. Магнітні моменти протонів і нейтронів у багато разів менше магнітного моменту електрона. Тому магнітні властивості речовини повністю визначаються електронами.

2.1 Класифікація речовин за магнітними властивостями

Всі речовини за реакцією на вплив зовнішнього магнітного поля можна розділити на наступні групи:

- ✓ діамагнетики,
- ✓ парамагнетики,
- ✓ феромагнетики,
- ✓ антиферомагнетики
- ✓ феримагнетики.

До *діамагнетиків* відносяться речовини, в яких магнітна сприйнятливість негативна й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнітний ефект обумовлений незначною зміною кутової швидкості орбітального обертання електронів. Якщо електронну орбіту розглядати як замкнутий контур, який не володіє активним опором, то під дією зовнішнього поля в цьому контурі змінюється сила струму й виникає додатковий магнітний момент. Відповідно до закону Ленца цей момент спрямований назустріч зовнішньому полю. У тому випадку, коли площина електронної орбіти розташована не перпендикулярно до вектора \mathbf{H} , то зовнішнє магнітне поле викликає прецесійний рух орбіти навколо напрямку \mathbf{H} . При цьому вектор орбітального магнітного моменту описує конус. Кутова швидкість прецесії визначає значення негативного магнітного моменту ΔM . *Діамагнітний ефект* має місце у всіх речовинах, але виступає на перший план у тих випадках, коли

власний момент атомів дорівнює нулю, тобто спінові магнітні моменти попарно скомпенсовані.

Чисельне значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків становить $- (10^{-6} - 10^{-7})$. Відносна магнітна проникність цих речовин незначно відрізняється від одиниці $\mu < 1$. Зовнішнім проявом діамагнітного ефекту є виштовхування цих речовин з неоднорідного магнітного поля.

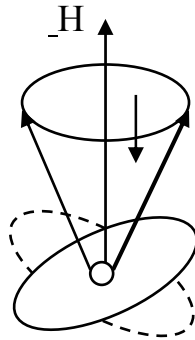


Рис.4.1- Прецесія електронних орбіт під дією магнітного поля.

До діамагнетиків належать *інертні гази, водень, азот, вода, мідь, срібло, золото, цинк, ртуть і т.д.* Діамагнетиками є також *речовини в надпровідному стані.*

До **парамагнетиків** відносяться речовини з позитивною магнітною сприйнятливістю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках атоми мають елементарні магнітні моменти навіть при відсутності зовнішнього магнітного поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, в результаті чого намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле викликає переважну орієнтацію магнітних моментів атомів в одному напрямку, але тепла енергія протидіє створенню магнітної впорядкованості. У зв'язку з цим парамагнітна сприйнятливість сильно залежить від температури. При нормальній температурі магнітна сприйнятливість парамагнетиків дорівнює $10^{-3} - 10^{-6}$. Тому їхня магнітна проникність незначно відрізняється від одиниці ($\mu > 1$). Завдяки по-

зитивній намагніченості парамагнетики, вміщені в неоднорідне магнітне поле, втягуються в нього.

Парамагнетиками є кисень, лужні й луго-земельні метали, солі заліза, кобальту, нікелю і т.д.

До **ферромагнетиків** відносяться речовини з великою позитивною магнітною сприйнятливістю (до 10^6), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Для ферромагнетиків характерна внутрішня магнітна впорядкованість, що полягає в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів. Ці речовини здатні намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

Антиферромагнетиками є речовини, в яких нижче деякої температури виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічних решіток. Вони характеризуються незначною позитивною магнітною сприйнятливістю ($10^{-3} - 10^{-5}$), що дуже залежить від температури. При нагріванні антиферромагнетик випробовує фазовий перехід у парамагнітний стан. Температура такого переходу, при якій зникає магнітна впорядкованість, називається точкою Нееля або *антиферромагнітною точкою Кюрі*.

Усього відомо близько тисячі з'єднань з властивостями антиферромагнетиків. Представниками *антиферромагнетиків* є *хром, марганець, германій і т.д.*

До **феримагнетиків** відносяться речовини, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферромагнетизмом. Як і ферромагнетики, вони мають високу магнітну сприйнятливість, що істотно залежить від напруженості магнітного поля й температури.

До феримагнетиків відносяться різні оксидні з'єднання, серед яких найбільший практичний інтерес мають *ферити*.

Діа-, пара- і антиферромагнетики можна об'єднати в групу слабкомагнітних речовин. Феро- і феримагнетики є сильномагнітними речовинами.

2.2 Феромагнетики. Процеси при намагнічуванні феромагнетиків

У монокристалах феромагнітних речовин існують напрямки легкого й важкого намагнічування. Число таких напрямків визначається симетрією кристалічних решіток. У відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів мимовільно орієнтуються уздовж однієї з осей легкого намагнічування.

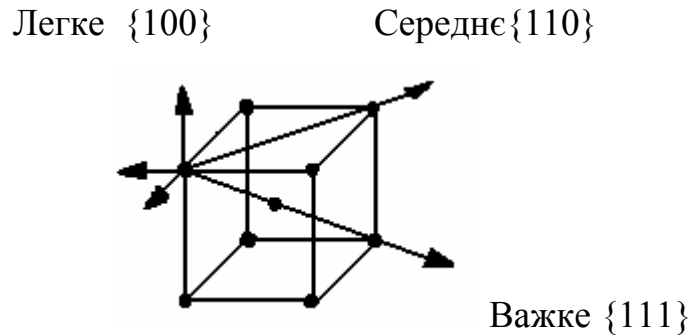


Рис.4.2 - Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалі заліза

Елементарна комірка заліза являє собою об'ємноцентрований куб. Напрямок легкого намагнічування збігається з ребром куба. Отже у монокристалі заліза можна виділити шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування. Для намагнічування монокристалічного зразка до насичення уздовж однієї з осей легкого намагнічування треба затратити значно меншу енергію, ніж для такого ж намагнічування уздовж осі важкого намагнічування.

Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають *кривою намагнічування* (рис. 4.3). Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

Початковій ділянці кривої (область 1) відповідає оборотне (пружне) зміщення границь доменів. При цьому відбувається збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля і зменшення розмірів доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. Після зняття слабкого поля границі доменні повертаються в колишнє положення.

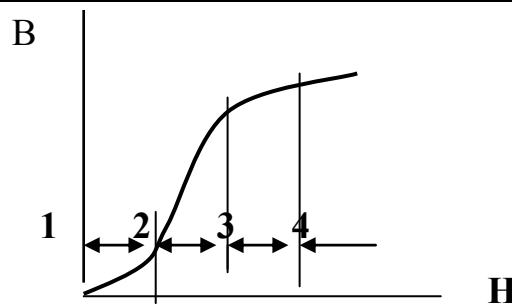


Рис. 4.3 - Крива намагнічування феромагнетика

В області більш сильних полів (область 2) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний характер. На ділянці необоротного зсуву доменних границь крива намагнічування має найбільшу крутизну.

При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля зростає роль другого механізму намагнічування - механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямку легкого намагнічування поступово повертаються в напрямку поля (область 3).

Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, настає технічне насичення намагніченості (область 4). Незначне зростання індукції на ділянці насичення обумовлено складовою частиною $\mu_0 \mathbf{H}$ (4.2) і збільшенням намагніченості самого домену. Це явище одержало назву *парапроцесу* або *істинного намагнічування*. Строго паралельне розташування спінових моментів у домені можливе тільки при температурах, близьких до абсолютного нуля. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії впорядкованість у розташуванні спінів порушується. Зовнішнє поле повертає спіни до паралельної орієнтації. Цим досягається ефект збільшення намагніченості.

На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів називають *технічним намагнічуванням*.

Із кривої намагнічування можна визначити статичну (відносну) магнітну проникність. Вона пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (4.4)$$

Граничне значення магнітної проникності при напруженості магнітного поля, що прагне до нуля, називають *початковою магнітною проникністю* μ_H . Експериментально її визначають у слабких магнітних полях з напруженістю порядку 0,1 А/м.

Крутизна окремих ділянок кривої намагнічування і гілок петлі гістерезису характеризують диференціальною магнітною проникністю

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (4.5)$$

У тому самому зразку максимальне значення диференціальної проникності завжди перевищує максимальне значення статичної магнітної проникності.

Якщо феромагнетик намагнітити до насичення B_s , а потім відключити зовнішнє поле, то індукція в нуль не обернеться, а прийме деяке значення B_r , яке називається залишковою індукцією. Щоб усунути залишкову індукцію, необхідно прикласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість розмагнічуваного поля, при якій індукція в зразку, попередньо намагніченому до насичення, обертається в нуль, називається коерцитивною силою. Зміна магнітного стану феромагнетика при його циклічному перемагнічуванні характеризується явищем гістерезису, тобто відставанням індукції від напруженості поля. 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 петлі гістерезису залишається незмінною.

Залишкова індукція і коерцитивна сила є параметрами граничної петлі гістерезису. Сукупність вершин петель гістерезису утворює основну *криву намагнічування феромагнетика*.

2.3 Магнітні втрати

У змінних магнітних полях перемагнічування феромагнетика супроводжується втратами, що викликають нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із *втрат на гістерезис, на вихрові струми й магнітну післядію*. Як правило, у нагрівання феромагнетика внеском останнього механізму втрат можна знехтувати.

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування, віднесені до одиниці об'єму речовини, визначаються площею статичної петлі гістерезису, тобто петлі, яка була одержана при повільній зміні магнітного потоку

$$\mathcal{E}_2 = \oint_{ct} HdB \quad (4.6)$$

Оцінити дані втрати можна за емпіричною формулою

$$\mathcal{E}_2 = \eta B_m^n \quad (4.7)$$

де η - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу;

B_m – максимальна індукція, що досягається в даному циклі;

n – показник ступеня, що приймає значення від 1,6 до 2,0 залежно від B_m .

Вихрові струми виникають у провідному середовищі за рахунок е.р.с. самоіндукції, пропорційній швидкості зміни магнітного потоку. Звідси впливає відмінність статичних петель гістерезису від динамічних: *якщо статичні петлі характеризують лише втрати на гістерезис, то динамічні включають сумарні втрати на гістерезис і вихрові струми, тобто при намагнічуванні змінним полем петля гістерезису розширюється*. Причому втрати на гістерезис за один період зміни зовнішнього поля залишаються постійними в досить широкому діапазоні частот, а втрати на вихрові струми зростають пропорційно частоті.

Важливою характеристикою є *потужність, що виділяється в зразку при його перемагнічуванні, тобто енергія, що витрачається в одиницю часу*. Потужність витрачається на вихрові струми і визначається за емпіричною формулою

$$P_T = \mathcal{E}_T fV = \xi f^2 B_m^2 V \quad (4.8)$$

де V – об'єм зразка;

ξ - коефіцієнт, пропорційний питомої провідності речовини й залежний від геометричної форми й розмірів поперечного перерізу зразка, що намагнічується.

Потужність, обумовлена втратами на гістерезис, визначається за наступною формулою:

$$P_T = \eta B_m^n fV \quad (4.9)$$

Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно використовувати матеріал з підвищеним питомим опором або збирати осердя з тонких листків, ізолюваних один від одного. Потужність, що витрачається на вихрові струми в одиниці маси й виражена у Вт/кг, пов'язана з товщиною листа:

$$p_T = P_T(Vd) = 1,64\gamma h^2 f^2 B_m^2 / d \quad (4.10)$$

де d - щільність матеріалу.

Втрати на магнітну післядію обумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля. Дослідження показують, що спад намагніченості ферромагнетиків відбувається не миттєво, а за деякий проміжок часу - від часток мілісекунд до декількох хвилин. Час установлення стабільного магнітного стану істотно зростає зі зниженням температури. Однієї з основних причин магнітної післядії є теплова енергія, що допомагає слабо закріпленим доменним границям долати енергетичні перешкоди, які заважають їхньому вільному зсуву при зміні поля. Це явище називають магнітною в'язкістю.

Розглянемо еквівалентну схему й векторну діаграму індуктивної котушки з магнітним осердям у вигляді послідовного ланцюжка з індуктивності L і активного опору r , еквівалентного всім видам втрат на перемагнічування (рис. 4.4). Власною ємністю й опором обмотки індуктивної котушки зневажаємо.

Кут δ_μ називається *кутом магнітних втрат*. З векторної діаграми виходить, що тангенс кута магнітних втрат дорівнює

$$\operatorname{tg} \delta = r / \omega L \quad (4.11)$$

З урахуванням цього активну потужність можна визначити за формулою

$$P_a = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta \quad (4.12)$$

Величина, зворотна $\operatorname{tg} \delta$ називається *добротністю осердя*.

Найбільш повне поведіння феромагнетиків у змінних магнітних полях описує комплексна магнітна проникність

$$\tilde{\mu} = \overset{\cdot}{\mu} - j \overset{\cdot}{\mu} \quad (4.13)$$

де $\overset{\cdot}{\mu} = B_m / \mu_o H$ - називається *пружною магнітною проникністю*, що збігається з відносною магнітною проникністю.

$B_{m1} = B_m \cos \delta_\mu$ складова магнітної індукції, що збігається з напруженістю поля.

"
 $\overset{\cdot}{\mu} = B_{m2} / \mu_o H_m$ - називається *в'язкою магнітною проникністю μ* .

$B_{m2} = B_m \sin \delta_\mu$ складова магнітної індукції, що відстає по фазі від напруженості поля на кут $\pi / 2$.

2.4 Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків

При нагріванні феромагнетика відбувається поступова теплова дезорієнтація спінових магнітних моментів і зменшення спонтанної намагніченості. Вище деякої температури відбувається розпад доменної структури, тобто спонтанна намагніченість зникає й феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Температура такого фазового переходу називається *магнітною точкою Кюрі*. Залежність намагніченості насичення від температури показана на рис.2.5. Намагніченість різко падає в міру наближення до точки Кюрі, де виконується співвідношення

$$\frac{J_{ms}}{J_{m0}} = \alpha \sqrt{1 - T/T_k} \quad (4.14)$$

де α - постійна для даного матеріалу.

Прийнято визначати точку Кюрі перетинанням лінійного продовження найбільш крутої ділянки спаду кривої намагніченості з віссю температур. При температурі Кюрі магнітна проникність феромагнетика стає приблизно рівною одиниці. Вище точки Кюрі магнітна сприйнятливості змінюється відповідно до закону Кюрі-Вейса

$$k_M = 3/(T - T_k), \quad (4.15)$$

де 3 - постійна Кюрі-Вейса.

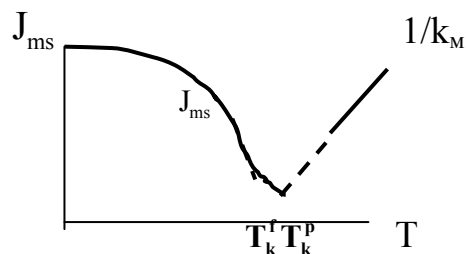


Рис.4.5 - Залежність намагніченості насичення і парамагнітної сприйнятливості феромагнетика від температури

Практичний інтерес становить температурна залежність магнітної проникності феромагнетика.

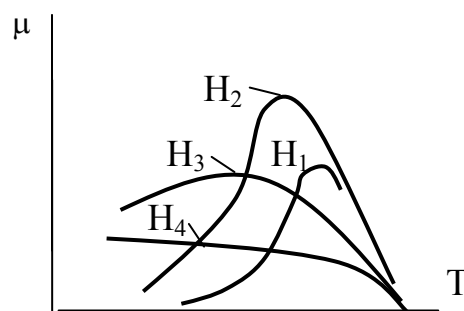


Рис.4.6 - Температурна залежність магнітної проникності феромагнетика при різних напруженостях зовнішнього поля.

Характер цієї залежності виявляється не однаковим для магнітної проникності, обмірюваної в слабкому й сильному магнітних полях. Зростання магнітної проникності при підвищенні температури обумовлено, головним чином тим,

що при нагріванні феромагнетика слабшають сили, що перешкоджають зсуву доменних границь і повороту магнітних моментів доменів.

Високотемпературний спад магнітної проникності пов'язаний з різким зменшенням спонтанної намагніченості доменів.

2.5 Магнітом'які й магнітотверді матеріали

Застосовувані в електротехнічній промисловості магнітні матеріали розділяються на дві основні групи: *магнітом'які* й *магнітотверді*.

До *магнітом'яких* належать матеріали з малою коерцитивною силою і високою магнітною проникністю. Вони мають здатність намагнічуватися до насичення в слабких магнітних полях. Характеризуються вузькою петлею гістерезиса й малими втратами при перемагнічуванні. Використовуються в основному як магнітопроводи дроселів, трансформаторів, електромагнітів, магнітних систем електроприладів і т.д.

До *магнітотвердих* належать матеріали з великою коерцитивною силою. Вони перемагнічуються лише в сильних магнітних полях. Застосовуються в основному для виготовлення постійних магнітів, а також для магнітного запису.

Умовно магнітом'якими вважають матеріали, в яких $H_c < 800 \text{ А/м}$, а магнітотвердими – із $H_c > 4 \text{ кА/м}$.

Основні вимоги до *магнітом'яких матеріалів* наступні:

- повинні мати велику індукцію насичення, тобто пропускати максимальний магнітний потік через задану площу поперечного перерізу магнітопроводу. Це дозволить зменшити габаритні розміри й масу магнітної системи;
- повинні мати можливо менші втрати на перемагнічування у змінних магнітних полях. Як правило, магнітопроводи збирають з окремих ізольованих один від одного листях або стрічок, які повинні мати високу пластичність для полегшення процесу виготовлення виробів з них;

- повинні мати стабільність властивостей у процесі експлуатації, а також при впливі таких зовнішніх факторів, як температура й механічні напруження.

В електротехнічній промисловості практичне застосування знайшли наступні магнітом'які матеріали:

низьковуглеродиста електротехнічна листова сталь є однієї з різновидів технічно чистого заліза. Випускається у вигляді листів товщиною 0,2-4 мм і містить не більше 0,6% домішок, у тому числі не більш 0,04% вуглецю. Магнітна проникність перебуває в межах 3500-4500, коерцитивна сила - відповідно не більше 100-65 А/м. Використовується для магнітопроводів постійного магнітного потоку;

кремениста електротехнічна сталь - основний магнітом'який матеріал, використовуваний в електротехнічній промисловості. Містить до 4% кремнію і має задовільні механічні властивості.

Сталь маркується чотирма цифрами. Разом перші три цифри означають тип сталі, четверта - порядковий номер типу сталі.

Сталь електротехнічну тонколистову підрозділяють і маркують так:

а) за структурним станом й видом прокатки на класи (перша цифра марки):

- 1 - гарячекатана ізотропна,
- 2 - холоднокатана ізотропна,
- 3 - холоднокатана анізотропна з ребристою текстурою;

б) за вмістом кремнію (друга цифра марки):

- 0 - зі вмістом кремнію до 0,4% (нелегована);
- 1 - від 0,4 до 0,8%;
- 2 - 0,8-1,8%;
- 3 - 1,8-2,8%;
- 4 - 2,8-3,8%;
- 5 - 3,8-4,8%;

в) за основною нормованою характеристикою на групі (третья цифра в марці):

0 - питомі втрати при магнітній індукції 1,7 Тл і частоті 50 Гц

1 - при 1,5 Тл і 50 Гц

2 - при 1,0 Тл і 400 Гц

6 - магнітна індукція в слабких магнітних полях при напруженості поля 0,4 А/м:

7 - магнітна індукція в середніх магнітних полях при 10 А/м.

Електротехнічну сталь випускають у вигляді рулонів, листів і стрічок. Товщина листів перебуває в межах 0,1 - 1 мм. Сталь різних класів застосовують для виготовлення магнітних ланцюгів апаратів, трансформаторів, електричних машин, приладів.

Текстурована сталь анізотропна й використовується для осердя трансформаторів, що виготовляються за способом «намотування» з рулонного матеріалу. Це дозволяє зменшити їхню масу й габаритні розміри на 20-25%.

Пермалої - це залізонікелеві сплави, що володіють великою початковою магнітною проникністю в області слабких магнітних полів. Розрізняють *високонікелеві* (зі вмістом нікелю 70-83%) і *низконікелеві* (40-50%Ni) *пермалої*.

Магнітні властивості пермалоїв істотно залежать від зовнішніх механічних впливів, від хімічного складу й наявності домішок, а також від режимів термообробки матеріалу. Магнітна проникність високонікелевих пермалоїв у кілька разів вище, ніж у низконікелевих, і набагато перевершує проникність електротехнічних сталей.

Пермалої випускають декількох груп, кожна з яких містить ще ряд марок.

У марках пермалоїв використовують наступні літерні позначення:

Н - нікель,

К - кобальт,

М - марганець,

Х - хром,

С - кремній,

Д - мідь.

Додаткова буква У означає сплав з поліпшеними властивостями,

П - з прямокутною петлею гістерезиса.

Цифра в марці вказує процентний вміст нікелю.

Застосовують пермалої для виготовлення осердя малогабаритних трансформаторів, дроселів і деталей магнітних ланцюгів, які працюють при підвищеній індукції без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням.

Альсіфери – сплави заліза з кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсіфера: 9,5% Si , 5,6% Al , інше Fe. Такий склад відрізняється твердістю і крихкістю. Основні характеристики альсіфера не поступаються високонікелевим пермалоєм: $\mu_n = 35500$. $\mu_{\text{макс}} = 120000$, $H_c = 1.8$ А/м. З огляду на те, що альсіфер тендітний матеріал, його можна розмелювати в порошок і використовувати для виготовлення пресованих осердь.

Магнітотверді матеріали за складом, станом й способом одержання під-розділяють на:

- ✓ леговані мартенситні сталі,
- ✓ литі магнітотверді сплави,
- ✓ магніти з порошків,
- ✓ магнітотверді ферити,
- ✓ пластичні сплави, що деформуються і магнітні стрічки.

Характеристиками матеріалів для постійних магнітів служать коерцитивна сила, залишкова індукція і максимальна енергія, що віддається магнітом у зовнішній простір. Магнітна проникність матеріалів для постійних магнітів нижче, ніж магнітом'яких матеріалів, причому чим вище коерцитивна сила, тим менше магнітна проникність.

Для виробництва постійних магнітів спочатку використовувалися *леговані мартенситні сталі*, з огляду на їх невисоку вартість і можливість механічної обробки на металорізальних верстатах. Однак у зв'язку з низькими магнітними характеристиками в цей час їхнє застосування обмежене.

Великою магнітною енергією володіють литі магнітотверді сплави: *альні* (Al -Ni - Fe), *альніко* (сплав альні з добавкою кобальту), *альнісі* (сплав альні з добавкою кремнію), *магніко* (сплав альніко з вмістом кобальту 24%). Поліпшення магнітних властивостей сплавів обумовлено не тільки складом, але й спеціальною обробкою - охолодженням магнітів у сильному магнітному полі. До недоліків цих сплавів слід віднести їхню твердість і крихкість, внаслідок чого вони можуть оброблятися тільки шляхом шліфування.

Для виготовлення постійних магнітів зі строго витриманими розмірами використовують методи порошкової металургії. Розрізняють *металокерамічні магніти*, які одержують пресуванням і подальшим спіканням при високій температурі, й *металопластичні магніти*, які виготовляють із зерен порошку, скріплених єднальним складом.

Література [1.с. 275-298]

Контрольні запитання:

1. Наведіть класифікацію речовин за магнітними властивостями.
2. Перелічіть основні характеристики магнітних матеріалів.
3. Укажіть причини виникнення магнітних втрат.
4. Перелічіть зовнішні фактори, що впливають на характеристики магнітних матеріалів.
5. Укажіть основні відмінності магнітом'яких матеріалів від магнітотвердих.
6. Наведіть основні марки електротехнічних сталей.
7. Укажіть, чим відрізняються властивості високонікелевих і низьконікелевих пермалоїв.
8. Укажіть основні властивості пермалоїв.
9. Укажіть основні властивості альсиферів.
10. Поясніть, що мається на увазі під добротністю осердя.
11. Перелічіть можливі шляхи зменшення втрат на вихрові струми.
12. Назвіть параметр, за допомогою якого можна оцінити крутизну окремих ділянок кривої намагнічування.
13. Поясніть, що називається коерцитивною силою.
14. Поясніть, що називається кривою намагнічування.
15. Опишіть методику визначення відносної магнітної проникливості з основної кривої намагнічування.
16. Поясніть, що називається залишковою індукцією.
17. Перелічіть назви литих магнітотвердих сплавів.