

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності G3 «Електрична інженерія» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 621.315.5

E50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 17.03.2026, протокол № 6.

Укладач:

Віталій Мардзявко – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Олексій Садовий – канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій Ставинський – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМА 1. Основні поняття та визначення про електротехнічні.....	5
ТЕМА 2. Провідникові матеріали: види, фізичні процеси та класифікація.....	17
ТЕМА 3. Аналіз властивостей провідників в залежності від ступення провідності.....	29
ТЕМА 4. Аналіз спеціальних провідникових матеріалів в електротехніці.....	47
ТЕМА 5. Аналіз будови, властивостей і застосування напівпровідникових матеріалів.....	57
ТЕМА 6. Напівпровідникові матеріали: класифікація, властивості, домішкові структури та області застосування.....	67
ТЕМА 7. Електрофізичні властивості діелектриків.....	76
ТЕМА 8. Поляризація діелектриків та діелектрична проникність.....	84
ТЕМА 9. Електропровідність діелектриків.....	95
ТЕМА 10. Діелектричні втрати в діелектриках: механізми, види та вплив на електричні властивості матеріалів.....	104
ТЕМА 11. Пробій діелектриків та механізми його виникнення в газах, рідинах і твердих матеріалах.....	113
ТЕМА 12. Діелектричні матеріали: класифікація, властивості та сфери застосування.....	121
ТЕМА 13. Матеріали для електроізоляції: властивості, класифікація та застосування.....	136
ТЕМА 14. Фізико-механічні та хімічні властивості електротехнічних матеріалів.....	148
ТЕМА 15. Використання діелектриків в конденсаторах.....	156
ТЕМА 16. Основи магнетизму: властивості матеріалів та магнітні явища.....	164
ТЕМА 17. Магнітні матеріали в електротехніці.....	172
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЙ.....	180
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181

ВСТУП

Електротехнічні матеріали відіграють ключову роль у розвитку сучасних технологій, зокрема у галузі енергетики, електроніки та автоматизації. Вони забезпечують передачу, перетворення та зберігання електричної енергії, а також створюють основу для роботи багатьох інноваційних пристроїв. Глибоке розуміння властивостей та принципів роботи електротехнічних матеріалів є важливим для підготовки кваліфікованих інженерів, здатних вирішувати актуальні технічні завдання.

У межах даного курсу розглядаються основні види електротехнічних матеріалів, їх фізичні, хімічні та електричні властивості, а також області застосування. Особлива увага приділяється таким групам матеріалів, як провідники, напівпровідники, діелектрики, магнітні матеріали та надпровідники. Крім того, у процесі навчання аналізуються фактори, які впливають на вибір матеріалів для певних умов експлуатації.

Цей конспект лекцій стане основою для засвоєння теоретичних знань, необхідних для ефективного використання електротехнічних матеріалів у професійній діяльності. Матеріали курсу спрямовані на розвиток інженерного мислення, а також здатності до аналізу та оптимізації технічних рішень.

У результаті вивчення дисципліни студенти:

- 1) оволодіють теоретичними знаннями про фізичні, хімічні, механічні та електричні властивості основних електротехнічних матеріалів, таких як:
- 2) навчатимуться розпізнавати й обирати матеріали, що відповідають конкретним технічним завданням, враховуючи їхні властивості, експлуатаційні умови та економічну доцільність.
- 3) засвоять методи оцінки якості матеріалів, їх тестування та контролю відповідно до стандартів.
- 4) отримають практичні навички у визначенні характеристик електротехнічних матеріалів та їхнього використання в електротехнічних пристроях і системах.
- 5) зрозуміють основні принципи впровадження нових матеріалів, включаючи інноваційні рішення, такі як наноматеріали, композити й матеріали для відновлюваної енергетики.
- 6) розвинуть інженерне мислення, необхідне для розробки технічних рішень, які враховують властивості матеріалів та їхній вплив на ефективність електротехнічного обладнання.

Успішне вивчення дисципліни дозволить студентам бути конкурентоспроможними фахівцями у сфері електротехніки, здатними до інноваційної та науково-технічної діяльності.

ТЕМА 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними поняття та визначеннями електротехнічних матеріалів.

Анотація

В темі розглядаються основні поняття дисципліни «Електротехнічні матеріали», будова речовини на атомно-молекулярному рівні, типи хімічного зв'язку, а також класифікація матеріалів за електричними та магнітними властивостями. Особливу увагу приділено поясненню різниці між провідниками, напівпровідниками і діелектриками, а також характеристикам магнітних речовин — діа-, пара- та ферромагнетиків. У результаті вивчення лекційного матеріалу здобувачі вищої освіти набувають знань про фізичну природу електротехнічних матеріалів, їх структуру, принципи класифікації та властивості. Отримані знання формують теоретичну основу для подальшого вивчення спеціальних дисциплін і практичного застосування матеріалів у електротехнічних пристроях.

Keywords: electrical materials, conductors, dielectrics, semiconductors, magnetic properties, structure of matter, chemical bonding.

План лекції

1. Основні поняття;
2. Елементарна будова речовини;
3. Класифікація речовин за електричними властивостями;
4. Класифікація речовин за магнітними властивостями.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

1.1. Основні поняття

Предметом курсу «Електротехнічні матеріали» є вивчення основних фізичних, хімічних і механічних властивостей матеріалів, які застосовуються в електротехніці (тобто при генеруванні, передачі і використанні електричної енергії), закономірностей впливу експлуатаційних факторів (стан зовнішнього середовища і параметри електричного поля), складу і структури матеріалів на ці властивості, а також технологій одержання електротехнічних матеріалів і областей їх застосування.

Основна проблематика сучасного електротехнічного матеріалознавства:

- 1) забезпечення зростаючих потужностей і швидкості сучасних електротехнічних пристроїв;
- 2) зменшення втрат електроенергії при її передачі на великі відстані;
- 3) підвищення ефективності електротехнічних матеріалів; 4) забезпечення безпеки при роботі.

Електротехнічні матеріали поділяють на три великі групи, які розрізняються за своїми електричними властивостями: провідники, діелектрики (або електроізоляційні матеріали) і напівпровідники (рис. 1.1).

Провідники – це матеріали, що проводять електричний струм. Характеризуються порівняно низьким електричним опором (питомий електричний опір провідників лежить в межах $\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). Провідниками є всі метали і металеві сплави, а також деякі інші матеріали.

Діелектрики (електроізоляційні матеріали) – це матеріали, які в звичайних умовах не проводять електричний струм (питомий об'ємний електричний опір діелектриків лежить в межах $\rho_v=10^6 \dots 10^{12}$ Ом·м).

Напівпровідники – матеріали, які за певних зовнішніх енергетичних впливів стають провідниками.

Магнітні матеріали – це матеріали, що є носіями магнітного поля, або здатні підсилювати зовнішнє електромагнітне поле. Виготовляються як з провідникових, так і з напівпровідникових матеріалів (рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Класифікація електромагнітних матеріалів

Отже, з точки зору здатності проводити електричний струм існує три принципово різних типи матеріалів. Фізична природа цих властивостей матеріалів криється у їхній елементарній будові.

1.2. Елементарна будова речовини

Первинні уявлення про будову речовини були одержані вами при вивченні природознавства. Так, наприклад, ви знаєте, що речовини складаються із дрібних частинок - атомів і молекул. Атоми і молекули перебувають у безперервному хаотичному русі і взаємодіють між собою. Залежно від розташування і взаємодії частинок, речовина може перебувати у твердому, рідкому та газоподібному станах.

Основними елементарними частинками, з яких складаються всі відомі нам речовини, є протони, нейтрони і електрони.

Атомне ядро складається з протонів (позитивно заряджені частинки) і нейтронів (частинки, що не мають заряду).

У найпростішій, **планетарній моделі** атома (рис. 1.2) електрон обертається по орбіті навколо ядра атома, компенсуючи його позитивний заряд. Будова атомів є основою періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва.

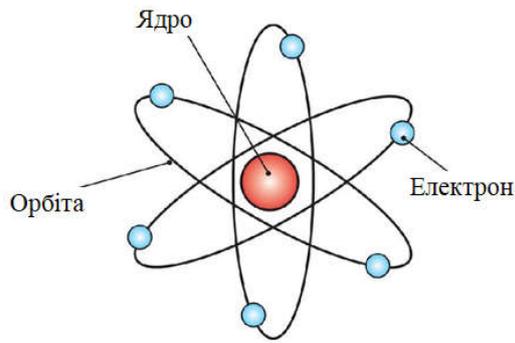


Рис. 1.2 – Планетарна модель атома

Наприклад, атом водню складається з одного протона й одного електрона (рис. 1.3), атом гелію – із двох і т.д.

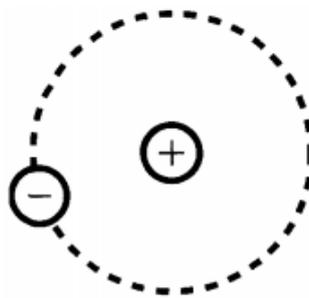


Рис. 1.3 – Планетарна модель атома

У квантовій механіці крім корпускулярних враховуються також і хвильові властивості елементарних часток (корпускулярно-хвильовий дуалізм).

Гази, рідкі і тверді речовини складаються з атомів, молекул або іонів. Розміри атомів – порядку ангстремів ($1\text{Å}=10^{-10}\text{м}=0,1\text{нм}$).

Молекула – мікрочастинка, що утворюється з декількох атомів і має постійний атомарний склад для певної речовини (рис. 1.4).

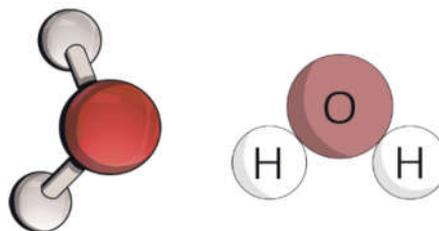


Рис. 1.4 – Зображення молекули гелію

Іони – електрично заряджені частинки, що утворюються з атома або молекули в результаті втрати або приєднання одного або декількох електронів (рис. 1.5).

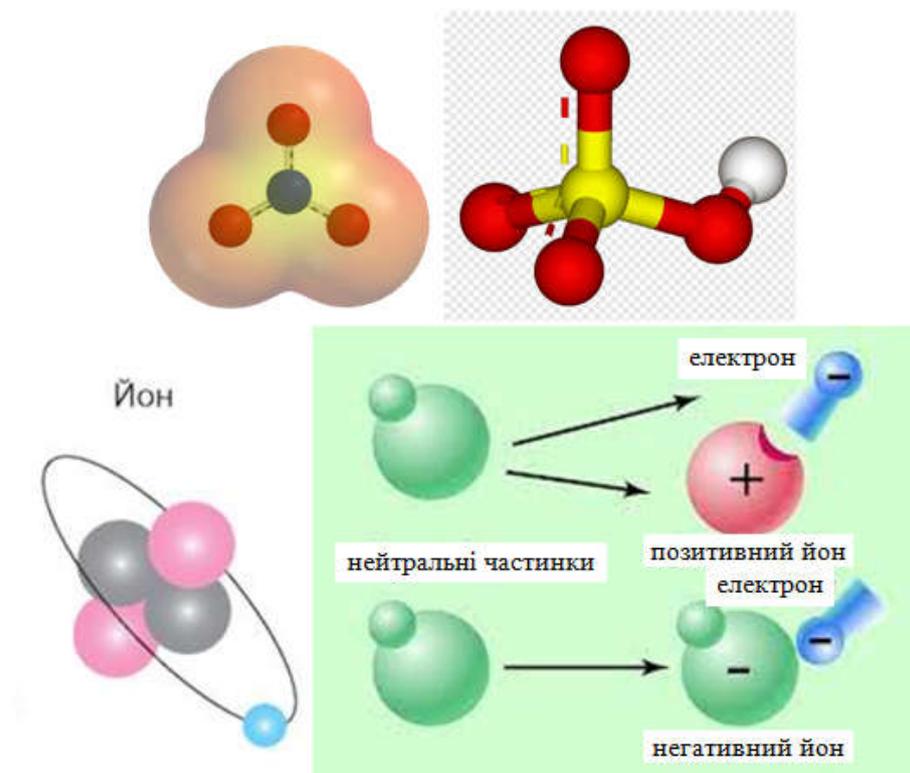


Рис. 1.5 – Будова іона

Позитивно заряджені іони називаються **катіонами**, негативно – **аніонами** (ці терміни у 1834 році запропонував англійський фізик Майкл Фарадей).

Розміри позитивних іонів-атомів, позбавлених частини електронів, менше, ніж атомів; розміри негативних іонів-атомів, що приєднали додаткові електрони, більше, ніж розміри відповідних атомів.

Отже, елементарна будова речовини є фундаментальною концепцією, яка пов'язує фізику, хімію та матеріалознавство. Розуміння структури атомів, молекул та іонів, а також їх взаємодії дає змогу глибше дослідити властивості матеріалів і розробляти нові технології.

1.2.1. Види зв'язку атомів у молекулах

I. Ковалентний зв'язок – це вид хімічного зв'язку, що здійснюється парою електронів, спільних для атомів, що утворюють молекулу (рис. 1.6). Атоми в молекулі можуть з'єднуватись одинарним, подвійним або потрійним ковалентним зв'язком.

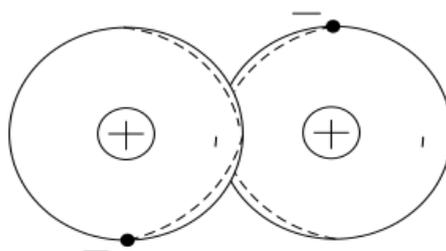


Рис. 1.6 – Схематичне зображення двохатомної молекули з ковалентним зв'язком

Ковалентний зв'язок може бути як у молекулах (у трьох агрегатних станах речовини), так і між атомами, що утворюють ґратки кристала. Прикладами таких кристалів є алмаз, кремній, германій. Ковалентним зв'язком можуть утримуватися не тільки однакові атоми (рис. 1.7):

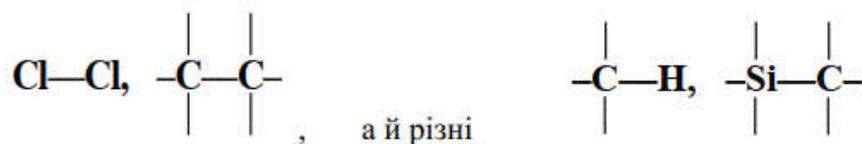


Рис. 1.7 – Приклад ковалентного зв'язка

Кристали – тверді тіла, атоми і молекули яких утворюють впорядковану періодичну структуру (кристалічну ґратку) (рис. 1.8). Характеризуються анізотропією фізичних властивостей. Більшість природних твердих матеріалів є полікристалами (тобто складаються з багатьох кристалів). Одиночні кристали називають монокристалами.

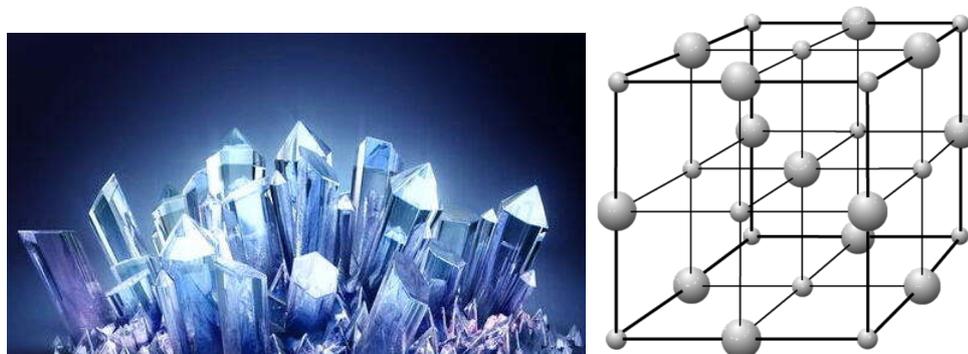


Рис. 1.8 – Зображення матеріалу кристалу та кристалічної ґратки

Анізотропія – неоднаковість (неоднорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках.

Ізотропія – однаковість (однорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках. Відповідно матеріали можуть бути або ізотропними, або анізотропними.

Основні типи кристалічних ґраток: кубічна (К), об'ємноцентрована кубічна (ОЦК), гранецентрована кубічна (ГЦК), гексагональна щільноупакована та ін. Кристалічні, мікро- і макроструктури матеріалів можуть мати дефекти (вакансії, дислокації, мікротріщини, тріщини, пори, включення інших матеріалів), які суттєво впливають на фізичні характеристики матеріалів, зокрема і на електричні.

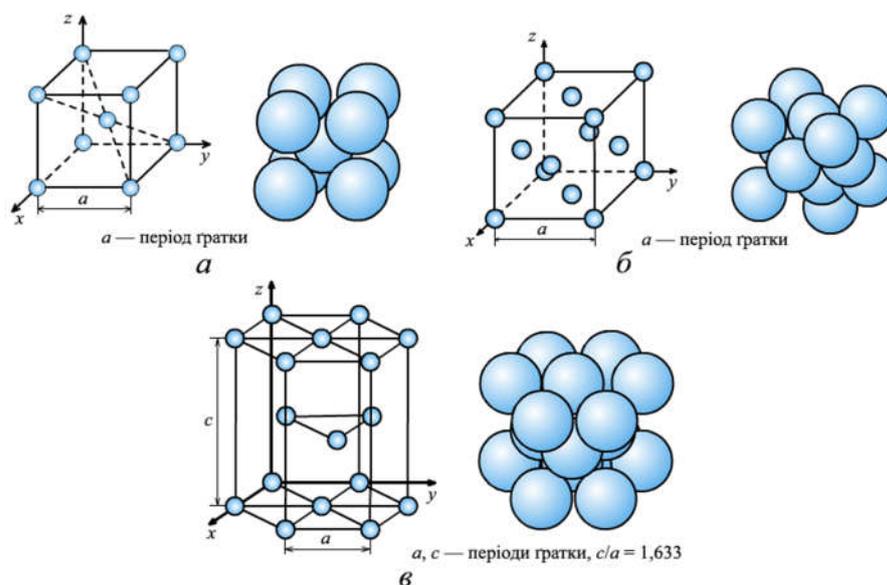


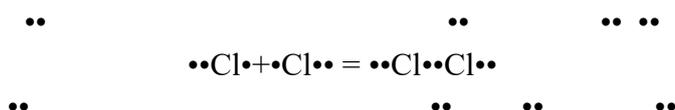
Рис. 1.9 – Типи кристалічних ґраток: а - кубічна, б - об'ємноцентрована кубічна, в - гранецентрована кубічна

Аморфна структура – стан речовини, що характеризується ізотропією фізичних властивостей, зумовленою невпорядкованим розташуванням атомів і молекул (наприклад, скло).

Ковалентний зв'язок спостерігається також у молекулах газів.

Молекули газів містять різне число атомів. Наприклад, гази з однотомними молекулами – He, Ar, Ne; з двоатомними молекулами – H₂, N₂, O₂, Cl₂; з триатомними молекулами – CO₂, H₂O і т.п.

Об'єднання декількох атомів у молекулу досягається за рахунок електронів, що стають загальними для всіх атомів. Скажімо, у молекулі Cl₂ два атоми хлору, що мають на зовнішньому шарі по сім електронів, приймають стійку конфігурацію шляхом об'єднання двох загальних електронів:



Молекули з ковалентним зв'язком можуть бути нейтральними або полярними (дипольними).

Молекули, у яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, є **нейтральними**.

Молекули називають **полярними або дипольними**, якщо центри протилежних за знаком зарядів не збігаються і знаходяться на деякій відстані один від одного.

Полярна молекула характеризується величиною **дипольного моменту**, що визначається добутком заряду на відстань між центрами позитивного і негативного зарядів.

II. Іонний зв'язок – визначається силами притягання між позитивними і негативними іонами (тобто між катіонами і аніонами).

Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і високою температурою плавлення. Типовими прикладами іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів.

На рис. 1.10 показані структури хлористого натрію і хлористого цезію. З рисунка видно щільне упакування іонів першої речовини і нещільне – другої:

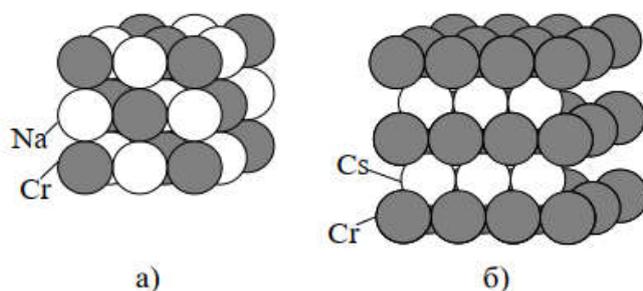


Рис. 1.10 – Структура і щільне упакування іонів хлористого натрію (а) і структура і нещільне упакування іонів хлористого цезію (б)

До речовин з іонним зв'язком належать більшість солей і деякі оксиди (Cu_2O , ZnO , CdO , Fe_2O_3 , NiO і ін.). Іонні сполуки за механічною міцністю і хімічною стійкістю поступаються речовинам, утвореним за допомогою ковалентного зв'язку, тому що іонний зв'язок є менш міцний, ніж ковалентний.

III. Металевий зв'язок – визначається взаємодією (притяганням) між позитивними іонами і вільними електронами і є причиною монолітності металу. Така взаємодія приводить до утворення твердих кристалічних тіл.

Метали можна розглядати як системи, побудовані з розташованих у вузлах ґраток додатно заряджених атомних осей, що знаходяться в середовищі вільних електронів (рис. 1.11). Наявність вільних електронів є причиною високої електропровідності і теплопровідності металу.

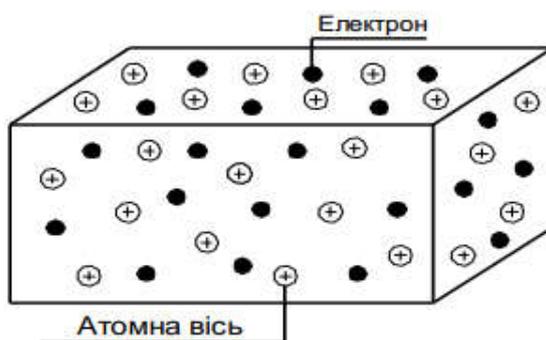


Рис. 1.11 – Схема будови металевого провідника

Притягання між додатними атомними остовами й електронами є причиною монолітності металу. Наявність вільних електронів веде до високої електропровідності і теплопровідності металу, а також є причиною його блиску. Ковкість металу пояснюється переміщенням і ковзанням окремих шарів атомних осей.

IV. Молекулярний (залишковий) зв'язок, або зв'язок Ван-дер-Ваальса, спостерігається між молекулами деяких речовин що мають низьку температуру плавлення і неміцну кристалічну молекулярну ґратку (наприклад, парафін).

Міжмолекулярне притягання в цьому випадку обумовлюється погодженим рухом валентних електронів у сусідніх молекулах (рис. 1.12).

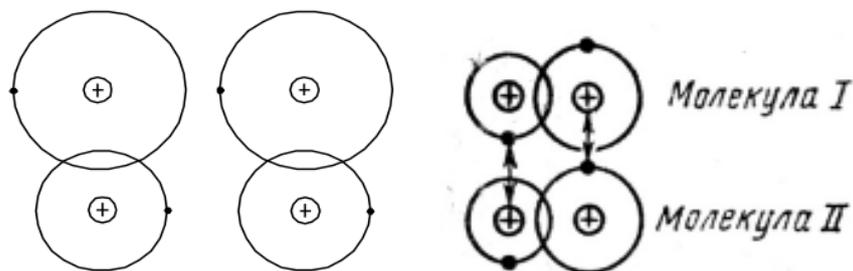


Рис. 1.12 – Схематичне зображення двох взаємодійних молекул (зв'язок Ван-дер-Ваальса)

У будь-який момент часу електрони максимально віддалені один від одного і максимально наближені до додатних зарядів. При цьому сили притягання валентних електронів додатно заряджених остовів сусідніх молекул виявляються сильніші сил взаємного відштовхування електронів зовнішніх орбіт. Зв'язок Ван-дер-Ваальса спостерігається між молекулами деяких речовин, наприклад парафіну, що має низьку температуру плавлення і свідчить про неміцність його кристалічної молекулярної ґратки.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз

Тип зв'язку	Міцність	Температура плавлення	Приклади	Особливості
Ковалентний	Висока	Висока	H ₂ , Cl ₂ , алмаз	Міцний зв'язок, може бути полярним чи нейтральним
Іонний	Середня	Висока	NaCl, CsCl	Стійкість і висока температура плавлення
Металевий	Середня-висока	Висока	Мідь, залізо, алюміній	Електропровідність, теплопровідність
Ван-дер-ваальсовий	Низька	Низька	Парафін	Слабка взаємодія, низька температура плавлення

Різні типи зв'язків забезпечують багатоманітність властивостей речовин, таких як механічна міцність, електропровідність, теплопровідність і стійкість. Розуміння цих зв'язків є основою для прогнозування фізичних і хімічних властивостей матеріалів і створення нових сполук.

1.3. Класифікація речовин за електричними властивостями

Дослідження спектрів випромінювання різних речовин у газоподібному стані, коли атоми розташовані один від другого на великих відстанях, показує, що для атомів кожної речовини характерні цілком визначені спектральні лінії. Це говорить про наявність

енергетичних станів (рівнів) для різних атомів. Частина цих рівнів заповнена електронами в нормальному (незбудженому) стані атома, на інших енергетичних рівнях електрони можуть знаходитися тільки після того, як атом піддається зовнішньому енергетичному впливові і стане збудженим. Прагнучи перейти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії в момент повернення електронів на рівні, на яких енергія атома мінімальна (рис. 1.13).

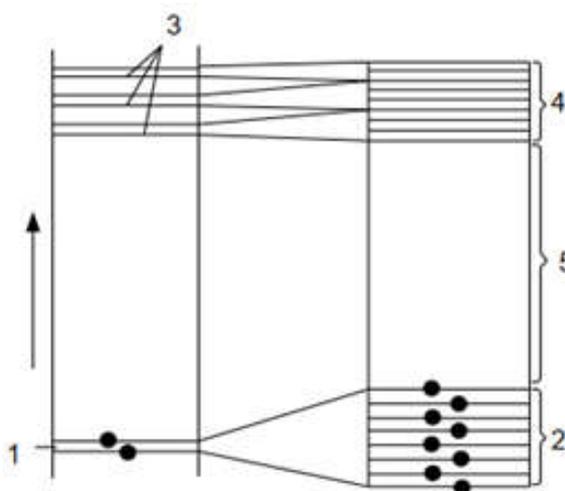


Рис. 1.13 – Схема розташування енергетичних рівнів відокремленого атома (ліворуч) і неметалевого твердого тіла (праворуч) (1 - нормальний енергетичний рівень атома, 2 - заповнена електронами зона, 3 - рівні збудженого стану атома, 4 - вільна зона, 5 - заборонена зона)

При переході газоподібної речовини в рідину, а потім при утворенні кристалічних ґраток твердого тіла, всі наявні в даному типі атомів електронні рівні (як заповнені електронами, так і незаповнені) трохи зміщуються внаслідок дії сусідніх атомів один на одного. Таким чином, з окремих енергетичних рівнів відокремлених атомів у твердому тілі утворюється ціла смуга – зона енергетичних рівнів.

1.3.1. Типи провідності

Провідність буває **електронною** (метали, напівпровідники), **іонною** (електроліти) і **змішаною**, коли має місце як електронна, так і іонна провідність.

Для пояснення властивостей різних матеріалів проводити або не проводити електричний струм існує так звана зонна теорія твердих тіл (рис. 1.14). Згідно з цією теорією електрони в атомі можуть перебувати у строго визначених енергетичних станах (рівнях). Якщо до тіла певним чином підвести енергію (наприклад, напругу), то частина електронів, сприймаючи цю енергію, збуджуються і переходять з звичайного енергетичного рівня (1) на більш високий енергетичний рівень (3). Прагнучи прийти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії в момент переходу електронів зі збуджених рівнів на рівні, при яких його енергія мінімальна. Проміжні зони (2) між енергетичними рівнями електронів називають **забороненими зонами** (на рис. 1.14 ширина забороненої зони позначена буквою W). Електрон не може мати енергію, що дорівнює ширині забороненої зони. Його енергія має бути або вищою, або нижчою цієї зони.

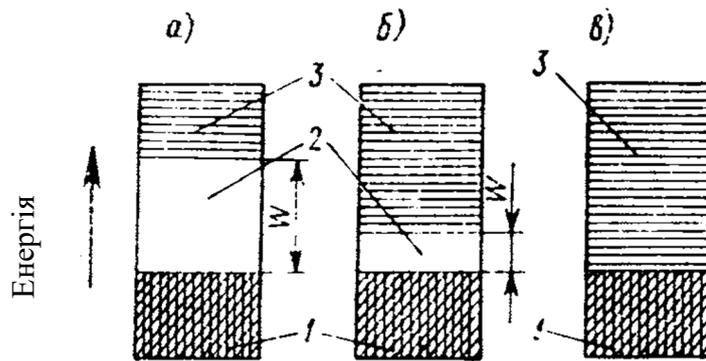


Рис. 1.14 – Енергетичні діаграми діелектриків (а), напівпровідників (б) і провідників (в)

У металевих провідників ширина забороненої зона дуже мала. Внаслідок цього достатньо слабкої напруги, прикладеної до провідника, щоб електрони в металі легко проходили через заборонену зону.

У діелектриках заборонена зона настільки велика, що потрібний значний електричний потенціал, щоб електрони змогли подолати заборонену зону. Тому в діелектриках в звичайних умовах електронної провідності не спостерігається.

Розмір забороненої зони напівпровідників значно більший, ніж у металів, але менший, ніж у діелектриків. Електронна провідність у напівпровідниках може бути викликана за рахунок зовнішніх енергетичних впливів (температура, енергія світла, енергія потоку електронів і ядерних часток, енергія електричних і магнітних полів, механічна енергія і т.д.).

Діелектрики - це матеріали з великою шириною забороненої зони, що унеможливорює електронну провідність за звичайних умов. Вони відіграють важливу роль в електротехніці, використовуючись для створення електричної ізоляції, яка розділяє струмопровідні елементи, що перебувають під різними електричними потенціалами. Діелектрики також застосовуються в конденсаторах для формування заданої ємності. Через ці властивості діелектричні матеріали часто називають електроізоляційними.

До таких матеріалів висуваються суворі вимоги, включно з механічними, тепловими та іншими фізико-хімічними характеристиками. Їхня вартість і доступність також мають важливе значення. Залежно від агрегатного стану, електроізоляційні матеріали поділяються на тверді, рідкі й газоподібні.

Напівпровідники - це матеріали, у яких заборонена зона значно вужча, тому електронна провідність виникає під впливом зовнішньої енергії. За відсутності вільних електронів (наприклад, при абсолютному нулі температури) прикладене електричне поле не викликає струму. Однак за умов додавання енергії (теплової, світлової або механічної) електрони можуть переходити через заборонену зону, утворюючи електронну провідність.

При цьому в місцях, звідки електрони "виходять", утворюються "дірки", які теж сприяють провідності. Під дією електричного поля дірки переміщуються у напрямку поля, створюючи позитивний заряд. Цей процес супроводжується рівновагою між переходами електронів у вільну зону та поверненням у заповнену. Температура впливає на кількість вільних електронів: при її підвищенні провідність зростає, а при зниженні до абсолютного нуля зникає.

Джерелом енергії для електронного переходу може бути не лише тепло, а й світло, потоки частинок, магнітні поля та інші фактори. Властивості електропровідності залежать від структури атомів і взаємодії між ними. Наприклад, вуглець у формі алмазу є діелектриком, тоді як графіт має високу провідність. Домішки та дефекти кристалічних ґраток суттєво змінюють характеристики напівпровідників.

До основних напівпровідників належать кремній, германій, селен, телур та сірка. Їх поділяють на прості напівпровідники, хімічні з'єднання й комплекси.

Провідниками будуть матеріали, у яких заповнена електронами зона впритул прилягає до зони вільних енергетичних рівнів або навіть перекривається нею. Внаслідок цього електрони в металі можуть переходити з рівнів заповненої зони на незайняті рівні вільної зони навіть під впливом слабких напруженостей прикладеного до провідника електричного поля. До провідникових матеріалів відносять матеріали високої провідності, з яких виготовляють струмопровідні частини електричних машин і апаратів, обмотки, контакти, проводи і кабелі та сплави високого опору для виготовлення резисторів, електронагрівальних пристроїв, реостатів, термопар тощо.

1.4. Класифікація речовин за магнітними властивостями

Матеріали за магнітними властивостями поділяються на слабомагнітні та сильномагнітні. До слабомагнітних належать діамагнетики та парамагнетики, а до сильномагнітних - магнітні матеріали, які широко використовуються в техніці завдяки їхнім особливим магнітним властивостям.



Рис. 1.15 – Класифікація речовин за магнітними властивостями

Діамагнетики - це речовини з магнітною проникністю $\mu < 1$, яка не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До них належать водень, інертні гази, органічні сполуки, кам'яна сіль, а також деякі метали: мідь, цинк, срібло, золото, ртуть, вісмут, галій і сурма.

Парамагнетики мають магнітну проникність $\mu > 1$, яка також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До цієї групи входять кисень, оксид азоту, солі заліза, кобальту, нікелю, лужні метали, алюміній і платина. Через свої магнітні властивості діамагнетики та парамагнетики мають обмежене застосування в техніці.

Магнітні матеріали характеризуються магнітною проникністю $\mu \gg 1$, яка залежить від напруженості магнітного поля. До них належать залізо, нікель, кобальт та їхні сплави, сплави хрому й марганцю, гадоліній, ферити та інші сполуки. Ці матеріали широко

використовуються у виготовленні осердь трансформаторів, магнітних систем електричних машин, апаратів і приладів. Більшість магнітних матеріалів є провідниками електричного струму, і їх основою зазвичай виступає залізо та його сплави.

Для виробництва електротехнічних матеріалів (ЕТМ) застосовуються різні технології, зокрема: хімічний синтез, штучне вирощування монокристалів, нанесення тонких плівок на підкладки, очищення (зонне плавлення, вакуумне плавлення й розпилення), введення домішок, іонно-плазмова обробка, а також вплив електромагнітного поля чи випромінювання.

Запитання для самоперевірки

1. Яким чином класифікують матеріали, що використовуються в електротехніці?
2. Які бувають види зв'язку атомів у молекулах?
3. Які види провідності ви знаєте?
4. Як ширина забороненої зони впливає на провідність матеріалів?
5. Види зв'язку та їх характеристика.
6. Ковалентний зв'язок, полярні та неполярні молекули.
7. Іонний зв'язок.
8. Металевий зв'язок.
9. Молекулярний зв'язок.
10. Характеристика провідників.
11. Характеристика напівпровідників.
12. Характеристика діелектриків.
13. Характеристика магнітних провідників.
14. Вплив зовнішнього середовища на роботу ЕТМ.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал з основних понять і визначень дисципліни «Електротехнічні матеріали».
2. Самостійно відновити матеріал про елементарну будову речовини та типи хімічного зв'язку в твердих тілах.
3. Самостійно відновити матеріал із класифікації речовин за електричними властивостями (провідники, напівпровідники, діелектрики).
4. Самостійно відновити матеріал із класифікації речовин за магнітними властивостями (діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики).
5. Самостійно опрацювати додатковий матеріал на тему: «Вплив структури речовини на електричні та магнітні властивості матеріалів».

ТЕМА 2. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ: ВИДИ, ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з видами та класифікацією провідникових матеріалів.

Анотація

В темі розглядаються види провідників, фізичні процеси, що відбуваються під час проходження електричного струму, та механізми провідності в різних середовищах — металах, електролітах і газах. Подано класифікацію провідникових матеріалів, розкрито вплив температури, домішок і структури на їх електропровідність, а також особливості таких явищ, як надпровідність і контактний опір.

У результаті вивчення лекційного матеріалу здобувачі вищої освіти набувають знань про основні типи провідників, закономірності зміни їхніх властивостей, а також навичок вибору оптимальних матеріалів для різних електротехнічних цілей. Отримані знання формують базу для розуміння принципів побудови електричних кіл, апаратури та систем енергопостачання.

Keywords: conductive materials, electrical conductivity, resistivity, temperature, superconductivity, metals, classification of conductors.

План лекції

1. Види провідників;
2. Фізичні процеси в провідниках та їх властивості;
3. Класифікація й основні властивості провідникових матеріалів.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

2.1. Види провідників

Провідникові матеріали (провідники) – речовини з високою порівняно з іншими матеріалами електропровідністю. Провідники містять значну кількість вільних носіїв заряду, які в електричному полі набувають впорядкованого руху.

Провідникові матеріали можна класифікувати за різними ознаками: за агрегатним станом, за основними властивостями та іншими ознаками.

До основних провідників належать метали (металеві сплави) і електроліти. З металевих провідникових матеріалів можна виділити метали високої провідності наприклад, срібло, золото, мідь, алюміній, сплави міді (латуні, бронзи), сплави алюмінію (дюралюміній та ін.).

Матеріали високої провідності застосовуються:

- для виготовлення обмоткових та монтажних проводів, кабелів зв'язку та силових;
- в надвисокочастотних хвилеводах малого загасання;
- для виготовлення електромагнітних екранів і т. ін.

Провідниками електричного струму, крім **твердих тіл**, можуть бути **рідини**, а при відповідних умовах і **гази**.

Твердими провідниками є метали і деякі модифікації вуглецю.

До **рідких провідників** належать розплавлені метали та різні електроліти. При нормальній температурі в якості металічного рідкого провідника може бути використана тільки ртуть (температура плавлення -39°C).

Механізм протікання струму в металах в твердому і рідкому станах обумовлений рухом вільних електронів, внаслідок чого їх називають провідниками з електронною електропровідністю, або **провідниками першого роду**.

Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини (в основному, водні) кислот, лугів та солей. Проходження струму через такі провідники пов'язане з переносом разом з електричними зарядами іонів.

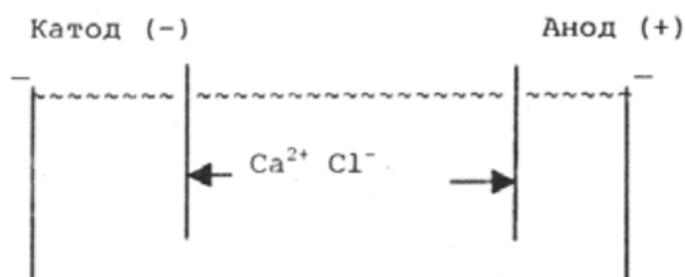


Рис. 2.1 – Розчин хлориду кальцію CaCl_2

Кристалічні речовини з іонною будовою в розплавленому стані також є провідниками другого роду.

Усі **гази і пари**, в тому числі і пари металів, при низьких напруженостях електричного поля не є провідниками, однак якщо напруженість поля перевищила деяке критичне значення, яке забезпечує початок іонізації, то газ може стати провідником, виявляючи електронну і іонну електропровідність. Сильно іонізований газ при рівності числа електронів і позитивних іонів в одиниці об'єму являє собою особливе провідне середовище, яке називається плазмою.

2.2. Фізичні процеси в провідниках та їх властивості

За механізмом протікання струму провідники поділяють на провідники першого роду, в яких струм обумовлений дрейфом вільних електронів (метали в твердому і рідкому стані), і провідники другого роду – електроліти, у котрих струм пов'язаний з переносом заряду іонами (розчини кислот, лугів, солей).

Основна причина провідності металічних провідників полягає в русі великої кількості вільних електронів (“електронного газу”), що підтверджує ряд експериментальних результатів:

- 1) спостерігається прямий зв'язок між електропровідністю та теплопровідністю;
- 2) при тривалому проходженні струму через коло, складене лише з металічних провідників, не спостерігається проникнення атомів одного металу в інший;
- 3) при нагріванні металу до високих температур спостерігається емісія електронів з поверхні;
- 4) поява ЕРС на кінцях провідника, що швидко рухався, і різко зупиненого;

5) зміна питомого опору провідника в магнітному полі в результаті викривлення траєкторії електронів.

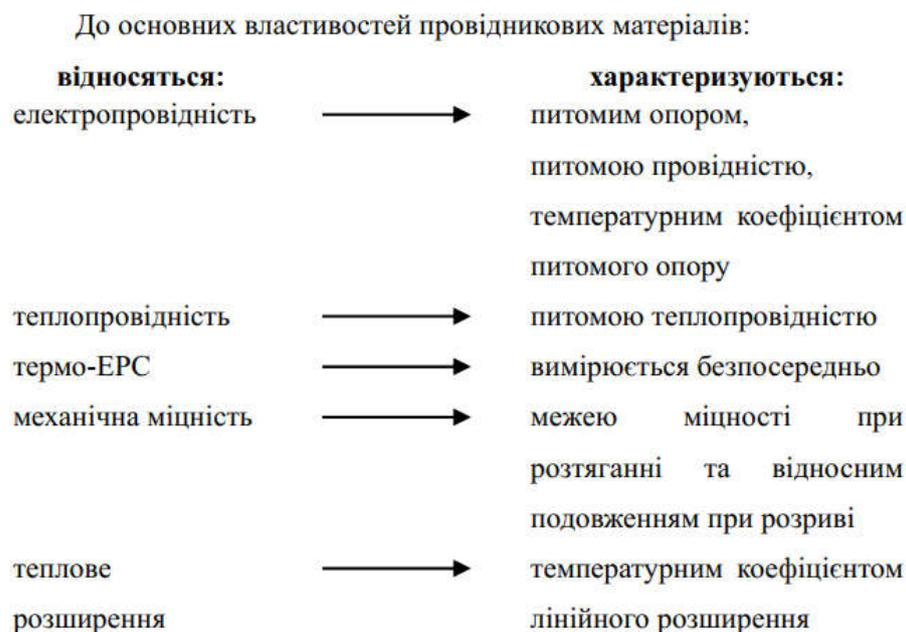


Рис. 2.2 – Властивості твердих провідників

На рис. 2.2 наведено основні властивості провідникових матеріалів та їх характеристики. Ось короткий аналіз:

1. **Електропровідність:**
 - Характеризується питомим опором, питомою провідністю, а також температурним коефіцієнтом питомого опору.
 - Ці параметри визначають здатність матеріалу проводити електричний струм, що є ключовим показником для провідникових матеріалів.
2. **Теплопровідність:**
 - Визначається питомою теплопровідністю.
 - Важлива для матеріалів, які використовуються в умовах підвищених температур, адже вона впливає на тепловідведення.
3. **Термо-ЕРС (термоелектрорушійна сила):**
 - Вимірюється безпосередньо.
 - Цей параметр враховується у матеріалах для термоелектричних генераторів або датчиків, які перетворюють теплову енергію на електричну.
4. **Механічна міцність:**
 - Оцінюється межею міцності при розтягненні та відносним подовженням при розриві.
 - Має значення для провідників, які піддаються механічним навантаженням, наприклад, в кабелях.
5. **Теплове розширення:**
 - Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення.
 - Ця властивість враховується при виборі матеріалів для роботи в умовах змінних температур, щоб уникнути деформацій.

Перераховані властивості є ключовими при виборі провідникових матеріалів для різних технічних задач, таких як електричні ланцюги, теплопроводи або компоненти, що піддаються механічним та тепловим навантаженням. Кожна характеристика важлива для забезпечення надійності та ефективності роботи матеріалу.

Також до властивостей провідників можна віднести взаємодію з щільністю струму, напругою які впливають на оптимізацію геометричних характеристики проводів та вартості матеріалів провідника.

Залежно від щільності струму в проводах втрати можуть сильно різнитися. Ясно, що при пропущенні певної потужності по лінії електропередач, наприклад для трифазної лінії $P = 3UaI$, чим більше напруга мережі, тим більше потужність при тому ж значенні струму. Оскільки втрати визначаються струмом, а передана потужність добутком струму на напругу, то вигідніше переходити на більш високі класи напруги. Тому переходять на усе більш високі напруги, щоб відносно менша частка енергії губилася в проводах. Однак, як буде розказано в лекції по діелектричних характеристиках повітря, неможливо нескінченно підвищувати напруга.

Ясно також, що чим більше струм, тим більше потужність, причому залежність лінійна. Однак з ростом струму втрати енергії ростуть квадратично, тобто набагато сильніше, чим ріст переданої потужності. Збільшення площі перетину проведення послабляє проблему, але, з іншого боку, відбувається збільшення вартості будівництва лінії електропередач, тому що вартість кольорового металу проводів значна. Крім того, збільшення ваги проводів тягне збільшення маси опор, ускладнення монтажу й т.п. У результаті компромісу між збільшенням втрат і збільшенням вартості будівництва домовилися розраховувати проведення лінії на певну компромісну щільність струму, т.зв. економічну щільність струму. Згідно із Правилами пристрою електроустановок (ПУЕ), для міді вона становить $2,5 \text{ А/мм}^2$ у випадку відкритих проводів при експлуатації 1000-3000 годин у рік, і знижується до $1,8 \text{ А/мм}^2$ при експлуатації понад 5000 години в рік. Для алюмінію всі цифри приблизно у два рази нижче. Для кабелів усе визначається умовами тепловідводу через ізоляцію й оболонку кабелів, у ПУЕ припустима щільність струму нормується для кожного виду кабелів окремо, як правило, припустима щільність струму ще нижче.

2.3. Класифікація й основні властивості провідникових матеріалів

Провідниками електричного струму можуть бути тверді тіла (головним чином метали), а також рідини і гази при певних умовах. Найбільше широко як провідники використовуються метали.

За здатністю проводити електричний струм металеві провідники умовно розділяють на **матеріали високої і низької провідності** (або, відповідно, на матеріали з низьким і високим опором).

Метали з високою провідністю (в основному це срібло, мідь і алюміній) використовуються для виготовлення проводів, кабелів, обмоток трансформаторів, електричних машин і т.д.

Метали і сплави високого опору (наприклад, ніхром) застосовуються в електронагрівальних приладах, лампах накаливання, реостатах, зразкових опорах і т.п.

До **рідких провідників** відносяться розплавлені метали і різні електроліти. При нормальній температурі тільки ртуть є рідким металевим провідником.

За фізичним механізмом струму провідники розділяють на **провідники першого і другого роду**.

Провідниками першого роду або провідниками з електронною провідністю називають матеріали, в яких механізм протікання струму зумовлений наявністю вільних електронів. При цьому механізм переносу енергії (внаслідок руху електронів або передачі імпульсу від електрона до електрона) є питанням відкритим.

Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини (в основному водні) кислот, лугів і солей, виникнення струму в яких пов'язано з рухом іонів.

Внаслідок переміщення молекул-іонів рідини склад електроліту поступово змінюється внаслідок виділення продуктів електролізу на електродах. Це зумовлює принципову різницю між провідниками першого і другого роду: в першому випадку не відбувається жодних змін хімічних і фізичних властивостей провідника внаслідок проходження електричного струму, в другому – такі зміни мають місце.

Гази і пара, у тому числі і пара металів, при низьких напруженнях електричного поля не є провідниками. Однак при деякому критичному значенні напруженості поля, що забезпечує початок ударної і фотоіонізації, газ стає провідником з електронним й іонним механізмами провідності.

Металеві провідники є основним типом провідникових матеріалів, застосовуваних в електротехніці.

Основні фізичні характеристики провідникових матеріалів:

- 1) питомий електричний опір або питома провідність;
- 2) температурний коефіцієнт питомого опору;
- 3) питома теплопровідність;
- 4) контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термо-е.р.с).

Основні механічні характеристики провідникових матеріалів:

- 1) межа міцності;
- 2) твердість, зносостійкість;
- 3) відносне видовження (звуження).

Опір провідників обчислюється за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, [\text{Ом}]$$

де ρ - питомий опір матеріалу Ом·м, l - довжина провідника, м, S - площа поперечного перерізу м².

При послідовному з'єднанні кількох опорів (R_1, R_2, \dots, R_n) загальний опір обчислюється як сума складових

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При паралельному з'єднанні кількох опорів загальний опір обчислюється наступним чином

$$\frac{1}{R_{\text{прл}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Питомий опір матеріалу для провідника з постійним поперечним перерізом S і довжиною l обчислюється за формулою

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

вимірюється в Ом·м і є найважливішою електричною характеристикою матеріалу провідників.

Діапазон питомих опорів металевих провідників досить вузький - від $0,016 \cdot 10^{-6}$ Ом·м для срібла і приблизно до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м для залізо-хромоалюмінієвих сплавів (тобто біля трьох порядків). Питомі опори чистих металів відрізняються набагато менше (табл. 9.1). Наприклад, питомі опори срібла і ртуті відрізняються у 60 разів.

Чисті метали з правильними кристалічними ґратками характеризуються найменшими значеннями питомого опору. Домішки інших металів або неметалічні домішки, спотворюючи кристалічні ґратки, зумовлюють його збільшення, оскільки на дефектах кристалічних ґрат відбувається розсіювання електронних хвиль. Зростання питомого опору спостерігається і при сплавленні двох металів, якщо вони утворюють сплав твердий розчин.

Для більшості металів існує прямий зв'язок між їх питомою теплопровідністю і питомою провідністю: чим вищою є питома теплопровідність металу, тим нижчим є його питомий опір.

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості деяких чистих металів

Метал	Питомий опір, мкОм·м	Температура плавлення, °С	Щільність, кг/м ³
Срібло	0,016	961	10 500
Мідь	0,017	1083	8 940
Золото	0,024	1063	19 300
Алюміній	0,028	657	2 700
Вольфрам	0,055	3380	19 300
Молібден	0,057	2620	10 200
Нікель	0,073	1455	8 900
Залізо	0,098	1535	7 870
Платина	0,105	1770	21 400
Палладій	0,110	1554	12 100
Олово	0,120	232	7 310
Свинець	0,210	321	11 400
Хром	0,210	1850	7 100
Титан	0,480	1725	4 500
Ртуть	0,958	-39	13 600

2.3.1. Температурна залежність опору провідників

Зі збільшенням температури в металевому провіднику посилюються коливання вузлів кристалічних ґрат, тому з'являється більше перешкод на шляху спрямованого руху електронів і їх рухливість знижується. Внаслідок цього **питомий опір чистих металів** з підвищенням температури зростає.

Типова крива зміни питомого опору міді в залежності від температури представлена на рис. 2.3.

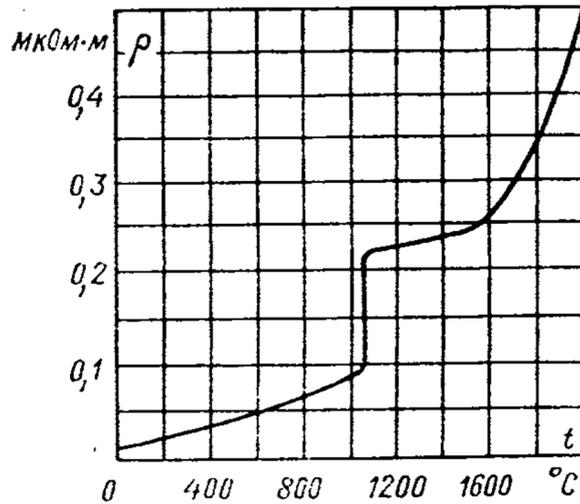


Рис. 2.3 – Залежність питомого опору міді від температури

При переході з твердого стану в рідке в більшості металів спостерігається різке збільшення питомого опору (як видно з рис. 2.3, для міді цей скачок має місце при температурі її плавлення, тобто при 1083°C). Подальше суттєве зростання питомого опору зумовлене посиленням теплового руху атомів металу.

Питомий опір більшості металів при нагріванні (розплавленні) збільшується, оскільки їх об'єм при цьому збільшується (а щільність, відповідно, зменшується). Але деякі метали при нагріванні зменшують свій об'єм (наприклад, галій, сурьма, вісмут), тому їх питомий опір при цьому також зменшується.

В діапазоні невисоких температур можна прийняти, що питомий опір залежить від температури лінійно і може бути підрахований за формулою:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha_p \Delta t),$$

де ρ_0 - значення питомого опору на початку діапазону; α_p - температурний коефіцієнт питомого опору в даному діапазоні температури Δt :

$$\alpha_p = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 \Delta t} \text{ (град}^{-1}\text{)},$$

Значення α_p чистих металів у твердому стані можна визначати за наближеною формулою:

$$\alpha_p \approx \frac{1}{273} \approx 0,0037 \text{ (град}^{-1}\text{)}$$

Виключення складають метали, що відносяться до магнетиків: залізо, нікель, кобальт і хром.

2.3.2. Надпровідність

Якщо екстраполювати залежність питомого опору від температури в область низьких температур, то при температурі, близькій до абсолютного нуля, тобто при $-273,16^\circ\text{C}$ (або 0 K), він має бути малим, але насправді при наднизьких температурах питомий опір багатьох металів практично зникає.

Електричний опір ряду металів і сплавів починає різко падати при температурах вище абсолютного нуля, в результаті чого вони переходять у надпровідний стан.

Надпровідність – явище різкого зменшення практично до нуля питомого електричного опору матеріалів при температурах близьких до абсолютного нуля. Температура, при якій матеріал переходить в надпровідний стан називається **температурою надпровідного переходу**. Матеріал, що переходить в надпровідний стан стає **надпровідником**. Температура надпровідного переходу для деяких чистих металів наведено у табл. 2.2. Срібло, мідь, золото, платину і деякі інші метали перевести у надпровідний стан не вдалося.

Таблиця 2.2 – Температура переходу деяких металів і сплавів у надпровідний стан

Метали і сплави	Температура надпровідності,	Магнітна індукція надпровідності,
Чисті метали		
Іридій	0,14	0,002
Титан	0,4	-
Молібден	1,0	-
Алюміній	1,2	0,010
Олово	3,7	0,031
Ртуть	4,2	0,046
Свинець	7,2	0,080
Ніобій	9,5	0,195
Сплави		
50%Nb+50%Ti	8,7	12,0
50%Nb+50%Zr	9,5	11,0
Хімічні з'єднання		
V ₃ Ga	14,0	50,0
Nb ₃ Sn	18,2	22,0

Деякі сплави металів мають більш високі температури переходу у надпровідний стан, ніж чисті метали (табл. 2.2). Це відкриває можливості виготовлення малогабаритних магнітів, що створюють магнітні поля великої напруженості при роботі в рідкому гелії (4,2 К). Однак виявилось, що при перевищенні деяких значеннях магнітної індукції, яка характеризує магнітне поле на поверхні надпровідника, надпровідність зникає. Як видно з табл. 2.2, значення магнітної індукції надпровідності для різних металів і сплавів відрізняються на чотири порядки.

Перспективним напрямком електротехнічного матеріалознавства є створення матеріалів з високотемпературною надпровідністю. Зокрема, сплави ніобія і титана, ніобія і цирконія, а також з'єднання **ніобію з оловом (Nb₃Sn)**, мають відносно високу температуру переходу у надпровідний стан (18,2К), оскільки ніобій характеризується найвищою з усіх чистих металів температурою переходу у надпровідний стан (9,5К).

Деякі речовини, у тому числі такі найкращі провідникові матеріали, як срібло і мідь, при найбільш низьких, досягнутих у даний час температурах перевести у надпровідний стан не вдається. Надпровідниками можуть бути не тільки сполуки і сплави металів, яким характерна надпровідність, але й сполуки, до складу молекул яких входять винятково атоми

елементів, що не є надпровідниками. На рис. 2.4 показано зміну опору при глибокому охолодженні зразків ртуті і платини, що не належить до надпровідників (по осі абсцис відкладена абсолютна температура в Кельвінах, а по осі ординат – відношення опору зразка при даній температурі R_T до опору R_{273} при температурі $T = 273 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

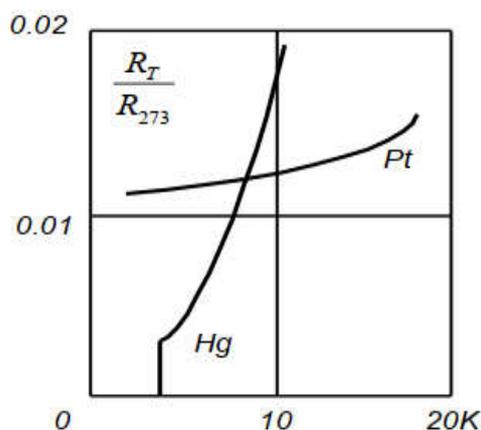


Рис. 2.4 – Зміна опору зразків ртуті і платини при глибокому охолодженні

Явище надпровідності пов'язане з тим, що електричний струм, один раз наведений у надпровідниковому контурі, буде довгостроково циркулювати у цьому контурі без помітного зменшення. Такий надпровідниковий контур створює в навколишньому просторі магнітне поле, подібно постійному магнітові, що не вимагає живлення від джерела струму.

Криогенна провідність (криопровідність) – явище досягнення низького електричного опору у провідників при криогенних температурах без переходу у надпровідний стан. Криогенні температури (низькі температури) - температури нижче 120К. Температура рідкого водню 20,3К, рідкого кисню - 54,6К, рідкого азоту - 77,4К.

Матеріали, що мають особливо сприятливі властивості для застосування їх як провідників в умовах криогенних температур, називаються криопровідниками або гіперпровідниками.

Досить мале, але все-таки кінцеве значення питомого опору ρ криопровідника при його робочій температурі обмежує припустиму густину струму в ньому, хоча ця густина може бути набагато вищою, ніж у звичайних провідниках при нормальній або підвищеній температурі. Природно, що гіперпровідники, у яких при зміні температури в широких межах питомий опір ρ змінюється плавно, без стрибків, не можуть використовуватися в ряді пристроїв, дія яких заснована на тригерному ефекті появи і руйнування надпровідності. Однак застосування криопровідників в електричних машинах, апаратах, кабелях має і свої переваги, причому досить істотні. У той час як у надпровідникових пристроях як охолодний агент застосовується рідкий гелій, робоча температура криопровідників досягається застосуванням більш висококиплячих і дешевих холодоагентів: рідкого водню або навіть рідкого азоту, це значно спрощує й здешевлює виконання та експлуатацію пристрою. Крім того, у надпровідниковому пристрої, наприклад електромагніті, по обмотці якого проходить сильний струм, накопичується велика енергія. Якщо через випадкове підвищення температури або магнітної індукції хоча б на малій ділянці надпровідникового контуру, надпровідність буде зруйнована, і раптово звільниться велика кількість енергії, що може викликати серйозну аварію. У випадку ж криопровідникового кола підвищення температури викличе лише поступове зростання опору без ефекту вибуху. Найбільший

інтерес для використання як кріопровідника, крім звичайних провідникових матеріалів – алюмінію і міді, викликає застосування берилію. Берилій значно дорожчий і складніший у технологічному відношенні. Ряд сполук берилію сильно токсичний, але берилій при охолодженні рідким азотом має найменше, в порівнянні з алюмінієм і міддю, значення ρ . Очевидно, що робота з досить дешевим рідким азотом значно простіша, ніж робота з рідким воднем. В усіх випадках для одержання кріопровідникових матеріалів потрібна висока чистота металу і неможливість наклепу. Шкідливий вплив домішок при кріогенних температурах позначається набагато сильніше, ніж при нормальній температурі. Кріопровідники можуть з успіхом використовуватися для обмоток електричних машин і трансформаторів, для струмопровідних жил кабелів тощо. У ряді випадків застосування кріопровідників досить перспективно.

2.3.3. Залежність питомого опору від деформацій

При пружному розтяганні або стиску питомий опір наближено можна розраховувати за формулою:

$$\rho_{\epsilon} = \rho(1 \pm \varphi\sigma),$$

де σ - механічне напруження; φ - коефіцієнт механічного напруження. Знак плюс у формулі відповідає деформації розтягу, а знак мінус - стиску.

Зміна питомого опору при пружних деформаціях пояснюється зміною амплітуди коливань вузлів кристалічних ґрат металів; при розтяганні збільшенням, при стиску - зменшенням.

Пластична деформація (тобто деформація, яка залишається в тілі після його розвантаження), як правило, підвищує питомий опір металів внаслідок спотворення кристалічних ґраток, утворення пор, розрихлення матеріалу. При рекристалізації (відновлення правильної кристалічної структури) шляхом термічної обробки (відпал) питомий опір може повернутись до початкового значення.

Отже, при малих ступенях стискання можуть спостерігатися деякі зменшення ρ . Це пов'язано з тим, що відбувається руйнування границь зерен, але зі зростанням ступеня деформації ρ збільшується.

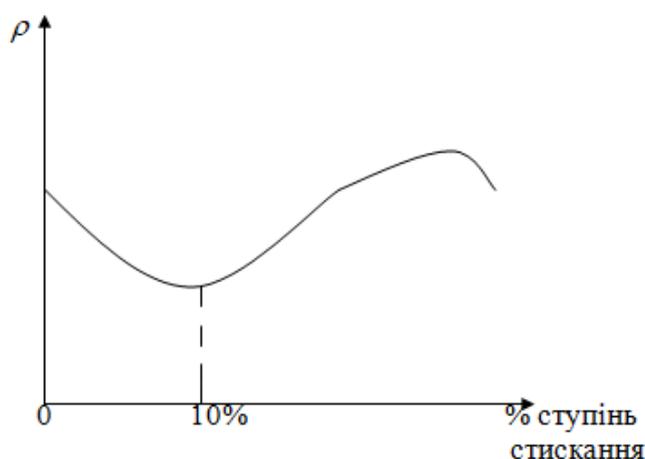


Рис. 2.5.

Питомий електричний опір наклепаного металу завжди більше ніж у відпаленому. Зворотній процес це відпал.

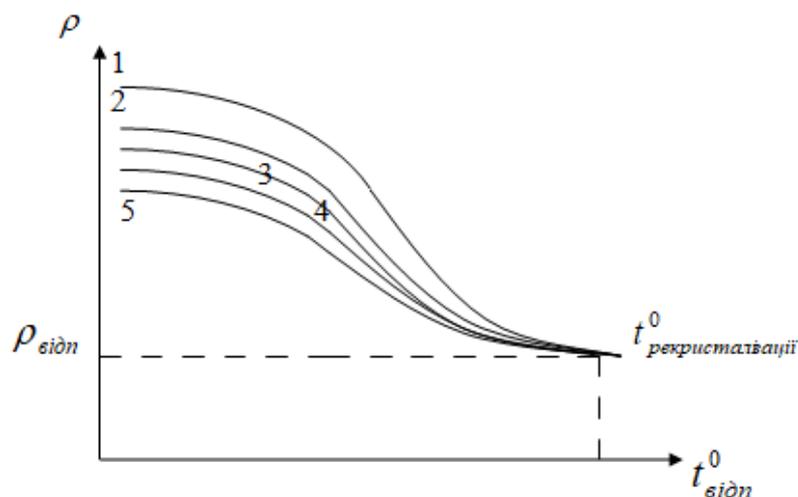


Рис. 2.6 – Залежність питомого електричного опору від температури відпалу деформованого металу: 1 - відповідає ступеню деформації 80%; 5 - відповідає ступеню деформації 20 %

Чим більше ступень деформації, тим більш різко змінюється ρ при відпалі.

При певній температурі ρ наклепаного металу = ρ відпаленого металу. Ця температура - є температурою рекристалізації. При цій температурі зняті всі напруження. Різкі зміни ρ виникають задовго до рекристалізації, що показує як зменшується напруження в матеріалі. Це явище називається відпочинком.

2.3.4. Термічна електрорушійна сила

При контакті двох різних металів між ними виникає **контактна різниця потенціалів**. Причина контактної різниці потенціалів полягає в тому, що різні метали мають різне значення роботи виходу електронів, а, отже, і різний електричний потенціал.

При спаюванні двох різних металевих провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів. Причина її появи полягає в розходженні значень роботи виходу електронів з різних металів, а також різної концентрації електронів в місті контакту. З електронної теорії металів контактна різниця потенціалів між металами А і В визначається за формулою:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B},$$

де U_A, U_B - потенціали з'єднаних металів; n_A, n_B - концентрації електронів у металах А і В; k, e , - стала Больцмана і заряд електрона.

Якщо температури «спаїв» однакові, то сума різниць потенціалів у замкнутому ланцюзі дорівнює нулеві. Коли один зі спаїв має температуру T_1 а інший – температуру T_2 , між спаями виникає термоелектрорушійна сила:

$$U = U_{AB} - U_{BA} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B} + U_A - U_B + \frac{k \cdot T_2}{e} \cdot \ln \frac{n_B}{n_A} =$$

$$= \frac{k}{e} \cdot (T_2 - T_1) \cdot \ln \frac{n_A}{n_B}.$$

Термічна електрорушійна сила (термо-е.р.с.) зумовлена різницею потенціалів контактуючих металів, а її величина прямо пропорційна різниці потенціалів і температурі контакту.

Контактна різниця потенціалів між двома металами А і В (рис. 9.2) пропорційна різниці температур спаїв T_1 і T_2 . Термоелектрорушійна сила між ними визначається формулою:

$$U = k(T_1 - T_2),$$

де коефіцієнт k є постійною для кожної пари металів і є тим більшим, чим більшою є різниця роботи виходу електронів для даної пари металів. В іншому крайньому випадку, тобто якщо ця різниця дорівнює нулю, термоелектрорушійної сили не виникає. Контактна різниця потенціалів для різних пар металів коливається в межах від мілівольт до декількох вольтів.

Явище термо-е.р.с. використовується для вимірювання температури за допомогою термопари (рис. 2.7).

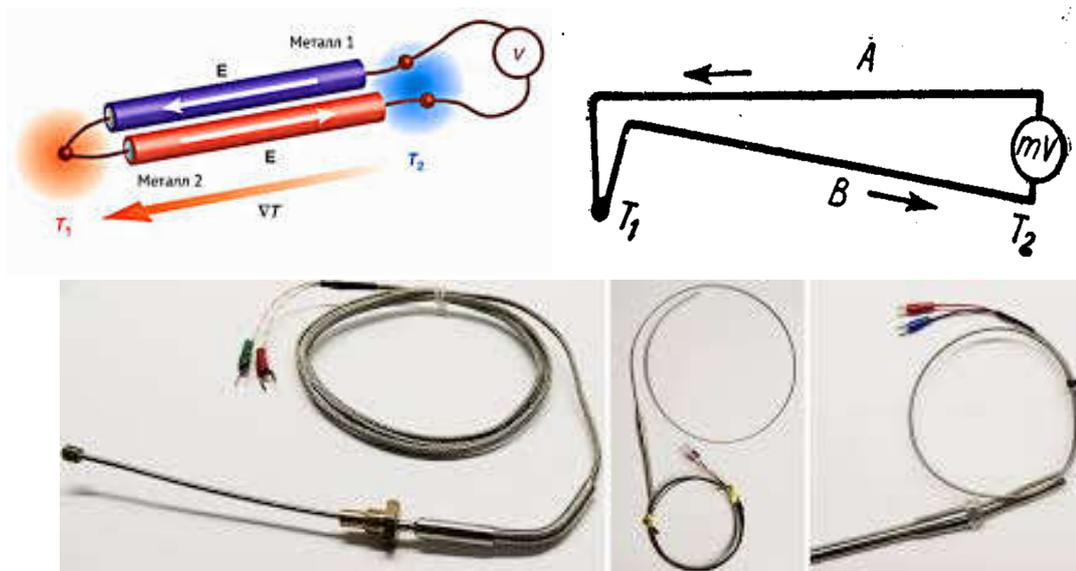


Рис. 2.7 – Схема будови термопари

Термічна електрорушійна сила (термо-е.р.с.) є важливим явищем, що виникає при контакті двох різних металів і зумовлена різницею їхньої роботи виходу електронів та концентрації електронів у зоні контакту. Величина термо-е.р.с. прямо пропорційна різниці температур між точками контакту (спаями), а також залежить від фізичних властивостей металів.

Це явище широко застосовується у техніці, зокрема для вимірювання температур за допомогою термопар. Завдяки чутливості до температурних змін, термопари використовуються у різних галузях науки й промисловості, де необхідно точно визначити температуру. Таким чином, дослідження та практичне використання термо-е.р.с. дозволяють розв'язувати важливі задачі в області вимірювань і енергетики.

Запитання для самоперевірки

1. За яким принципом класифікують провідники?
2. Назвіть основні фізичні і механічні властивості провідникових матеріалів.
3. Що таке надпровідність та криопровідність?
4. Від яких факторів і яким чином залежить питомий опір металів?
6. Що таке термоелектрорушійна сила і яким чином це явище використовується?
7. Що називають питомим електричним опором та питомою електричною провідністю?
8. Дайте означення температурного коефіцієнта питомого електричного опору.
9. Назвіть провідникові матеріали, які відносять до провідників високого опору.
10. Наведіть формулу, за якою можна визначити опір провідників довжиною l та площею поперечного перерізу S .
11. Як залежить питомий опір металевих провідників від температури та домішок?
12. Наведіть формулу залежності опору провідника від його температури.
13. Назвіть провідникові матеріали та елементи й пристрої електричних кіл, для виготовлення яких використовують дані матеріали.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал з основних понять і визначень зазначеної теми.
2. Скласти таблицю порівняльних властивостей основних провідникових матеріалів (мідь, алюміній, залізо, срібло, ніхром) за показниками: питомий опір; густина; температура плавлення; механічна міцність; сфери застосування.
3. Ознайомитися з темою «Надпровідність та криопровідність у сучасних електротехнічних матеріалах» і підготувати стислий конспект для подальшого обговорення на практичному занятті.

ТЕМА 3. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СТУПЕННЯ ПРОВІДНОСТІ

Мета: розглянути основні властивості провідників та їхню залежність від ступеня провідності, пояснити фізичну природу процесів, що визначають електропровідність, та виявити ключові чинники, які впливають на зміну провідності матеріалів.

Анотація

В темі розглянуто теоретичні основи електропровідності твердих тіл, класифікацію матеріалів за рівнем питомого опору та закономірності зміни провідності залежно від структури й складу речовини. Подано порівняльний аналіз металів високої, посередньої та низької провідності, зокрема срібла, міді, алюмінію, золота, заліза, платини та паладію. Окрему увагу приділено впливу домішок на питомий опір металів, їх механічним та корозійним властивостям, а також технологічним аспектам обробки провідникових матеріалів. Розглянуто практичне застосування різних типів провідників у сучасній електротехніці, електроніці та енергетиці — від виготовлення обмоток електричних машин до елементів високовольтних ліній електропередач. Проаналізовано особливості біметалевих провідників, сплавів міді (латуні, бронзи), а також специфіку контактних матеріалів на основі дорогоцінних металів.

Keywords: electrical conductivity, resistivity, copper, aluminum, silver, gold, iron, bimetal, alloys, high-conductivity materials.

План лекції

1. Матеріали високої і посередньої провідності;
2. Метали і сплави з високим опором.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

3.1. Матеріали високої і посередньої провідності

Провідникові матеріали умовно поділяють на матеріали високої ($\rho \leq 0,03 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), посередньої ($0,03 < \rho < 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) і низької ($\rho \geq 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) провідності.

Вони використовуються для виготовлення обмоток електричних машин, апаратів, приладів і для передачі електричної енергії. До матеріалів з малим питомим опором висуваються такі вимоги: низьке значення питомого опору та температурного коефіцієнта питомого опору; досить висока механічна міцність; здатність легко оброблятися; здатність добре зварюватися і створювати при цьому надійні сполуки з малим електричним опором; достатня корозійна стійкість. Найбільш широко застосовуються як провідникові матеріалами з високою провідністю мідь і алюміній.

3.1.1. Метали з низьким опором

До найбільш розповсюджених металів **високої провідності** відносяться мідь і алюміній. Срібло, незважаючи на найвищу провідність, а також золото не мають широкого вжитку внаслідок відносно високої вартості.

Срібло – срівато-білий метал, стійкий до окислення при нормальній температурі, має чудову віддзеркалюючу здатність. Срібло характеризується найменшим значенням питомого опору серед інших металів (див. табл. 2.1, але не переходить в надпровідний стан при наднизьких температурах. Має достатньо високу міцність (межа міцності біля 200 МПа) і високу пластичність (відносне подовження до 50%), тому з срібла можна одержати листки товщиною усього лише 0,25 мкм.



Рис. 3.1 – Зображення срібла

Срібло застосовують для виготовлення проводу і контактів, розрахованих на малі струми, а також для безпосереднього нанесення на діелектрики в якості електродів, у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів, акумуляторів. В електротехніці досить поширене сріблення. Найтоншу срібну плівку наносять не тільки заради високої віддзеркалюючої здатності, а і заради підвищення хімічної стійкості (срібло краще багатьох інших металів протистоїть дії лугів) і електропровідності виробів. Перевага срібного покриття ще і в високій і щільності (безпористі). Недоліком срібла є його схильність до міграції всередину діелектрика при безпосередньому контакті, а також більш низька хімічна стійкість срібла в порівнянні з іншими благородними металами.

Мідь – питомий опір чистої міді ($\rho=0,017\text{мкОм}\cdot\text{м}$) незначно поступається питомому опору срібла, але надзвичайно чутливий до наявності домішок. При вмісті в міді 0,5% Zn, Cd або Ag питома провідність її знижується на 5%. При тій же вмісті Ni, Sn або Al питома провідність міді падає на 25-40%. Домішки Be, Fe, Si або P знижують питому провідність до 55%.



Рис. 3.2 – Зображення міді

Мідь має високу теплопровідність, що забезпечує інтенсивний відвід тепла від електричних пристроїв. Залежність питомого опору міді від температури наведена в лекції 2.

Вміст міді в земній корі невеликий – до 0,007%. Це в 1000 разів менше, ніж алюмінію і у 600 разів менше, ніж заліза. Мідь одержують шляхом переробки сульфідних руд. Після ряду плавок руди мідь, призначена для електротехнічних цілей, проходить процес електролітичного очищення.

Широке застосування міді в електротехніці зумовлене:

- 1) малим питомим опором;
- 2) досить високою механічною міцністю і пластичністю;
- 3) задовільною корозійною стійкістю;
- 4) хорошою механічною оброблюваністю;
- 5) відносною легкістю пайки і зварювання; 6) порівняно низькою вартістю одержання.

Основні марки міді – М1 і М0 розрізняються за вмістом домішок в основному металі.

Питома провідність міді та її механічні характеристики дуже чутливі до наявності домішкових атомів (рис. 3.3). Так, 0,5 % цинку, кадмію чи срібла знижують питому провідність міді на 5 %, нікелю, олова або алюмінію на 25 - 40 %, а берилію, миш'яку, заліза, сірки та фосфору на 55 % і більше.

Одночасно домішки олова, кадмію, алюмінію підвищують твердість і міцність міді. Дуже шкідливими домішками в міді є вісмут, свинець, кисень, фосфор, сірка і водень.

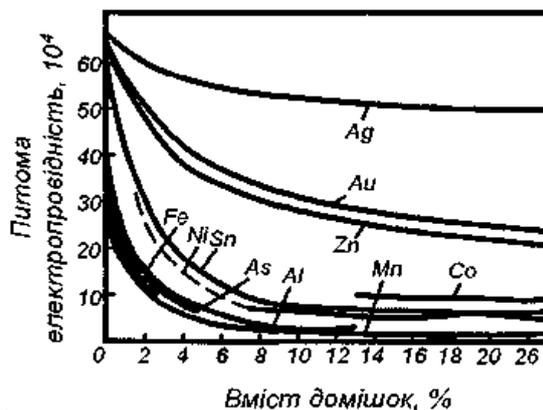


Рис. 3.3 – Вплив домішок на електропровідність міді

Мідь марки М1 містить 99,90% Cu, а в загальній кількості домішок (до 0,1%) кисню має бути не більше 0,08%. Присутність у міді кисню погіршує її механічні властивості. Кращі механічні властивості має мідь марки М0 – містить 99,95% Cu, і не більш 0,05% домішок, у тому числі до 0,02% кисню. З міді марки М0 виготовляється тонкий провід.

При холодній протяжці одержують **тверду (твердотягнуту) мідь** (маркірується МТ), що завдяки наклепу має відносно високу міцність при розтягуванні при малому відносному видовженні, а також твердість і пружність. Тверду мідь вживають, коли треба забезпечити високу механічну міцність, твердість і опір зношуванню: для виготовлення контактних проводів, шин розподільних пристроїв, пластин колекторів електричних машин і ін.

Якщо ж мідь відпалити, то вийде **м'яка (відпалена) мідь** (маркірується ММ). Вона є пластичною, має малу твердість і невелику міцність, але досить значну величину відносного видовження і більш високу питому провідність. Деякі механічні характеристики твердої і м'якої міді наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Механічні характеристики міді і алюмінію

Характеристика	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності, МПа				
Відносне видовження, %	360-390	260-280	160-170	80
	0,5-2,5	18-35	1,5-2,0	10-18

Відпал міді роблять у спеціальних печах без доступу повітря, щоб уникнути окислювання (мідь окислюється на повітрі значно повільніше, ніж залізо; інтенсивне окислювання міді відбувається тільки при підвищених температурах). З м'якої міді виготовляють мідний листовий прокат товщиною до сотих міліметра і провід діаметром до тисячних часток міліметра.

М'яку мідь у вигляді проводів круглого і прямокутного поперечного перетину застосовують головним чином як струмопровідні жили кабелів і обмотувальних проводів, де важлива гнучкість, а механічна міцність не має істотного значення. Мідною фольгою вкривають листовий гетинакс і текстоліт, отримуючи **фольгований гетинакс і текстоліт**, які використовують для виготовлення друкованих плат (рис. 3.4).

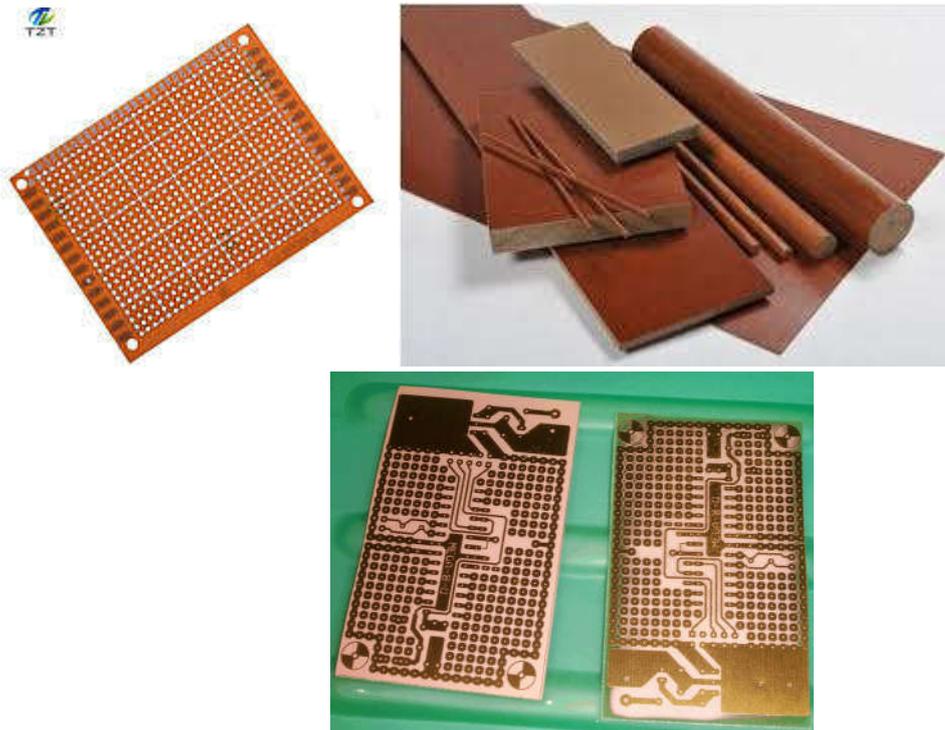


Рис. 3.4 – Вироби з фольгованого гетинаксу і текстоліту

Сплави міді – бронзи і латуні. Бронзи – сплави міді з оловом, кремнієм, берилієм, алюмінієм, хромом, кадмієм і ін. Такі сплави мають більш високі механічні властивості (межа міцності бронз досягає 800-1200 МПа), ніж мідь, але більш високий питомий опір. Бронзи широко застосовують для виготовлення струмопровідних пружин.

Кадмієву бронзу застосовують для виготовлення контактних проводів і колекторних пластин особливо відповідального призначення, оскільки, з одного боку, додавання кадмію значно підвищує механічну міцність і твердість, а з другого, кадмієва бронза є дорогим сплавом.

Латунь – сплав міді з цинком. Цинк поліпшує механічні властивості міді (її міцність, пластичність, корозійну стійкість) і при цьому здешевлює сплав. Тому вироби з латуні виготовляють штампуванням, глибокою витяжкою і т.п. Сплав міді і цинку – латунь – був отриманий набагато раніш, ніж металевий цинк. Найдревніші латунні предмети, зроблені приблизно в 1500 р. до н.е.

Алюміній – метал сріблито-білого кольору, найважливіший представник так званих **легких металів** (тобто металів із щільністю менш 5 г/см³). Щільність литого алюмінію близько 2,6 г/см³, а прокатоного - 2,7 г/см³. Таким чином, алюміній приблизно в 3,5 рази легше міді. Температурний коефіцієнт лінійного розширення, питома теплоємність і теплота плавлення алюмінію більше, ніж у міді, а температура плавлення – менша.



Рис. 3.5 – Алюміній

Приблизно 8,80% маси земної кори складаються з алюмінію – третім за поширенністю на нашій планеті елементом.

Сучасне виробництво алюмінію приблизно в 2,5 рази дешевше, ніж міді. Світове виробництво алюмінію постійно росте. Зараз воно складає близько 2% від виробництва сталі по масі.

Внаслідок високих значень питомої теплоємності і теплоти плавлення, для нагрівання алюмінію до температури плавлення і переведення в розплавлений стан потрібно витратити більше енергії, ніж для нагрівання і розплавлення такої ж кількості міді, хоча температура плавлення алюмінію нижче, ніж міді (відповідно 660 і 1083°C).

В порівнянні з міддю алюміній має нижчі як механічні, так і електричні властивості. Питомий електричний опір чистого алюмінію ($\rho=0,028$ мкОм·м) більше, ніж міді, у 1,65 рази. Алюмінієвий провід такого ж електричного опору, як і мідний, повинен мати діаметр в 1,3 рази більше діаметра мідного проводу. При цьому алюмінієвий провід буде в два рази легший мідного проводу при однаковій довжині і електричному опорі.

Добавки нікелю, кремнію, цинку або заліза до 0,5% знижують провідність алюмінію у відпаленому стані не більше ніж на 2-3%; домішки міді, срібла і магнію знижують провідність алюмінію на 5-10%. Дуже сильно знижують провідність алюмінію добавки титану і марганцю.

Алюміній широко використовується для виготовлення проводів повітряних ліній електропередач, для електричної розводки в житлових приміщеннях, а також при виробництві ізолюваних кабелів.

Марки алюмінію. Для електротехнічних цілей використовують алюміній марки А1 (містить не більш 0,5% домішок), алюміній марки АВ00 (не більше 0,03% домішок), алюміній марки АВ0000 найвищої чистоти (вміст домішок до 0,004%). Чим чистіше алюміній, тим він легший, тим вища його електропровідність, теплопровідність, пластичність, віддзеркалююча здатність. Особливо помітний ріст хімічної стійкості внаслідок більшої щільності захисної окисної плівки.

Алюміній добре обробляється тиском: прокаткою, пресуванням, штампуванням, куванням. З алюмінію АВ00 можна прокатувати тонку (до 6-7 мкм) фольгу, яка застосовується в якості обкладинок у паперових конденсаторах. З алюмінію виготовляють також електроди і корпуси електролітичних конденсаторів. Виготовляють тверді і м'які (відпалені) алюмінієві проводи. Механічні властивості твердого (АТ) і м'якого (АМ) алюмінію наведено в табл. 3.1.

Алюміній окислюється і покривається тонкою оксидною плівкою (Al_2O_3) з великим електричним опором. Ця плівка має високу механічну міцність, високу температуру плавлення ($2050^{\circ}C$) і захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів і унеможливує паяння алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію застосовуються спеціальні паста-припої або ультразвукові паяльники.



Рис. 3.6 – Зображення паяльної станції

У місцях **контакту алюмінію і міді** має місце **гальванічна корозія**. Гальванічна (контактна) корозія стосується корозійного пошкодження, коли два різні метали мають електропровідне з'єднання та контактують із спільним корозійним електролітом.



Рис. 3.7 – Гальванічна корозія

Якщо область контакту знаходиться під дією вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що струм іде від алюмінію до міді, тому саме алюмінієвий провідник руйнується корозією. Для попередження цього явища місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні ретельно захищатися від зволоження (покриттям лаками і тому подібними способами).

Для виготовлення проводів **повітряних ліній електропередачі**, використовують алюмінієві сплави з підвищеною механічною міцністю. Найбільше широко з цих сплавів

використовується **альдрей** (містить 0,30,5%Mg, 0,4-0,7%Si і 0,2-0,3%Fe). За механічною міцністю наближається до твердотягнутої міді.



Рис. 3.8 – Алюмінієвий провід для ПЛЕ

Для високовольних ліній електропередач широко застосовують **сталеоалюмінієвий провід**, що представляє собою сердечник, звитий зі сталевих жил і оповитий зовні алюмінієвим проводом.



Рис. 3.9 – Сталеоалюмінієвий провід

У проводах такого типу механічна міцність визначається сталевим сердечником, а електропровідність – алюмінієм. Збільшення діаметра проводу, що має місце в цьому випадку, зменшує можливість виникнення корони.

Золото – метал жовтого кольору, має посередню міцність (межа міцності 150 МПа), але високу пластичність (відносне видовження до 40%), досить м'який, має високу корозійну стійкість (при нагріванні вище 100°C на поверхні золота утвориться окисна плівка, яка не зникає при охолодженні до 20°C; товщина плівки дорівнює 30Å.).



Рис. 3.10 – Золото

Електрична провідність золота вища, ніж у алюмінію, але гірша, ніж у міді (див. табл. 3.1).

В електротехніці золото використовується як контактний матеріал для забезпечення корозійної стійкості покриття і стабільності перехідного електричного опору в механічних контактах точних електричних вимірювальних приладів, комп'ютерів, тощо. З золота виготовляють електроди фотоелементів і ін.



Рис. 3.11 – Використання золота в електротехніці

Зі сплавів золота зі сріблом або міддю роблять волоски гальванометрів і інших точних приладів, а також мініатюрні електричні контакти, що мають забезпечувати велику частоту замикань і розмикань без злипання контактів. У сплавах, що забезпечують найменше злипання, золоту належить особлива роль. Безвідмовно працюють сплави золота з палладієм (30%) і платиною (10%), палладієм (35%) і вольфрамом (5%), цирконієм (3%), марганцем (1%). Кращі контактні сплави є дуже дорогим, однак без них не може обійтися сучасна космічна техніка, техніка зв'язку, тощо.

3.1.2. Метали посередньої провідності

Залізо, платина і палладій відносяться до широко вживаних в електротехніці металів з посередньою провідністю.

Залізо і сталі (сплав заліза з вуглецем) - дешевий і широко розповсюджений метал, має високу механічну міцність, але низьку корозійну стійкість. Питомий опір ($\rho=0,098$ мкОм·м) майже в 6 разів вищий, ніж у міді.

Оскільки сталь є феромагнітним матеріалом, опір сталевих провідників перемінному струму є вищим, ніж постійному.

Сталь як провідниковий матеріал використовується для виготовлення коліс трамваїв, електропоїздів залізниць і метро, рейок, сердечників сталевобалюмінієвих повітряних проводів.

Біметал (провідниковий біметал, не плутати з термічним біметалом) – це сталь, покрита зовні шаром міді (рис. 3.11).

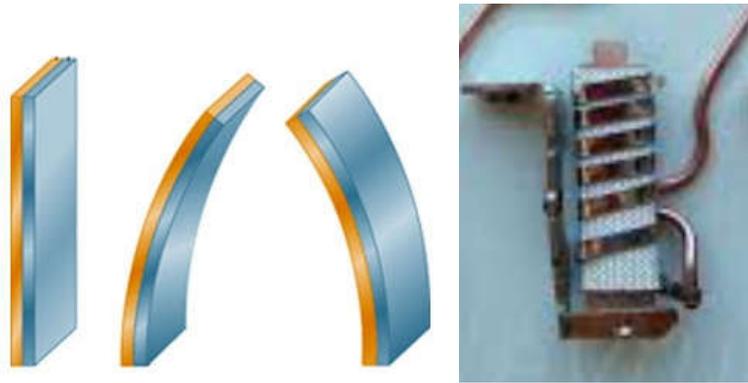


Рис. 3.11 – Зображення та приклад біметалічної пластини

Механічна міцність біметалу більше, ніж міді, але електрична провідність менше. Застосування міді в зовнішньому шарі забезпечує більш високу провідність біметалу при перемінному струмі і захист стали від корозії. Такий провід застосовують для ліній зв'язку, ліній електропередачі, у потужних підсилювачах і т.п. Із провідникового біметалу виготовляються шини для розподільних пристроїв, конструктивні елементи рубильників і різні струмопровідні частини електричних апаратів.

Розрахунок опору біметалевого провідника (сталь (с) – мідь (м)):

$$\frac{1}{R_{m+c}} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_c}; \Rightarrow R_{m+c} = \frac{R_m R_c}{R_m + R_c};$$

$$R_m = \frac{4l\rho_m}{\pi(d_m^2 - d_c^2)}; \quad R_c = \frac{4l\rho_c}{\pi d_c^2};$$

$$R_{m+c} = \frac{4l}{\pi} \left(\frac{d_c^2}{\rho_c} + \frac{d_m^2 - d_c^2}{\rho_m} \right)^{-1}.$$

Наприклад, якщо довжина провідника $l = 1\text{ м}$, діаметри відповідних його складових $d_m = 0,01\text{ м}$ і $d_c = 0,005\text{ м}$, а питомі опори міді і сталі $\rho_m = 0,017 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_c = 0,098 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, то $R_{m+c} = 2,728 \cdot 10^{-4}\text{ Ом}$, а $R_m = 2,886 \cdot 10^{-4}\text{ Ом}$, тобто опір біметалу в даному випадку на 6% нижчий, ніж суцільно мідного провідника.

Платина – метал, що практично не реагує з киснем і є досить стійким до хімічних реагентів. Платина добре механічно обробляється, витягується в дуже тонкі нитки і стрічки (відносно видовження 30-35%). Механічна міцність така ж, як у золота (рис. 3.12).



Рис. 3.12 – Зображення платини

Платину застосовують для виготовлення термопар (рис. 3.13) на робочі температури до 1600° С (у парі з платинородієм).



Рис. 3.13 – Зображення термопар

Особливо тонкі нитки з платини діаметром 0,001 мм використовують для виготовлення підвісок рухливих систем в стрілочних і інших чутливих приладах.

Внаслідок малої твердості платина рідко застосовується для виготовлення контактів у чистому виді, але є основою ряду контактних сплавів. Найбільш поширені сплави платини з іридієм. Вони не окислюються, мають високу твердість, малий механічний знос, допускають велику частоту механічних контактів, однак є дорогими і застосовуються тільки для виготовлення відповідальних пристроїв.

Паладій - за багатьма властивостям близький до платини й у ряді випадків служить її заміником. Межа міцності 200МПа, відносне видовження до 40%. Має високу корозійну стійкість: на паладій при нормальній температурі не діє навіть фтор.



Рис. 3.13 – Зображення пладію

Паладій використовують у електровакуумній техніці для поглинання водню. При кімнатній температурі один одиниця об'єму паладія вбирає в себе до 950 одиниць об'єму водню. При цьому він розрихлюється і розтріскується. Підвищена здатність до газопоглинання характерна для всього класу платинових металів.

Паладій і його сплави зі сріблом і міддю застосовуються як контактні матеріали.

3.2. Метали і сплави з високим опором

До провідникових матеріалів з високим опором умовно відносять метали і сплави з питомим електричним опором $\rho \geq 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

При використанні цих сплавів для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів, крім високого питомого опору ρ , потрібні також висока стабільність ρ у часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору $\alpha\rho$ і малий коефіцієнт термо-е.р.с. у парі

даного сплаву з міддю. Сплави для електронагрівальних елементів повинні довгостроково працювати на повітрі при високих температурах (до 1000 °С і навіть вище). Крім того, у багатьох випадках потрібна технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкого проводу, іноді досить тонкого, діаметром до сотих часток міліметра. Бажано, щоб сплави, які використовуються для приладів, вироблених у великих кількостях (реостатів, електроплиток, електричних чайників, паяльників тощо), були дешевими і, за можливістю не містили дефіцитних компонентів.

3.2.1. Метали високого опору

Титан – має високу механічну міцність, співставну з міцністю кращих сталей, і надзвичайно високу в'язкість руйнування. При цьому щільність титану майже вдвічі нижча, ніж щільність заліза. Корозійно стійкий. Тому використовується для виготовлення відповідальних елементів конструкцій.



Рис. 3.14 – Зображення титану

Лише три технічно важливих у сучасному світі метали – алюміній, залізо і магній – поширені в природі більше, ніж титан.

Серед чистих металів титан має найбільший електроопір, поступаючись лише ртуті. Питомий опір титану у 28 раз більший, ніж у міді. Домішки титану сильно знижують провідність алюмінію. Титан є немагнітним металом.

Широке практичне застосування має сполука титану і барію (титанат барію $BaTi_3$) – один з найважливіших сегнетоелектриків. П'єзокристали титанату барію за багатьма характеристикам перевершують такі розповсюджені п'єзоелектрики, як кварц і сегнетова сіль **п'єзоелектрики** – матеріали, при механічному деформуванні яких на їх поверхні утворюється електричний заряд) (рис. 3.15-3.16).

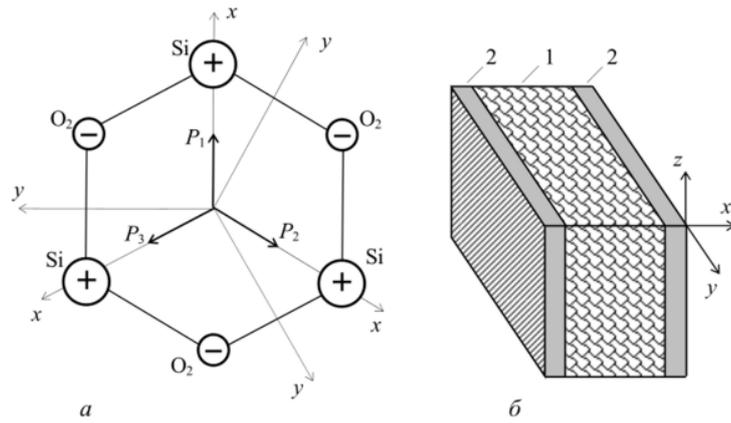


Рис. 3.15 – Елементарна комірка кристалічної структури п'єзоелектрика (а) і п'єзоелемент на основі кварцу (б): 1 - кристал; 2 - електроди

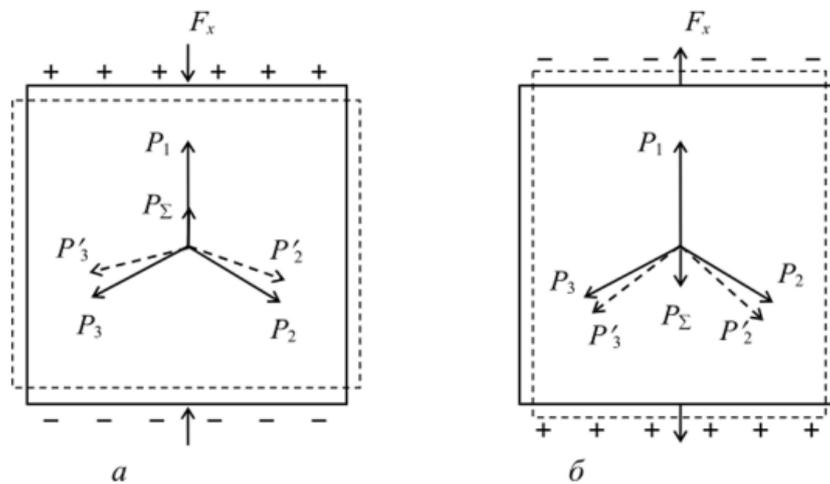


Рис. 3.16 – Деформація стиснення (а) і розтягування (б) п'єзоелемента уздовж електричної осі

Ртуть – метал (рис. 3.17), що знаходиться в рідкому стані при нормальній температурі і перетворюється у тверде тіло при охолодженні до $-38,9^{\circ}\text{C}$. Її добувають із сірчистого з'єднання червоної кіноварі. Ртуть легко випаровується і має значний тиск пари при кімнатній температурі. Пари ртуті отруйні.



Рис. 3.17 – Зображення титану

Питомий електричний опір ртуті є найбільшим з відомих металів (див. табл. 2.1) і перевищує опір міді майже у 60 разів. Ртуть – перший з відкритих надпровідників. У 1911 р. голландський учений Гейке Камерлінг-Оннес, досліджуючи електропровідність ртуті, помітив, що при досягненні температури 4,12°К опір ртуті практично зникає. Так було відкрите явище надпровідності.

Ртуть хімічно стійкий метал: вона окислюється на повітрі лише при температурах, близьких до температури її кипіння (357°С), і слабо взаємодіє з воднем, окисом вуглецю й азотом.

Лужні, лужно-земельні метали, магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій, платина, золото і срібло розчиняються у ртуті, утворюючи тверді або рідкі розчини – **амальгами** (сплави). Деякі з них, наприклад амальгами срібла і кадмію, хімічно інертні і тверді при температурі людського тіла, але легко розм'якшуються при нагріванні. Амальгаму талля, що затвердіває лише при – 60°С, застосовують в спеціальних конструкціях низькотемпературних термометрів.

Ртуть застосовують як рідкий катод у промислових ртутних випрямлячах електричного струму. Дотепер їх використовують у багатьох електрохімічних виробництвах і на транспорті з електричною тягою, хоча останнім часом їх витісняють більш економічні і нешкідливі напівпровідникові випрямлячі.

Видиме світіння парів ртуті використовують в конструкціях потужних ламп освітлення, у лампах денного світла (лампи денного світла – це газорозрядні трубки, у яких знаходяться інертні гази і пари ртуті). Ртуть використовують також для виготовлення ртутних контактів у реле, ртутних електродів при вимірюванні електричних властивостей твердих діелектриків.

3.2.2. Сплави високого опору

Сплави високого опору застосовуються при виготовленні електровимірювальних приладів, зразкових опорів, реостатів і електронагрівальних приладів. В усіх цих випадках від провідника потрібно можливо більший питомий опір.

Для сплавів високого опору при їхньому використанні в електровимірювальних приладах і зразкових опорах важлива також слабка залежність питомого опору від температури і мала термо-ε.р.с. відносно міді. Сплави для електронагрівальних приладів повинні бути довговічними при роботі на повітрі при температурах порядку 1000°С, технологічними при виготовленні з них тонкого проводу і відносно недорогими.

Найбільш поширеними є високоомні **сплави на мідній основі** (манганін і константан), а також на **хромо-нікелевій** і **залізо-хромовій** основі з додаванням алюмінію.

Манганін – сплав на основі міді (Cu – 86%; Mn – 12%; Ni – 2%). Питомий опір у 25 разів вище, ніж у міді. Відрізняється характерним жовтуватим відтінком. Добре витягується в тонкий провід діаметром до 0,02 мм. Має високу термічну стабільність і незначну термо-ε.р.с. в парі з міддю (табл. 3.2).

Найбільша допустима робоча температура для сплаву – 200°С. Використовується у електровимірювальних приладах і для виготовлення зразкових резисторів.

Константан – сплав міді і нікелю (Cu – 55%; Ni – 45%). Питомий опір у 28 разів вище, ніж у міді, і практично не залежить від температури (табл. 3.2).

Тому константан застосовують для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів. Робоча температура сплаву до 450°C (при нагріванні до більш високих температур окислюється).

Константан у парі з міддю або залізом зумовлює виникнення значної термоелектрорушійну силу. Це є недоліком при використанні **константанових резисторів** у вимірювальних схемах, оскільки за рахунок різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають небажані термоелектрорушійні сили. Константан застосовують також для виготовлення термопар, призначених для вимірювання невисоких температур (декілька сот градусів), а також **тензорезисторів** (пристроїв для вимірювання деформацій).

Сплави на основі заліза-нікеля-хрома – використовуються переважно для виготовлення електронагрівальних пристроїв. Висока нагрівостійкість таких сплавів зумовлена додаванням нікеля, хрома і алюмінію. Чим більша частка заліза у сплаві, тип менш нагрівостійким є сплав.

Таблиця 3.2. – Фізичні властивості металів і сплавів високого опору

Метал, сплав	Питомий опір, мкОм·м	Температурний коефіцієнт електроопору, К ⁻¹	Коефіцієнт термoe.р.с. при контакті з міддю, мкВ/К
Манганін	0,42-0,48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	1-2
Константан	0,48-0,52	$-(5-25) \cdot 10^{-6}$	45-55
Титан	0,480	$33 \cdot 10^{-4}$	-
Ртуть	0,958	$9 \cdot 10^{-4}$	-
Ніхром	1,0-1,1	$(100-200) \cdot 10^{-6}$	-
Ферроніхром	1,1-1,2	$(100-200) \cdot 10^{-6}$	-
Фехраль	1,2-1,35	$(100-120) \cdot 10^{-6}$	-
Хромаль	1,3-1,5	$65 \cdot 10^{-6}$	-

Залізо-хромо-нікелеві сплави (ферроніхром: Ni – 60%; Cr – 18%; Fe – 20,5%; Mn – 1,5%; ніхром: Ni – 75%; Cr – 21%; Fe – 3,5%; Mn – 1,5%). Питомий опір у 60 разів вище, ніж у міді. У діапазоні температур від 0 до 1000°C питомий опір ніхрома збільшується не більше ніж на 10% (рис. 3.18). Використовуються для виготовлення нагрівальних елементів, електричних печей, плиток, паяльників і т.д. З цих сплавів виготовляють провід діаметром від 0,02 мм і фольгу товщиною 0,1 мм.

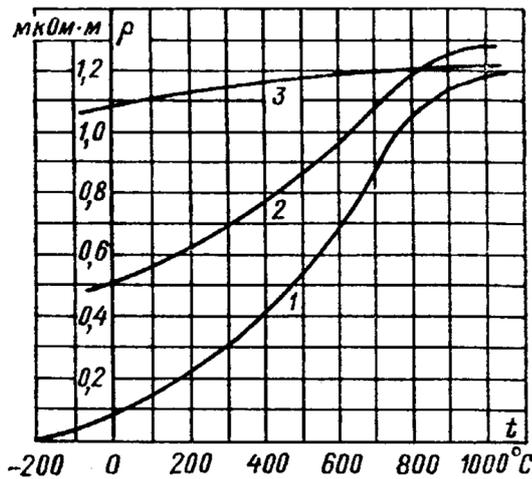


Рис. 3.18 – Температурні залежності питомого опору для: 1 – чистого заліза; 2 – сплаву Fe^{+40%}Si; 3 – сплаву Fe+Ni+Cr

Мають високу жаростійкість. Причина стійкості залізо-хромі-нікелевих сплавів при високій температурі на повітрі є, по-перше, нелетючість окислів, по друге, близькі значення температурних коефіцієнтів лінійного розширення сплаву і його оксидної плівки. **Тому останні не розтріскуються і не відскакують від проводу при постійній температурі.** Однак при різких змінах температури внаслідок невеликої відмінності температурних коефіцієнтів розширення сплаву й окислів хрому і нікелю відбувається розтріскування шару окислу. При наступному нагріванні кисень проникає в тріщини і окислює більш глибокі шари сплаву. Тому при багаторазовому вмиканні-вимиканні електронагрівального елемента з ніхрому він перегорє швидше, ніж у випадку безперервного режиму нагрівання (термін служби відрізняється в 20-30 разів).

Збільшення терміну служби нагрівальних елементів досягається закладенням спіралей у інертне середовище типу глини-шамоту або в герметичні трубки (**тени**), що захищає їх від механічних впливів і від доступу кисню.

Залізо-хромі-алюмінієві сплави (фехраль: 12-15%Cr; 3,5-5,5%Al; Fe; хромаль: 23-27%Cr; 4,5-6,5%Al; Fe). Питомий опір у 70 разів вище, ніж у міді. Вони є більш дешевими сплавами, застосовуються для потужних електронагрівальних пристроїв і промислових печей. У порівнянні з хромі-нікелевими сплавами ці сплави більш тверді і крихкі, виготовлення з них проводів і стрічок утруднене.

Розрахунок потужності нагрівального приладу при постійному і перемінному струмі:

Постійний струм: $W = U \cdot I = U^2 / R$.

Перемінний струм: $W = U \cdot I \cdot \cos\phi$ (ϕ – зсув фаз між напругою і струмом; $\cos\phi$ – коефіцієнт потужності).

У випадку постійного струму: $R = \frac{U}{I}$; $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{4l\rho}{\pi D^2}$ (D – діаметр проводу). Тоді довжина провідника, на якому буде виділятися енергія W буде обчислюватись за формулою

$$l = \frac{\pi D^2 U^2}{4\rho W}$$

Наприклад, якщо $W = 1000$ Вт, $U = 220$ В, $D = 0,5$ мм довжина мідного провідника $l_M = 559,0$ м, а довжина провідника з ніхрому $l_N = 8-9$ м. При $D = 0,1$ мм довжина мідного провідника зменшується до $l_M = 25,4$ м.

Розрахунок втрат енергії при передачі постійного струму на великі відстані.

Алюмінієвий (а) витий провід з n жил на сталевому осерді (s):

$$\frac{1}{R_{a+s}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_s}; \Rightarrow R_{a+s} = \frac{R_a R_s}{n R_s + R_a};$$
$$R_{a+s} = \frac{4l}{\pi} \left(\frac{n d_a^2}{\rho_a} + \frac{d_s^2}{\rho_s} \right)^{-1}.$$

Наприклад, якщо $l = 100$ км = 10^5 м, $n = 8$, $d_a = 0,003$ м, $d_s = 0,005$ м, $\rho_a = 0,028 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\rho_s = 0,098 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $U = 120$ кВ, то $W = 3,2 \cdot 10^8$ Вт. При $U = 500$ кВ, $W = 5,5 \cdot 10^9$ Вт = 5500 МВт.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні метали низької провідності і їх характерні особливості.
2. Що таке амальгами і де вони використовуються?
3. Властивості та застосування сплавів високого питомого опору.
4. Чому в електровимірювальних приладах і зразкових опорах необхідний низький температурний коефіцієнт питомого опору і мала термо-е.р.с. відносно міді?
5. Назвіть метали з найвищою провідністю.
6. Як домішки впливають на питомий опір міді і алюмінію?
7. Що таке біметал і де він використовується?
8. В яких випадках в електротехніці застосовують срібло?
9. Назвіть основні переваги і застосування золота, платини і палладія.
10. Дайте означення температурного коефіцієнта питомого електричного опору.
11. Назвіть провідникові матеріали, які відносять до провідників високого опору.
12. Наведіть формулу, за якою можна визначити опір провідників довжиною l та площею поперечного перерізу S .
13. Як залежить питомий опір металевих провідників від температури та домішок?
14. Назвіть провідникові матеріали та елементи й пристрої електричних кіл, для виготовлення яких використовують дані матеріали.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал лекції з питань класифікації провідникових матеріалів за ступенем провідності.
2. Самостійно опрацювати матеріал про вплив домішок, температури та структури металу на електропровідність.
3. Скласти таблицю порівняльних властивостей провідників за параметрами: питомий опір, густина, механічна міцність, температура плавлення, корозійна стійкість.
4. Опрацювати додаткову літературу з теми: «Залежність електропровідності металів від температури та домішок» та підготувати короткий конспект основних положень.

ТЕМА 4. АНАЛІЗ СПЕЦІАЛЬНИХ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти із провідниковими матеріалами

спеціального призначення, їх характеристиками, областями застосування та особливостями вибору для конкретних технічних завдань.

Анотація

Тема присвячена вивченню властивостей та застосування спеціальних провідникових матеріалів, що використовуються в електротехнічних пристроях та системах. Розглянуто класифікацію і характеристику матеріалів, які мають особливі фізико-хімічні та електричні властивості, необхідні для роботи в складних умовах експлуатації. В даній темі детально описано сплави спеціального призначення — ніхром, константан, манганін, фехраль, а також матеріали для виготовлення термопар, контактів і електровугільних виробів. Наведено основні вимоги до таких матеріалів, принципи їх вибору для різних галузей електротехніки, приклади практичного використання в нагрівальних елементах, вимірювальних приладах та колекторних вузлах електричних машин.

Keywords: special conductive materials, alloys, thermocouples, electric coal products, electrical engineering, properties, applications.

План лекції

1. Сплави спеціального призначення;
2. Сплави для термопар;
3. Електротехнічне вугілля.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

4.1. Сплави спеціального призначення

Вольфрам – важкий метал сірого кольору, вміст якого в земній корі оцінюється в 0,0055%. Технічно чистий вольфрам плавиться при 3410°C, а кипить при 6690°C. Має високу твердість. Щільність у 1,7 рази більше, ніж у свинцю.



Рис. 4.1 – Зображення вольфраму

Сильно окислюється (добре реагує з киснем при нагріванні і особливо легко – у присутності парів води), тому використовується лише в глибокому вакуумі або в атмосфері інертного газу (азот, аргон і т.п.).

Вольфрам застосовують також для виготовлення контактів через малий механічний знос внаслідок його високої твердості. Псевдосплави вольфраму з міддю і сріблом – чудовий матеріал для виготовлення рубильників і вимикачів електричного струму високої напруги: вони служать у шість разів довше звичайних мідних контактів (для отримання цього псевдосплаву вольфрамовий порошок пресують і спікають, а отриману таким шляхом пористу заготовку просочують рідким розплавом міді і срібла).

Вольфрам є одним з найважливіших матеріалів електровакуумної техніки, використовується для виготовлення ниток ламп накаливання (запропонована Лодигінім у 1872 році; вдосконалена Едісоном у 1879 році). Незамінність вольфраму для виготовлення електролампочок розжарювання зумовлене не тільки його тугоплавкістю, але і пластичністю. З одного кілограма вольфраму витягається дріт довжиною 3,5 км, а цього досить для виготовлення ниток накаливання 23 тис. 60-ватних лампочок.

Сплав вольфраму, нікелю і міді (важкий метал) служить для виготовлення контейнерів, у яких зберігають радіоактивні речовини (рис. 4.2). Його захисна дія на 40% вище, ніж у свинцю.

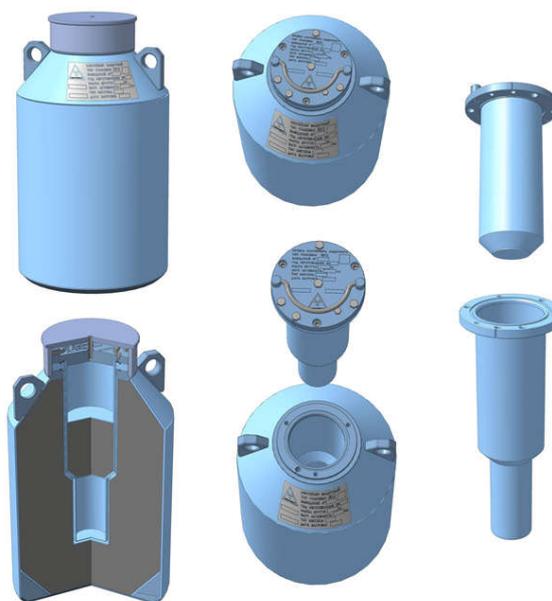


Рис. 4.2 – Зображення контейнерів для зберігання радіоактивні речовини

Молібден – за зовнішнім виглядом, а також за технологією обробки близький до вольфраму. При нагріванні чистий молібден починає реагувати з киснем (окислюється: при температурі близько 500°C перетворюється на окисел цілком), тому розжарювані деталі з молібдену повинні працювати у вакуумі.



Рис. 4.3 – Молибден

Молибден застосовується як матеріал для електричних контактів (рис. 4.4).



Рис. 4.4 – електричні контактори з молибдену

Якщо впаяти вольфрамову нитку в скляний стержень в центрі лампочки, то він незабаром трісне через теплове розширення нитки. Тому вольфрамові нитки накаливання підвищують на молибденових гачках, впаяних у скло, тому що у молибдену мізерно малий коефіцієнт теплового розширення.

Молибден застосовують у електровакуумній техніці, але при менш високих температурах, ніж вольфрам. До вакуумних приладів електричний струм підводиться через молибденові прутки, впаяні в спеціальне скло, що має однаковий з молибденом коефіцієнт теплового розширення (молибденове скло). Молибденовий дріт може служити обмоткою в високотемпературних (до 2200°C) індукційних печах, але не в окисному середовищі.

Молибден добре прокатується в тонкі листи товщиною 0,1...0,2 мм, які здатні витримати сильне нагрівання. Тому він виявився гарним матеріалом для анодів радіоламп. Молибденом користуються також для очищення дорогих (зазвичай це аргон і неон) газів від домішок кисню. Для цього аргон або неон пропускають над нагрітою до 600...900°C молибденовою поверхнею, яка і поглинає кисень.

Великий вплив на швидкість окислювання металів справляє здатність окислу до летючості.

Летючий окисел випаровується з поверхні металу, не захищаючи метал від подальшого окислювання. Окисли вольфраму і молибдену летючі, тому вони не можуть довгий час працювати в присутності кисню.

Нелетючий окисел утворює стійкий шар на поверхні металу, який захищає його від подальшої корозії (наприклад, окисел алюмінію або ніхрому, рис. 4.5).

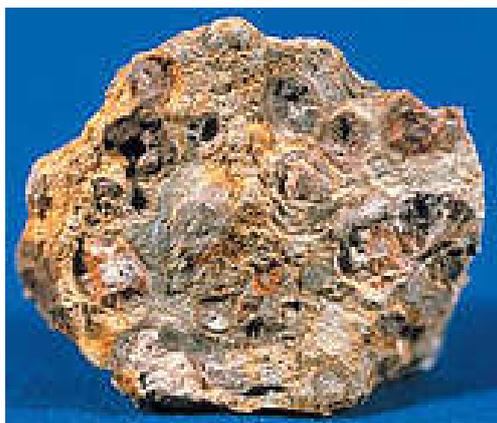


Рис. 4.5 – Окисел алюмінію

Нікель – сріблясто-білий метал (рис. 4.6), легко піддається всім видам механічної обробки: куванню, пресуванню, прокатці, штампуванню, волочінню і т.п. З нікелю можуть бути виготовлені різні за розмірами і складності конфігурації вироби. Жаростійкий, хімічно пасивний при нагріванні, стійкий до окислення, тому часто використовується в якості антикорозійних (в тому числі і декоративних) захисних покриттів.



Рис. 4.6 – Нікель

Широко застосовується у електровакuumній техніці. З нього виготовляють провідникові тримачі, сітки, аноди, екрани і ряд інших деталей. Тут важливо, що пари нікелю не впливають на глибокий вакуум лампи.

Під дією зовнішнього магнітного поля нікель деформується (скорочується). Це явище було названо магнітострикцією (рис. 4.7).

Магнетострикція - явище, яке полягає в тому, що при зміні стану намагніченості тіла його об'єм і лінійні розміри змінюються. Наприклад, зміна форми або розмірів тіл (з нікелю, легovanого залізонікелевого, залізокобальтового або залізоалюмінієвого сплаву, нікелевого фериту тощо) при намагнічуванні й розмагнічуванні їх, що викликана зміною взаємозв'язків між атомами в кристалічній ґратці.

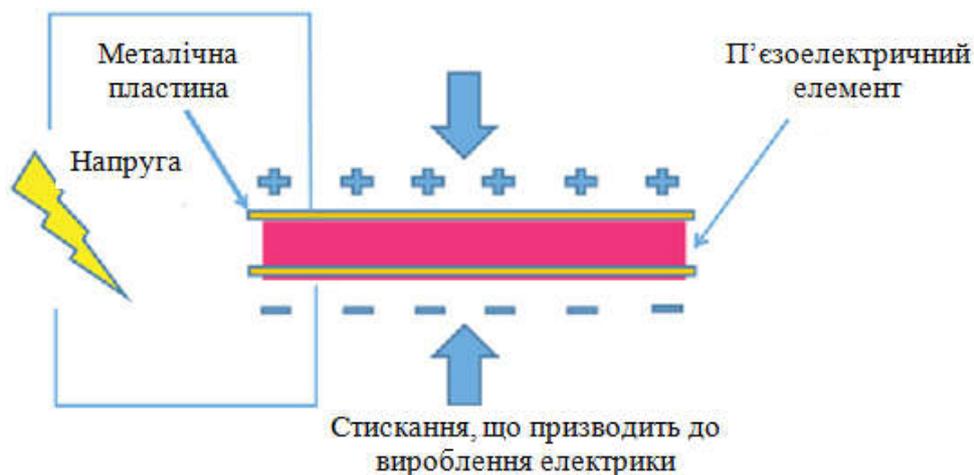


Рис. 4.7 – Зображення явища магнітоскрибція

Тому стержень з нікелю в перемінному магнітному полі високої частоти стає джерелом ультразвуку. Дуже важливим в електротехніці є магнітний сплав заліза і нікелю – пермаллой (FeNi_{13}). Сердечники з пермаллою є в будь-якому телефонному апараті, а тонкі пермаллойні плівки – головний елемент запам'ятовуючих пристроїв обчислювальних машин.

Окиснонікелеві електроди використовують при виготовленні лужних акумуляторів, оскільки електроди на основі окислів нікелю мають великий позитивний заряд, стійки в електроліті, добре обробляються, порівняно недорогі і довго служать.

Сплави нікелю, зокрема **ніхром і ферроніхром**, застосовують для виготовлення нагрівальних елементів (див. рис. 4.8).



Рис. 4.8 – Зображення нагрівальних елементів

Свинець – метал сіруватого кольору, що дає на свіжому зрізі сильний металевий блиск, але потім що швидко тьмяніє внаслідок поверхневого окислювання. М'який, пластичний (відносне видовження 55%) і легкоплавкий метал (температура плавлення 327°C). Має високий питомий електричний опір (у 12 разів вищий, ніж у міді) і щільність (у 1,3 разів більше, ніж у міді).

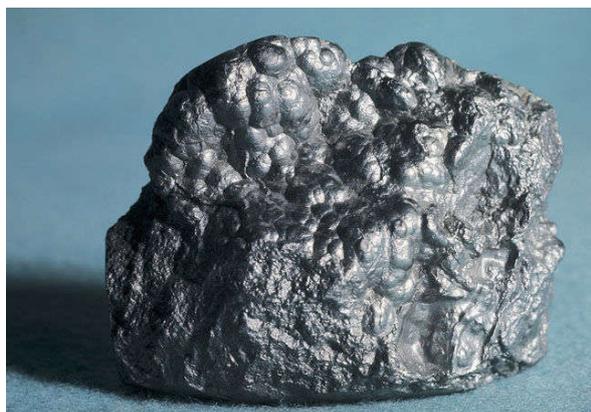


Рис. 4.9 – Зображення свинцю

Свинець був одним з перших металів, переведених у стан надпровідності. Зі свинцю була зроблена обмотка першого надпровідного трансформатора, побудованого у 1961 р.

Перевагою свинцю є його висока антикорозійна здатність, він стійкий до дії води, сірчаної і соляної кислот (на холоді) і ряду інших реагентів (тому широко використовується у сірчаноокислій промисловості). Однак азотна, мурашина і оцтова кислоти, органічні речовини, що гниють, вапно і деякі інші з'єднання його руйнують.

Свинець інтенсивно поглинає радіоактивне випромінювання, 15 – 20 сантиметрового шару свинцю досить, щоб захистити людей від дії рентгенівського випромінювання. Свинець і його сплави у великих кількостях застосовують як оболонки, що захищають ізоляцію кабелів від проникнення в неї вологи (останнім часом свинцева оболонка замінюється більш дешевою з полівінілхлоридного пластикату). Багато свинцю йде і на виготовлення легкоплавких сплавів (з вісмутом, оловом і кадмієм) для електричних запобіжників, а також пластин свинцевих акумуляторів (сплав свинцю з вісмутом) і т.д.

У гальванотехніці хромові ванни з гарячим електролітом зсередини облицьовують свинцем. Окисел свинцю (PbO) є одним з кращих **сикативів** (прискорювачів висихання масел).

Свинець і його з'єднання отруйні. Необхідно запобігати попаданню свинцю в організм людини.

Олово – один з металів, відомих людині ще з доісторичних часів. Олово і мідь були відкриті раніш заліза, а їх сплав, бронза, – найперший сплав, виготовлений людиною. Сріблито-білий метал, що має виражену кристалічну структуру. При згинанні палички олова чутний тріск, викликаний тертям кристалів. Олово – м'який, тягучий метал, що дозволяє одержувати шляхом прокатки тонку фольгу. Температура плавлення 232°C.



Рис. 4.10 – Зображення олова

При низькій температурі на білому олові з'являються сірі плями (виділення сірого олова), що одержали назву "олов'яної чуми" (**поліморфне** перетворення олова). При нагріванні сіре олово знову переходить у біле.

При звичайній температурі олово на повітрі не окислюється, вода на нього не впливає, а розведені кислоти діють дуже повільно.

Олово використовують як захисні покриття металів (лудіння). Воно входить до складу бронз і сплавів для пайки. Станіоль – тонка олов'яна фольга (6-8 мкм), що застосовується у виробництві деяких типів конденсаторів.

Цинк - світлий метал, при кімнатній температурі крихкий, при нагріванні до 100°C стає тягучим і пластичним, а при подальшому нагріванні (понад 200°C) знову охрупчується. Використовується як захисне покриття (на антикорозійний захист сталі йде 40% світового виробництва цинку), складова частина латуней і електродів гальванічних елементів, а також для металізації папера в малогабаритних металопаперових конденсаторах.



Рис. 4.11 – Зображення цинку

Хімічні сполуки цинку (селеніди, теллуриди, антимопід і арсенід) – серед найбільш широко застосовуваних напівпровідникових матеріалів. Сульфід цинку застосовують для покриття світних екранів телевізорів, осцилографів, рентгенівських апаратів. З'явилися акумулятори з електродами зі срібла і цинку.

Припої – спеціальні сплави, що застосовуються при пайці. Пайка здійснюється або з метою створення механічно міцного (іноді герметичного) шва, або з метою одержання електричного контакту з малим перехідним опором.

Припій змочує метал, розтікається по ньому і заповнює зазори між деталями, що з'єднуються. Припоєю дифундує в основний метал і розчиняє його, в результаті чого утворюється проміжний прошарок, який після застигання з'єднує деталі.

Припої поділяють на дві групи - м'які і тверді. До м'яких відносять припої з температурою плавлення до 400°C. До твердих - з температурою плавлення вище 500°C.

М'якими припоями є олов'яно-свинцеві сплави (ПОС) з вмістом олова від 18% (ПОС-18) до 90% (ПОС-90). Питома провідність цих припоїв складає від 9 до 13% питомої провідності чистої міді. Існують також м'які припої з добавками алюмінію, срібла. Ще більш легкоплавкими є припої, до складу яких входять, крім олова і свинцю, вісмут і кадмій (сплав Вуда: 50% Ві, 25% Рь, 12,5% Sn, 12,5% Cd з температурою плавлення 68°C; був винайдений англійським інженером Вудом у 1860). Вони застосовуються там, де потрібна знижена температура пайки.

Найбільш вживані срібні припої: ПСР-10, ПСР-12, ПСР-25. Цифра вказує на процентний вміст срібла (інше – мідь і 1% цинку). Паяний ними шов не тільки міцний і щільний, але і корозійно стійкий. Чим вище вимоги до міцності і корозійної стійкості паяного шва, тим більше срібла має містити припій. В окремих випадках використовують припої з 70% срібла. Для пайки титана придатне лише чисте срібло. М'який свинцево-срібний припій нерідко застосовують як заміник олова.

Флюси – матеріали, що використовуються для одержання надійної пайки шляхом видалення окислів металів і таким чином сприяють лудінню. Бувають кислотними (при монтажній пайці електрорадіоприладів їхнє застосування заборонене), безкислотними (на основі спирту, гліцерину), активовані (на основі каніфолі), антикорозійні (на основі фосфорної кислоти).

4.2. Сплави для термопар

Для виготовлення термопар застосовуються мідь, платина і наступні сплави:

1. копель (56% Cu і 44% Ni);
2. алюмель (95% Ni, інше - Al, Si і Mg);
3. хромель (90% Ni і 10% Cr);
4. платинородій (90% Pt і 10% Rh);
5. вольфрам-реній-1 (95% W, 5% Re);
6. вольфрам-реній-2 (80% W, 20% Re).

На рис. 4.12 наведені криві залежності термо-е.р.с. від різниці температур гарячого і холодного спаїв для найбільш уживаних термопар. Сплав молібдену з вольфрамом у парі з чистим вольфрамом можна використовувати для вимірювання температури до 2900°C у інертній атмосфері.

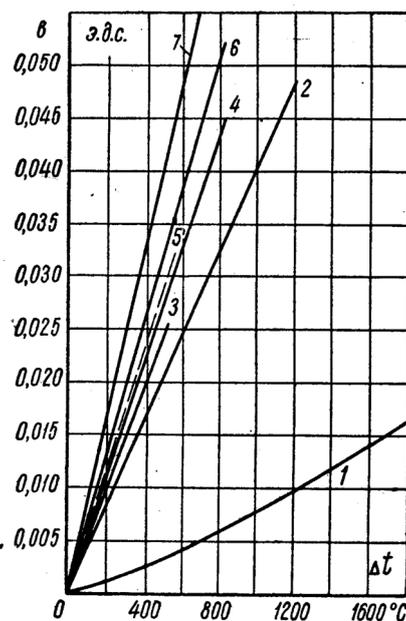


Рис. 4.12 – Залежності термо-е.р.с. від різниці температур спаїв термопар: 1 – платинородій-платина; 2 – хромель-алюмель; 3 – мідь-константан; 4 – залізо-константан; 5 – мідь-копель; 6 – залізо-копель; 7 – хромель-копель

Температурний діапазон використання різних термопар:

- вольфрам-реній-1 - вольфрам-реній-2 – 0-2500°C;
- платинородій-платина – 0-1600°C;
- хромель-алюмель – -200-1000°C;
- хромель-константан – -200-700°C;
- хромель-копель – -200-600°C;
- мідь-копель – -200-100°C;
- мідь-константан - -200-400°C;
- залізо-константан- -200-700°C.

Найбільшу термо-е.р.с. за рівних інших умов розвиває термопара хромелькопель (0,6 мВ на 10°C).

Знак термо-е.р.с. у приведених на рис. 4.12 термопар такий, що в холодному спаї струм йде від першого названого в парі матеріалу до другого (тобто від хромелі до копелі, від міді до константану і т.д.), а в гарячому спаї - у зворотньому напрямку.

4.3. Електротехнічне вугілля

Електротехнічне вугілля використовують для створення електричного контакту між рухомими частинами провідників. Необхідні характеристики: достатньо низький електричний опір і коефіцієнт тертя.



Рис. 4.13 – Приклад електротехнічного вугілля

З електротехнічного вугілля виготовляють щітки електричних машин, контакти для тролейбусів, трамваїв і електропоїздів, електроди для прожекторів, електроди для дугових печей і електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів (рис. 4.14).



Рис. 4.14

Вугільні порошки використовують у мікрофонах для створення опору, що змінюється від звукового тиску. З вугілля виготовляють високоомні регульовані резистори, розрядники для телефонних мереж; вугільні вироби застосовують у електровакуумній техніці.

Питомий опір **вугільних і графітованих електродів** (при високих температурах вуглець набуває структури графіта - графітування) відповідно 50 і 15 мкОм·м, тобто у 3000 і 880 разів більше, ніж у міді. У діапазоні температур від 0 до 1750°C питомий опір вугільних електродів знижується лише на 30%.

Як сировину для виробництва електровугільних виробів використовується сажа, природний графіт або антрацит. Для одержання стрижневих електродів здрібнена маса зі зв'язувальною речовиною, у якості якої використовується кам'яновугільна смола (іноді рідке скло), продавлюється через мундштук.

Контактний елемент багатьох електричних машин – щітки - служать для утворення ковзного контакту між нерухомою й обертовою частинами електричної машини, тобто для підведення (або відводу) струму до колектора або контактних кілець. Розрізняють щітки **вугільно-графітні** (позначення Г і УГ), **графітні** (позначення Г), **електрографітовані** (термічно електрооброблені, позначення ЕГ), мідно-графітні (з вмістом металевої міді, позначення М і МГ). Щітки з вмістом порошкового металу мають особливо малий електричний опір і дають незначне контактне спадання напруги (між щіткою і колектором).

Вугільні порошки для мікрофонів виготовляються з антрациту. Мікрофонні порошки випускають двох типів: дрібнозернисті і крупнозернисті. Опір порошків вимірюють у кубіку об'ємом 1 см³, опір дрібнозернистого порошку повинний бути 400 Ом·см.

Непроводові резистори з природного графіту (природний графіт являє собою одну з модифікацій чистого вуглецю шаруватої структури, з великою анізотропією як електричних, так і механічних властивостей), сажі (сажі є дрібнодисперсними різновидами вуглецю), піролітичного вуглецю (отримують в результаті термічного розкладу без доступу кисню - піроліз), боровуглецеві плівки, а також високоомні сплави металів, відрізняються

від провідних значно меншими розмірами і високою верхньою межею номінального опору. Знаходять широке застосування в автоматичній, у вимірювальній і лічильнообчислювальній техніці і деяких інших областях електротехніки. Мають малу залежність опору від напруги і відрізняються високою стабільністю при зміні температури і вологості.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть характерні особливості вольфраму і молібдену.
2. Чому вольфрам і молібден швидко згорають на повітрі при високій температурі, а ніхроми – ні?
3. Які метали використовують для виготовлення припоїв?
4. Яка характеристика зумовлює вибір металу або сплаву для виготовлення термопари?
5. Що таке неметалеві провідники? Наведіть приклади.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно повторити матеріал з теми «Електричні властивості провідників» та «Матеріали для провідників загального призначення».
2. Вивчити класифікацію спеціальних провідникових матеріалів та принципи їх вибору для різних електротехнічних цілей.
3. Опрацювати додаткову літературу або електронні ресурси щодо новітніх композитних матеріалів, які використовуються в сучасних електричних приладах.

ТЕМА 5. АНАЛІЗ БУДОВИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета: надати базові знання про напівпровідники, їхні фізичні властивості, структуру, принципи роботи та основні області застосування в сучасній техніці.

Анотація

Зазначена тема присвячена вивченню фізичних властивостей, структурних особливостей і принципів електропровідності напівпровідникових матеріалів, які широко використовуються в сучасній електротехніці, електроніці та автоматизованих системах. Розглянуто механізми формування електропровідності у власних і домішкових напівпровідниках, вплив температури, освітлення та домішок на їхні електричні характеристики. Особливу увагу приділено електронно-дірковому переходу (p-n переходу), його будові, фізичним процесам, що відбуваються при його роботі, та застосуванню у діодах, транзисторах, випрямлячах і сенсорних елементах. Наведено приклади використання напівпровідникових матеріалів у силовій електроніці, приладобудуванні та системах енергозбереження.

Keywords: semiconductors, electrical conductivity, intrinsic and impurity conductivity, p-n junction, electron, hole, diode, transistor, electronics.

План лекції

1. Загальне поняття про напівпровідник;
2. Електропровідність напівпровідників;
3. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників;
4. Електронно-дірковий перехід.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

5.1. Загальне поняття про напівпровідник

Матеріали з електронною електропровідністю, питомий опір яких при нормальній температурі лежить між питомими опорами провідників і діелектриків, відносять до напівпровідників.

Електропровідність напівпровідників залежить від напруженості електричного поля. При низьких значеннях напруженості до деякого критичного значення E_k виконується закон Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля, а при більш високих напруженостях поля починається інтенсивне зростання питомої провідності за експонентним законом, що приводить до руйнування структури напівпровідника. З ростом температури питома провідність збільшується. Для ряду напівпровідників залежність питомої провідності від напруженості поля описується виразом:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta \cdot \sqrt{E}},$$

де γ - питома провідність напівпровідника при $E < E_k$; β - коефіцієнт, що характеризує властивості напівпровідника. Зростання провідності зумовлене ростом числа носіїв заряду. При подальшому зростанні поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що приводить до руйнування структури напівпровідника. Найбільш важливі технічні застосування напівпровідників засновані на створенні в одному матеріалі контактувальних областей з різними типами електропровідності – (p-n-переходів), з однією електропровідністю, але різної величини (n-n+ або p-p+), а також контактів метал-напівпровідник, метал-діелектрик-напівпровідник і т. д. Для найбільш широко використовуваних напівпровідників ширина забороненої зони складає від 0,5 до 2,5 еВ.

Також електропровідність напівпровідників залежить від зовнішніх енергетичних впливів, а також від наявності спеціальних домішок.

Керованість електропровідністю напівпровідників за допомогою температури, світла, електричного поля, механічних зусиль покладена в основу принципу дії багатьох напівпровідникових пристроїв: терморезисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів і т.д.

Носіями заряду в напівпровідниках є **електрони провідності і дірки** (носії позитивного заряду). В ідеальних кристалах вони завжди з'являються парами, тому концентрації обох типів носіїв однакові. У кристалах, що містять домішки і дефекти

структури, рівне співвідношення концентрацій електронів і дірок порушується й один з видів провідності стає переважним.

З'єднання напівпровідників з **електронною (n)** і **електронно-дірковою (p)** провідностями дозволяє одержати напівпровідникові вироби з p-n переходом. При існуванні в напівпровіднику p-n переходу виникає замикаючий шар, яким обумовлюється випрямляючий ефект для перемінного струму. Наявність двох і більше взаємно зв'язаних переходів дозволяє одержувати керовані системи – транзистори (рис. 5.1).

На використанні можливостей p-n переходів засновані найважливіші застосування напівпровідників в електротехніці для виготовлення випрямлячів, підсилювачів і генераторів.

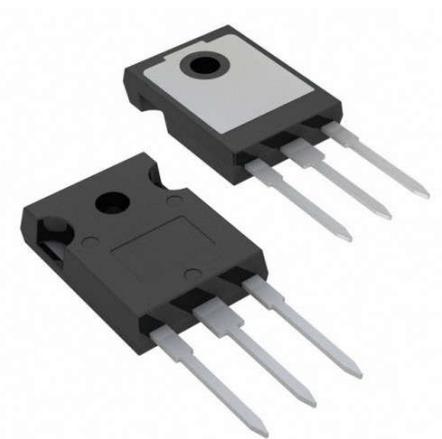


Рис. 5.1 –Зображення транзисторів

Напівпровідникові системи використовуються для перетворення різних видів енергії в енергію електричного струму з високими значеннями коефіцієнта перетворення (наприклад, сонячні батареї і термоелектричні генератори на основі напівпровідникових термоелементів).

Виготовлені з напівпровідникових матеріалів прилади мають наступні переваги:

- 1) великий термін служби;
- 2) малі габарити і вага;
- 3) простота і надійність конструкції,
- 4) велика динамічна міцність (не бояться тряски й ударів);
- 5) мала споживана потужність і інерційність;
- 6) економічні у виробництві.

5.2. Електропровідність напівпровідників

Відповідно до зонної теорії твердого тіла для напівпровідників характерна наявність не дуже широкої забороненої зони в енергетичній діаграмі. Ширина забороненої зони напівпровідникових елементів у електронвольтах (eV) наведена в табл. 5.1. Для найбільше широко використовуваних напівпровідників вона складає величину порядку 1-3 eV.

Таблиця 15.1 – Хімічні елементи-напівпровідники

Елемент	Група таблиці Менделєєва	Ширина забороненої зони, еВ	Елемент	Група таблиці Менделєєва	Ширина забороненої зони, еВ
Бор	III	1,1	Сірка	VI	2,5
Кремній	IV	1,12	Селен	VI	1,7
Германій	IV	0,72	Телур	VI	0,36
Фосфор	V	1,5	Йод	VII	1,25

На рис. 5.2 (а) наведена енергетична діаграма для власного напівпровідника, у якого електрони в зону вільних енергетичних рівнів можуть поставлятися тільки з валентної зони. Розподіл електронів за енергією відповідає температурі T , при якій у зону провідності переходить кілька електронів, утворюючи у валентній зоні відповідне число дірок.

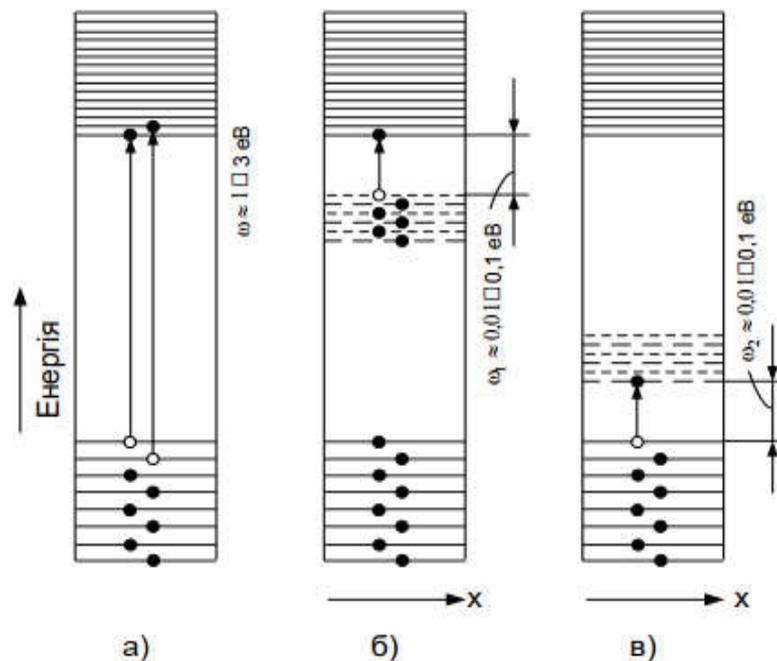


Рис. 5.2 – Вплив домішок на енергетичну діаграму напівпровідника: а - власний напівпровідник; б - напівпровідник з донорним домішком; в - напівпровідник з акцепторним домішком, діркова електропровідність p - типу

При цьому у власному напівпровіднику одночасно створюються два носії заряду протилежних знаків, тому загальна кількість носіїв заряду буде в два рази більше числа електронів у зоні провідності. При будь-якій температурі тіла встановлюється рівноважна концентрація носіїв обох зарядів. Власна електропровідність таких напівпровідників має слабо переважний електронний характер.

5.3. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників

Температурна залежність концентрації носіїв зарядів. В широкому діапазоні температур і для різного складу домішок має місце температурна залежність концентрації носіїв в напівпровідниках n -типу (рис. 5.3).

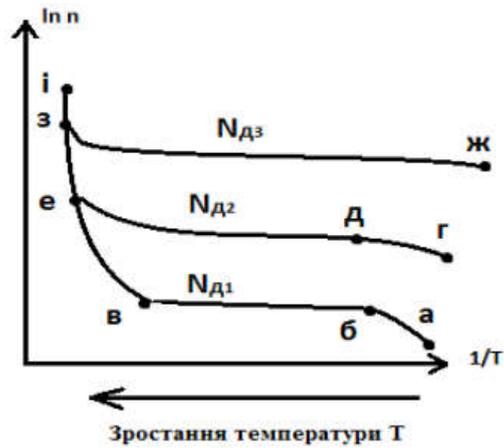


Рис. 5.3 – Типові залежності концентрації носіїв заряду у напівпровіднику від температури при різній концентрації донорних домішок ($N_{д1} < N_{д2} < N_{д3}$)

В області низьких температур частина нижньої кривої між точками а і б характеризує тільки концентрацію носіїв, обумовлену домішками. Нахил прямої визначається енергією активізації $\omega_{д1}$. З збільшенням T росте кількість носіїв, що поставляються домішками. На ділянці (рис. 5.3. б, в) домішки вже виснажені, а переходу електронів через заборонену зону ще немає. Далі значення температури настільки стає великим, що електрони переходять через заборонену зону (рис. 5.3. в, і) – концентрація носіїв заряду швидко росте. Нахил цієї ділянки характеризує ширину забороненої зони напівпровідника – $\Delta\omega$. Зі збільшенням концентрації домішок у напівпровіднику перехід від ділянки (рис. 5.3, а, б) або (рис. 5.3, г, д), на якій концентрація носіїв обумовлена лише домішками, до ділянки виснажених домішок (рис. 5.3, б, в) або (рис. 5.3, д, е) зміщується в бік високих температур. Крива (ж, і) має дві ділянки: (рис. 5.3, ж, з) – постійна концентрація заряду до температури, при якій носії не переходять через заборонену зону; (рис. 5.3, з, і) – перехід носіїв через заборонену зону. Такий напівпровідник є виродженим.

Таким чином, можна сказати, що електропровідність напівпровідників з підвищенням температури збільшується. Ріст питомої провідності напівпровідників зумовлений зростанням з температурою концентрації носіїв заряду.

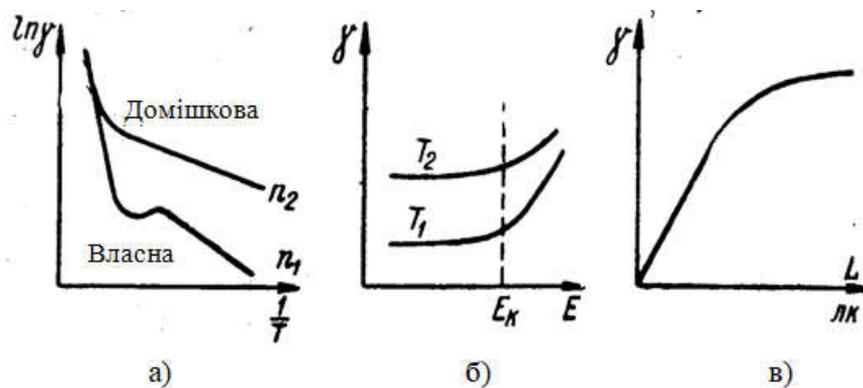


Рис. 5.4 – Залежність питомої провідності напівпровідника: а – від температури (концентрація домішок $n_2 > n_1$); б – від напруженості електричного поля при різних температурах ($T_2 > T_1$); в – від освітленості.

Криві залежності питомої провідності від температури наведені на рис. 5.4 (а). Відрізки прямих в області низьких температур характеризують домішкову електропровідність (n_1 і n_2 характеризують концентрацію домішок) при різній концентрації носіїв, потім має місце перехідна ділянка (домішкові рівні "виснажилися") і далі, в області високих температур, проявляється власна електропровідність напівпровідника.

При ширині забороненої зони германія 0,72 еВ число власних носіїв заряду в ньому при кімнатній температурі складає величину порядку 10^{13} см³, у той час як домішки, що складають тисячну частку відсотка, при малій енергії активації вносять у нього в десятки тисяч разів більшу кількість вільних зарядів. Тому, для керування електропровідністю напівпровідників за допомогою домішок, що вводяться в нього спеціально, основний напівпровідник спочатку повинен бути ретельно очищений від випадкових домішок. На 10^8 - 10^9 атомів основної речовини повинно бути не більш одного чужорідного атома.

Температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників зменшується з підвищенням температури і знаходиться в прямій залежності від енергії активації напівпровідника.

Електропровідність напівпровідників залежить від **напруженості електричного поля**. На рис. 5.4 (б) показані криві залежності питомої провідності напівпровідника від напруженості електричного поля при різних температурах. Як видно, при низьких значеннях напруженості поля (до деякого значення E_k) діє закон Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля. При більш високих напруженостях поля починається ріст питомої провідності за експонентою. Зростання провідності зумовлене ростом числа носіїв заряду, тому що під впливом поля вони більш легко вивільняються тепловим збудженням. При подальшому рості напруженості поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що приводить до руйнування структури напівпровідника.

Опромінення напівпровідників **світловою енергією** приводить, як правило, до збільшення провідності (рис. 5.4, в). Кванти видимого світла мають енергію 1,5-3 еВ, а тому здатні перекидати електрони з заповненої зони в зону провідності. Фотопровідність залежить від частоти випромінювання і температури навколишнього середовища.

Фотопровідністю називають збільшення електричної провідності речовини під дією електромагнітного випромінювання.

Енергія у власному напівпровіднику витрачається на утворення електронно-діркових пар за рахунок перекидання електронів з валентної зони в зону провідності. Тому існує гранична довжина хвилі, зумовлена енергією кванта, достатньою для переходу електрона з найвищого рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності, тобто рівна ширині забороненої зони напівпровідника. За довгохвильовим краєм фотопровідності (ДКФ) можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника, рис. 5.5. Для цього, екстраполюючи круто падаючу ділянку кривої до перетину з віссю абсцис, знаходять граничну довжину хвилі λ_g і енергію квантів, що обумовлює початок фотопровідності.

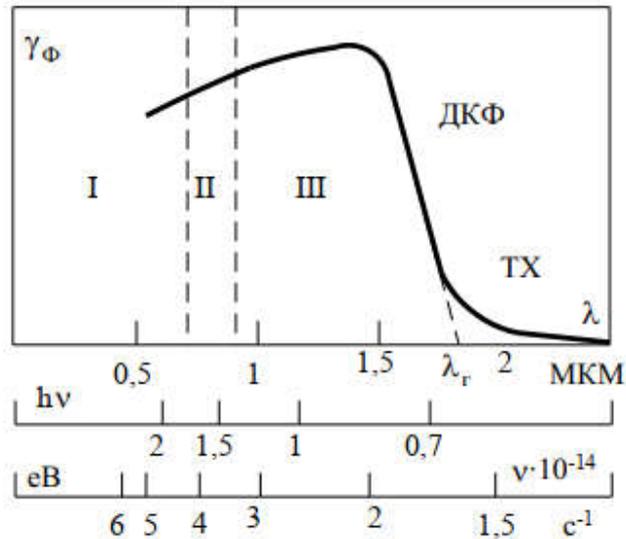


Рис. 5.5 – Фотопровідність германія в залежності від довжини хвилі випромінювання (I - видима зона спектра, II - червона, III - інфрачервона, ДКФ - довгохвильовий край фотопровідності, ТХ - «тепловий хвіст» кривої)

Оскільки заборонена зона різних напівпровідникових речовин має ширину від десятих часток електрон-вольта до 3 eV, то фотопровідність може виявлятися в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах електромагнітного спектра. З рис. 5.5 видно, що оптична ширина забороненої зони германія 0,72 eV, гранична довжина хвилі дорівнює приблизно 1,8 мкм, тобто лежить в інфрачервоній зоні спектра. Фотопровідність, при хвилях коротших 1,8 мкм, визначається переходом електронів з більш низьких рівнів валентної зони на більш високі рівні зони провідності. На кривій показаний «тепловий хвіст», що тягнеться до 1,9–2,0 мкм. Наявність його (тобто невеликої фотопровідності), викликувана квантами світла з енергією, трохи меншою ширини забороненої зони напівпровідника, можна пояснити двома фізичними явищами:

1. Окремі електрони можуть виявитися під впливом енергії фотонів і енергії теплових коливань кристалічних ґраток. Тоді ці електрони перейдуть у зону провідності;
2. Ширина забороненої зони не є абсолютно постійною і піддана флуктуаціям, тому що теплові коливання ґраток приводять до коливань миттєвої локальної щільності в об'ємі кристала і до зміни миттєвих відстаней між атомами, від яких вона залежить.

Фотон з енергією $h\nu < \Delta w$, який поглинається у тому місці об'єму кристала, де миттєва ширина забороненої зони менша середньої, збуджує пари електрон–дірка. Таким чином, «хвіст» кривої на рис. 5.5 має теплову природу.

Зниження температури збільшує чутливість напівпровідників до освітлення.

Питома провідність напівпровідників змінюється від деформації внаслідок збільшення або зменшення (при розтягуванні або стисканні) відстаней між атомами, що приводить до зміни концентрації і рухливості носіїв. У різних напівпровідників одна й та ж сама деформація може спричинити як збільшення, так і зменшення питомої провідності в залежності від того, зменшується чи збільшується ширина забороненої зони.

Величиною, що чисельно характеризує зміну питомої провідності (або питомого опору) напівпровідників при деформації, є тензочутливість, що є відношенням відносної зміни питомого опору напівпровідника до його відносної деформації.

5.4. Електронно-дірковий перехід

При протіканні струму через контактуючі області напівпровідника з дірковою і електронною електропровідностями проявляється ефект однобічної провідності системи. На рис. 5.6 зображена напівпровідникова пластинка, одна половина якої є дірковим напівпровідником р-типу, а інша електронним n-типу.

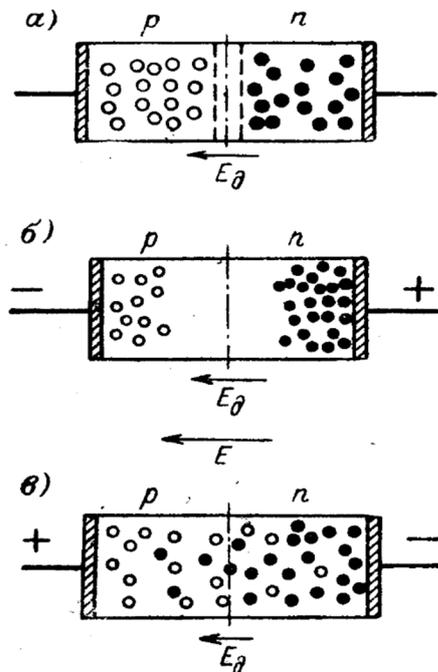


Рис. 5.6 – Принцип роботи напівпровідникового випрямляча з р-п переходом

При цьому в цілому кожна частина нейтральна, тому що має місце рівновага рухомих і нерухомих зарядів. Нерухомі заряди на рисунку не показані.

Границя між областями р і n одержала назву **р-п - переходу**.

Через те, що концентрація вільних електронів в області n більше, ніж у р, а дірок - навпаки, частина електронів під впливом теплової дифузії піде в область р, а деяка кількість дірок - в область n. При цьому область р переходу заряджена негативно, а область n - позитивно. Внаслідок цього виникає дифузійне поле (рис. 5.6 (а)), напрямом якого визначиться знаками нерухомих зарядів. Воно припиняє подальше переміщення рухомих зарядів, тобто ще у відсутності зовнішньої напруги утворюється замикаючий шар. Якщо прикладена ззовні напруга (рис. 5.6, б) створює електричне поле, що збігається з дифузійним, то перехід буде "замкнений" і струм не піде. При зміні полярності прикладеної напруги зовнішнє поле буде спрямовано в протилежну сторону відносно дифузійного, перехід виявиться насиченим носіями заряду, опір його різко понизиться, тобто через нього потече великий за величиною прямий струм (рис. 5.6, в). Використання властивостей р-п - переходів дозволяє виготовляти силові напівпровідникові випрямлячі, діоди, фотоелементи, транзистори й інші прилади.

Транзистор (напівпровідниковий тріод) є пластиною напівпровідника, у якій між двома областями з однотипною електропровідністю знаходиться область електропровідності протилежного типу. Електричні контакти з цими областями носять назву вхід (емітер), вихід (колектор) і загальний електрод (база). Струмом у ланцюзі

колектора можна керувати за допомогою змін напруги і струму в ланцюзі еміттера. Розрізняють транзистори з n-p-n і p-n-p переходами.

Фоторезистори – напівпровідникові пристрої, електричний опір яких суттєво залежить від рівня освітленості (рис. 5.7). Застосовуються для підрахунку деталей при конвеєрному виробництві, при контролі рівня рідких і сипучих тіл, у фотокопіювальних верстатах для обробки деталей за кресленням, для світлової сигналізації, для сигналізації про появу диму і контролю ступеня згоряння палива, у верстатах із програмним керуванням, у пристроях автоматичного захисту пресів холодного штампування й інших верстатів.

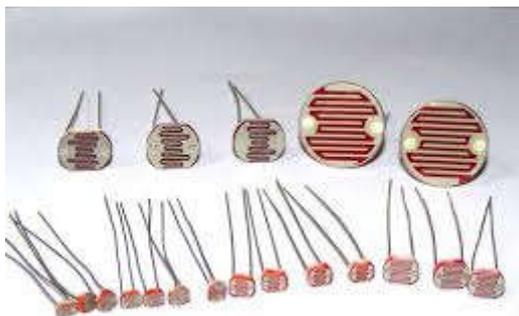


Рис. 5.7 – Зображення фоторезистора

Терморезистори – напівпровідникові пристрої, електричний опір яких суттєво залежить від температури. Виготовляються у виді стержнів, пластинок або таблеток методами керамічної технології. Опір і інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але і від величини зерна, від технологічного процесу виготовлення: тиску при пресуванні і температури відпалу. Приклад терморезисторів: мідно-марганцеві терморезистори ММТ-1 і ММТ-4 (рис. 5.8).



Рис. 5.8 – Зображення терморезистора ММТ-1 і ММТ-4.

З напівпровідникової кераміки, у якої низька точка Кюрі (125°C), виготовляються терморезистори, що відрізняються від всіх інших тим, що вони мають не негативний, а дуже великий позитивний температурний коефіцієнт опору (понад $+20\%/^{\circ}\text{C}$) у вузькому інтервалі температур (порядку 10°C). Такі терморезистори іноді називають **позисторами** (рис. 5.9).



Рис. 5.9 – Зображення позистора

Позистори виготовляються у вигляді дисків невеликої товщини і призначаються для контролю і регулювання температури, використання в системах пожежної сигналізації, запобігання двигунів від перегріву, обмеження струмів, виміру потоків рідин і газів.

Запитання для самоперевірки

1. Які матеріали відносять до напівпровідників?
2. Як зовнішні фактори впливають на електропровідність напівпровідників?
3. Що таке електронна і діркова провідність?
4. Які переваги мають пристрої на основі напівпровідників?
5. Які напівпровідникові пристрої ви знаєте і який принцип їхньої дії?
6. Що таке напівпровідник, і які матеріали відносять до цієї категорії?
7. Які основні властивості напівпровідників відрізняють їх від провідників і діелектриків?
8. Як змінюється електропровідність напівпровідників із підвищенням температури?
9. Що відбувається із структурою напівпровідника при досягненні критичного значення напруженості електричного поля?
10. Яким чином спеціальні домішки впливають на електропровідність напівпровідників?
11. Які основні види електропровідності зустрічаються у напівпровідниках?
12. Що таке p-n перехід, і яке його технічне значення?
13. Які переваги мають пристрої, виготовлені на основі напівпровідників?
14. Яка ширина забороненої зони в найбільш поширених напівпровідникових матеріалах, таких як кремній і германій?
15. Як зовнішні енергетичні впливи, такі як світло чи механічна дія, змінюють електропровідність напівпровідників?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно повторити матеріал з теми «Класифікація речовин за електричними властивостями: провідники, напівпровідники, діелектрики».
2. Опрацювати теоретичний матеріал щодо будови кристалічної решітки напівпровідників та природи їх електропровідності.
3. Опрацювати додаткові джерела з теми:
 - «Напівпровідникові матеріали нового покоління (GaN, SiC, графен) та їх переваги»;

– «Тенденції розвитку напівпровідникових технологій у енергетиці».

ТЕМА 6. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ВЛАСТИВОСТІ, ДОМІШКОВІ СТРУКТУРИ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з із класифікацією, властивостями та принципами роботи напівпровідникових матеріалів, розкрити їх роль у сучасній електроніці, а також розглянути перспективи розвитку цієї галузі.

Анотація

Тема присвячена вивченню фізико-хімічних властивостей напівпровідникових матеріалів, їх класифікації та ролі у сучасній електротехніці й електроніці. Розглянуто особливості кристалічної структури та енергетичних рівнів напівпровідників, що визначають їх здатність проводити електричний струм. Особливу увагу приділено процесам формування власної та домішкової провідності, а також впливу зовнішніх чинників — температури, освітлення, електричного поля та домішок — на електрофізичні характеристики матеріалів. Описано принципи створення та роботи електронно-діркового (p–n) переходу, його застосування у сучасних напівпровідникових приладах — діодах, транзисторах, випрямлячах, фотovoltaїчних елементах. Наведено приклади використання напівпровідників у силовій електроніці, системах автоматизації, енергозберігаючих технологіях та сенсорних пристроях.

Keywords: semiconductors, electrical conductivity, crystal lattice, intrinsic and impurity conductivity, p–n junction, diode, transistor, electronics, energy saving.

План лекції

1. Хімічні елементи з властивостями напівпровідників;
2. Домішкові напівпровідники;
3. Домішки заміщення;
4. Домішки впровадження;
5. Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їхній основі.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

6.1. Хімічні елементи з властивостями напівпровідників

З простих напівпровідників найбільш вживаними є германій, кремній і селен (див. табл. 5.1).

Германій. Кількість германія в земній корі невелика. У результаті хімічної переробки вихідної сировини утвориться тетрахлорид германія, який переводять у двоокис германія (GeO_2) - порошок білого кольору. Двоокис германія відновлюється у водневій печі

при температурі 650-700°C до елементарного германія, що представляє собою сірий порошок.



Рис. 6.1 – Зображення матеріалу - германій

Злитки германія використовують як вихідний матеріал для одержання особливо чистого германія методом зонної плавки або ж для безпосереднього одержання монокристалів методом витягування з розплаву. У германії в невеликих концентраціях звичайно присутні Ni, Ca, Cu, Mn, As, Fe, Si.

Германій застосовується для виготовлення випрямлячів перемінного струму на різні потужності, транзистори різних типів. З нього виготовляються датчики е.р.с. Холла й інших гальваномагнітних ефектів, застосовувані для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності і т.д.

Оптичні властивості германія дозволяють використовувати його для виготовлення фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла і коротких радіохвиль. Германієві прилади повинні бути захищені від вологи.

Кремній. Кремній, як і германій, відноситься до ковалентних кристалів четвертої групи таблиці Менделєєва і має кубічні ґратки типу алмаза. Це один з найбільш розповсюджених елементів земної кори.



Рис. 6.2 – Зображення матеріалу - кремнію

Електропровідність кремнію, як і германія, дуже сильно залежить від присутності домішок. Використовується для виготовлення діодів, тріодів, фотоелементів.

Селен. Елемент шостої групи таблиці Менделєєва. Існує в декількох різновидах - як аморфних, так і кристалічних. Сірий кристалічний селен має гексагональну структуру. Питомий опір селена змінюється в дуже широких межах і залежить від роду і концентрації домішок, температури і освітленості.

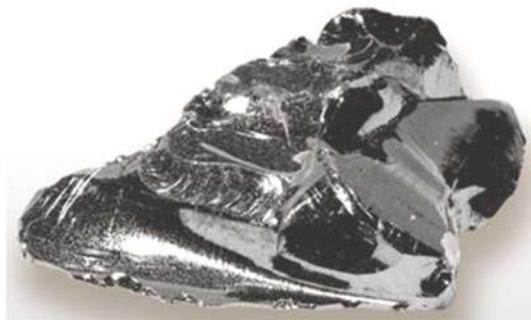


Рис. 6.3 – Зображення матеріалу - селен

Домішки галоїдів (хлору, бром, йод) зменшують питомий опір селена, якщо концентрація цих домішок менше $5-10^{-4}\%$ за вагою. При подальшому збільшенні вмісту цих домішок опір зростає. Домішки телуру, ртуті і ряду інших металів збільшують опір технічно чистих зразків селена.

Селен застосовується для виготовлення випрямлячів і фотоелементів із замикаючим шаром. Пробій селенових випрямлячів відбувається при перенарузі з амплітудою порядку 80 В, причому в ряді випадків пробите місце заплавляється шаром аморфного селена з дуже малою провідністю, і випрямляч може продовжувати роботу. Температурний інтервал роботи селенових випрямлячів складає від -60 до $+75^{\circ}$ С. Чутливість селенових фотоелементів залежить від довжини хвилі падаючого світла і доходить до 500мкА/лм. Коефіцієнт корисної дії селенового фотоелемента малий - близько 0,2%.

Хімічні елементи-напівпровідники, такі як германій, кремній і селен, є ключовими матеріалами для сучасної електронної техніки. Їх застосування базується на унікальних властивостях, таких як ширина забороненої зони, структура кристалічних ґраток і взаємодія з домішками. Германій має переваги у низькотемпературних застосуваннях, кремній залишається універсальним матеріалом, а селен має унікальні оптичні властивості.

Для глибшого розуміння важливо враховувати особливості кожного матеріалу у контексті конкретного застосування.

6.2. Домішкові напівпровідники

Домішкові напівпровідники використовуються у більшості напівпровідникових приладах. У робочому інтервалі температур постачальниками вільних носіїв зарядів у таких напівпровідниках є домішки.

Під **домішками** в напівпровідникових хімічних сполуках розуміють:

- 1) включення атомів сторонніх елементів;
- 2) надлишкові атоми елементів, що входять у хімічну формулу самогоз'єднання;
- 3) дефекти кристалічних ґрат: порожні вузли, атоми або іони між вузлами ґрат, дислокації або зсуви, що виникають при пластичній деформації кристала, мікротріщини.

Якщо домішкові атоми знаходяться у вузлах кристалічних ґрат, то вони називаються **домішками заміщення**, а якщо між вузлами – **то домішками впровадження**.

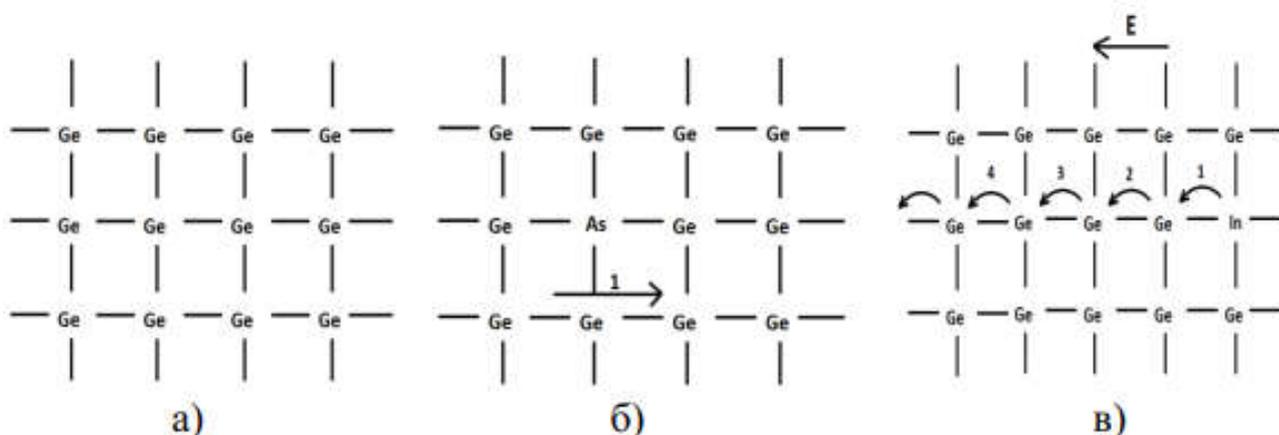


Рис. 6.4 – Схематичне зображення кристалічної ґратки германія: а) - без домішок; б) - з акцепторною домішкою індію; в) - з донорною домішкою миш'яка

Донори й акцептори. Домішки, що поставляють електрони в зону провідності напівпровідника називають **донорами** (рис. 6.4 (б)). Домішки, що захоплюють електрони з валентної зони напівпровідника, називають **акцепторами** (рис. 6.4 (в)).

Носії заряду, концентрація яких у даному напівпровіднику більше, зветься **основними**, а ті, концентрація яких менше – **неосновними**.

Так, у напівпровіднику n-типу електрони є основними носіями, а дірки неосновними. У напівпровіднику p-типу основні носії - дірки, а неосновні електрони.

Домішкова електропровідність для своєї появи вимагає менших енергетичних впливів (0,01-0,1 eV), ніж власна, тому вона має місце при нижчих температурах, ніж власна електропровідність напівпровідника.

6.3. Домішки заміщення

Ковалентні структури типу алмаза. Германій і кремній - елементи четвертої групи таблиці Менделєєва - мають структуру алмаза, у якій кожен атом оточений чотирма найближчими сусідами. У даній структурі діють ковалентні зв'язки. Валентні електрони закріплені за своїми атомами і не переміщуються по кристалу. Якщо на місце одного з атомів напівпровідника (у даному випадку германія) у який-небудь вузол ґратки попадає сторонній атом іншої хімічної природи й іншої валентності, то система валентних зв'язків у цьому місці кристала виявляється порушеною, і можуть бути два випадки, що пояснюються рис. 6.4 (б) і (в).

На рис. 6.4 (б) наведена кристалічна ґратка германія з домішкою миш'яку (елемент п'ятої групи), у якого на зовнішній орбіті розташовано п'ять електронів. Потрапивши у вузол ґрат германія і зв'язавши чотири зі своїх електронів, така домішка дає надлишковий слабо зв'язаний електрон, що під впливом теплової енергії може почати безладно блукати по кристалу, а під впливом електричного поля буде направлено переміщатися (електропровідність типу n). Атом домішки, що втратив електрон, є позитивно зарядженою

частинкою, нерухомо закріпленою в даному місці ґратки напівпровідника. У цьому випадку домішка елемента п'ятої групи періодичної системи буде донорською.

На рис. 6.4 (в) зображена кристалічна ґратка германія з домішкою елемента третьої групи – індію, що має на зовнішній орбіті три валентних електрони. Така домішка в ґратках германія створює дірку, запозичаючи електрон в одного із сусідніх атомів германія. Атом домішки, що приєднав електрон, являє собою негативно заряджену частку, нерухомо закріплену в даному місці ґрат напівпровідника. Дірка може блукати по кристалу. При накладанні електричного поля, як показано на рисунку, електрон буде узятий від лівого атома германія, що при цьому одержує позитивний заряд і, у свою чергу, захопить електрон від наступного атома, тобто дірка почне направлено пересуватися справа наліво (електропровідність типу р). Насправді в цьому випадку рухаються тільки електрони, але їхнє естафетне перескакування з атома на атом можна формально описати як рух однієї дірки, що переміщається в напрямку, зворотньому напрямкові руху електронів, тобто в напрямку поля. Домішка елемента третьої групи періодичної системи є акцепторною.

Ковалентні напівпровідникові з'єднання. У напівпровідникових з'єднаннях, наприклад $A^{III}B^V$, зазвичай домішкові атоми заміщення II групи (Mg, Zn і ін.), що мають меншу валентність, є акцепторами. Домішкові атоми VI групи (Se, Te), що мають більшу валентність, будуть донорами. Домішкові атоми IV групи в напівпровідникових з'єднаннях $A^{III}B^V$ можуть бути і донорами, і акцепторами, в залежності від того, який атом з'єднання заміщається домішковим атомом. Якщо, наприклад, домішковий чотиривалентний атом заміщає в ґратах InAs тривалентний атом In, то він буде донором, якщо п'ятивалентний атом As, то акцептором.

6.4. Домішки впровадження

Структури типу алмаза. Тип електропровідності визначається розмірами і величиною негативного заряду домішкових атомів, що впроваджуються між вузлами ґрат напівпровідників IV групи періодичної системи. Якщо атом Ge або Si під енергетичним впливом потрапляє між вузлами, то утворяться два домішкові рівні: донорський впровадженого атома й акцепторний порожнього вузла.

Іонні структури. Атоми металів можуть впроваджуватися в тісні проміжки між вузлами іонних ґрат лише в тому випадку, якщо вони різко зменшують свої розміри, позбавившись зовнішніх електронів, що обумовлюють електропровідність n-типу. Іони багатьох металоїдів, що мають великі діаметри, не можуть впроваджуватися між вузлами іонних з'єднань.

6.5. Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їхній основі

Напівпровідникові хімічні сполуки складаються з елементів різних груп таблиці Менделєєва, що відповідають загальним формулам $A^{IV}B^{IV}$ (наприклад, SiC), $A^{III}B^V$ (InSb, GaAs, Ga), $A^{II}B^{VI}$ (Cd, ZnSe), а також деякі окисли (наприклад, Cu_2O) і речовини складного складу.

Карбід кремнію. Це з'єднання елементів IV групи таблиці Менделєєва: кремнію і вуглецю ($A^{IV}B^{IV}$), що відповідає формулі SiC. Карбід кремнію містить 70,045% Si і 29,955% C (за вагою). У природі цей матеріал зустрічається вкрай рідко. Електропровідність кристалів SiC при нормальних температурах – домішкова, коливається в широких межах і

збільшується з температурою. Електропровідність порошкоподібного карбіду кремнію залежить від електропровідності зерен вихідного матеріалу, напруженості електричного поля і температури.

Температурні залежності електропровідності електронного і діркового Si показані на рис. 6.5.

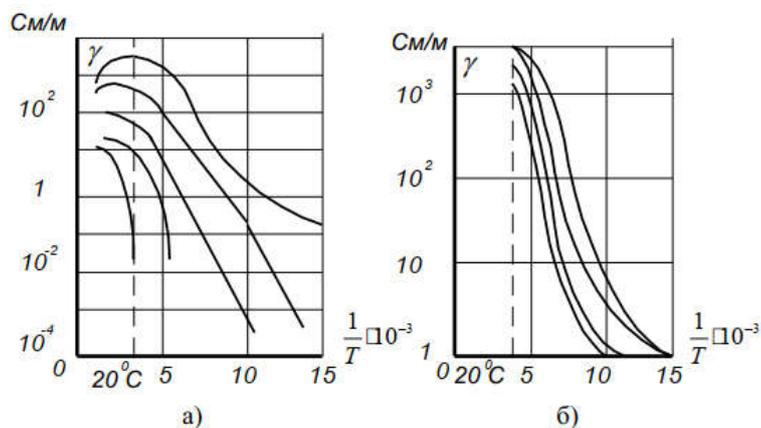


Рис. 6.5 – Залежність питомої провідності декількох зразків n-Si (а) і p-Si (б) від температури

Електропровідність порошкоподібного карбіду кремнію залежить від електропровідності вихідного матеріалу, розміру помолу, ступеня стиску часток, напруженості електричного поля і температури. Наприклад, якщо питома провідність матеріалу приблизно 150 Cm/m, то при температурі 20 °С, розмірі зерен 63–75 мкм і тиску на порошок 60 МПа в зоні слабкого поля (до 5 В на сантиметр висоти порошку) питома провідність порошку буде приблизно $2 \cdot 10^{-6}$ Cm/m. При збільшенні зерна до 85–105 мкм і при всіх колишніх умовах питома провідність порошку зростає до 10^{-3} Cm/m.

Карбід кремнію в електротехніці застосовується для виготовлення резисторів для вентильних розрядників, що захищають лінії передачі високої напруги й апаратуру, для виробництва низьковольтних варисторів (**варистор** – це резистор з нелінійною вольт-амперною характеристикою), для цілей автоматики, обчислювальної техніки і електроприладобудування, для виготовлення сілітових стержнів нагрівачів високотемпературних електричних печей і т.п.

Арсенід галію – це з'єднання $A^{III}B^V$. Ширина забороненої зони дещо перевищує ширину забороненої зони германія і кремнію. При цьому рухливість електронів у нього вище, ніж у германія і кремнію, а рухливість дірок порівнянна з такою для кремнію. Цинк, кадмій, мідь є акцепторами, рівні яких лежать вище діапазона валентної зони від 0,08 до 0,37 еВ. Донорами є сірка, селен, телур, а також елементи IV групи таблиці Менделєєва.

З арсеніду галію виготовляють фотоелементи з к.к.д. порядку 7%, дозиметри рентгенівського випромінювання, тунельні діоди, напівпровідникові лазери. Напівпровідникові прилади з арсеніду галію здатні працювати до температури 450°C.

Антимонід індію. Одержують сплавкою високочистих індію і сурьми. Матеріал проходить зонне очищення, а монокристали з нього роблять методом витягування. Фотопровідність InSb охоплює широку область, що лежить в інфрачервоній частині спектра, доходячи до 8 мк. Максимум фотопровідності відповідає довжині хвилі 6,7 мк.

Антимонід індію застосовується для виготовлення фотоелементів високої чутливості, а також для термоелектричних генераторів і холодильників.

З'єднання А^{II}В^{VI} (сульфіди). Сірчистий свинець (PbS), сірчистий вісмут (Bi₂S₃) і сірчистий кадмій (CdS) використовуються для виготовлення фоторезисторів і люмінофорів.

Фоторезистори з полікристалічного сірчистого свинцю мають криву спектральної чутливості, що охоплює видимий та інфрачервоний діапазони електромагнітного спектра, рис. 6.6. Чутливість фоторезисторів із сірчистого вісмуту лежить у вузькій червоній області спектра, а фоторезисторів на основі сірчистого кадмію залежно від вмісту домішок і технології виготовлення зразків може мати максимуми при різних довжинах хвиль видимої частини спектра.

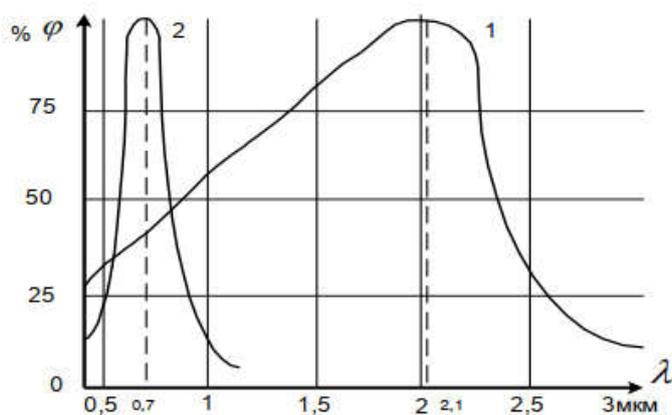


Рис. 6.6 – Спектральна чутливість при 200 °С фоторезисторів з полікристалічного сірчистого свинцю (1) і сірчистого вісмуту (2)

Фоторезистори також застосовуються для підрахунку деталей у конвеєрному виробництві для контролю рівня рідких і сипучих тіл.

Окисли. Закис міді (Cu₂O) – напівпровідник р-типу. Провідність сильно залежить від домішок, термічної обробки і температури. З окислених мідних пластин, на поверхні яких утворився шар закису міді, були отримані перші типи напівпровідникових випрямлячів і фотоелементів. З часом міднозакисневі випрямлячі старіють, що призводить до падіння струму.

Серед інших напівпровідників-окислів - окис цинку (ZnO) – напівпровідник n-типу, і двоокис титану TiO₂.

Напівпровідникові окисли використовуються для виготовлення фоторезисторів, терморезисторів, випрямлячів і т.п.

Одже:

- **Різноманіття матеріалів:** Напівпровідникові хімічні сполуки охоплюють широкий спектр властивостей, які дозволяють їх використовувати в різних пристроях: від фоторезисторів до напівпровідникових лазерів.

- **Залежність властивостей від складу:** Домішки, кристалічна структура і технології виготовлення значно впливають на характеристики матеріалів.

- **Застосування:** Ці матеріали забезпечують розвиток сучасної електроніки, фотоелектрики, високотемпературних пристроїв та інших галузей.

6.6. Напівпровідникові матеріали та їх роль у розвитку сучасної електроніки

Розвиток напівпровідникових технологій радикально змінив вигляд електроніки. Якщо раніше пристрої базувалися на електронних лампах, громіздких і ненадійних, то завдяки напівпровідникам з'явилися твердотільні прилади, які стали меншими, надійнішими й енергоефективнішими. Відкриття транзистора у 1947 році започаткувало нову епоху в техніці, а винайдення інтегральної схеми у 1958 році дало змогу створювати мікроскопічні електронні компоненти, розміщені на одному кристалі. Це стало основою для формування мікропроцесорів — "мозку" сучасних комп'ютерів, смартфонів і побутових приладів.

У галузі оптоелектроніки напівпровідники відіграють вирішальну роль у створенні світлодіодів (LED), лазерних діодів, фотодетекторів і сонячних батарей. Світлодіодні технології дозволили суттєво знизити енергоспоживання у системах освітлення, підвищити термін служби джерел світла й забезпечити можливість створення динамічних дисплеїв та екранів. У свою чергу, сонячні елементи на основі кремнію та арсеніду галію є основою сучасної фотоенергетики, що сприяє переходу до чистих, відновлюваних джерел енергії.

Напівпровідникові прилади також активно використовуються в силовій електроніці, де завдяки матеріалам типу SiC і GaN створюються високоефективні транзистори, діоди та інвертори, здатні працювати при великих напругах і частотах. Це особливо важливо для електротранспорту, промислових перетворювачів, систем енергозбереження й електричних мереж нового покоління (Smart Grid).

Не менш важливим напрямом розвитку є сенсорна електроніка, яка базується на властивостях напівпровідників змінювати свої параметри під впливом зовнішніх факторів. Температурні, фотометричні, газові, магнітні та біосенсори створюються саме на основі напівпровідникових структур, що забезпечує високу чутливість, точність і швидкодію вимірювань.

Подальший розвиток напівпровідникової технології спрямований на зменшення розмірів елементів, підвищення їх швидкодії та зниження енергоспоживання. Сьогодні у виробництві мікропроцесорів використовуються транзистори з розмірами менше 3 нанометрів, а технології наноматеріалів та квантових точок відкривають перспективи створення нових типів електронних пристроїв. Особливо перспективним є розвиток гнучкої електроніки на основі органічних напівпровідників, яка дозволяє створювати гнучкі дисплеї, сенсорні поверхні, "розумний" одяг та інші інноваційні вироби.

Іншим важливим напрямом є тривимірна інтеграція (3D IC), яка передбачає багат шарове розміщення компонентів на одному кристалі. Це дозволяє значно підвищити продуктивність і щільність елементів у мікросхемах, зменшуючи при цьому габарити пристроїв. Паралельно розвиваються квантові обчислення, у яких використовуються напівпровідникові кубіти, що дає змогу створювати системи, здатні виконувати обчислення, недосяжні для класичних комп'ютерів.

Таким чином, напівпровідникові матеріали є фундаментом усієї сучасної електронної техніки. Їх унікальні фізичні властивості забезпечують розвиток інформаційних технологій, енергетики, зв'язку, транспорту й медицини. Подальше вдосконалення цих матеріалів відкриє шлях до створення ще швидших, енергоефективніших і мініатюрніших пристроїв, які визначатимуть обличчя науки й техніки майбутнього.

Запитання для самоперевірки:

1. Як класифікують напівпровідникові матеріали?
2. Які хімічні елементи напівпровідники ви знаєте?
3. З яких груп хімічних елементів періодичної таблиці формуються напівпровідники хімічні сполуки?
4. Яким чином домішки впливають на провідність напівпровідникових хімічних сполук?
5. Що таке термістор і варистор?
6. Де вони застосовуються?
7. Назвіть напівпровідникові матеріали, які використовують при виготовленні елементної бази електронної апаратури.
8. Власні напівпровідники.
9. Наведіть основні фізичні властивості кремнію, германія, арсеніду галію.
10. Домішкові напівпровідники.
11. Акцепторні домішки.
12. Донорні домішки.
13. Фізичне явище електронної провідності.
14. Чим відрізняється температурна залежність питомого опору власного напівпровідника від домішкового?
15. Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їх основі.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно повторити матеріал попередньої теми - «Класифікація речовин за магнітними та електричними властивостями», звернувши увагу на відмінності між провідниками, напівпровідниками та діелектриками.
2. Опрацювати теоретичний матеріал щодо кристалічної будови напівпровідників і природи виникнення зонної структури.
3. Опрацювати додаткову літературу за темами:
 - «Новітні напівпровідникові матеріали (SiC, GaN, графен) та їх переваги»;
 - «Екологічні аспекти використання напівпровідникових технологій».

ТЕМА 7. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними поняттями про діелектрики, їхні фізичні властивості, класифікацію, а також пояснити процеси, що відбуваються в діелектриках під дією електричного поля.

Анотація

Тема присвячена ознайомленню здобувачів вищої освіти з основними поняттями про діелектрики, їхніми фізичними властивостями, класифікацією та особливостями поведінки в електричному полі. Розкрито природу діелектриків відповідно до зонної теорії, наведено характеристику основних параметрів — питомого опору, діелектричної проникності, кута діелектричних втрат та електричної міцності. Розглянуто процеси поляризації, виникнення струму витоку, умови настання електричного пробою та відмінності між ідеальними й технічними діелектриками. Подано класифікацію діелектричних матеріалів за призначенням, агрегатним станом і хімічною природою, а також наведено приклади застосування пасивних і активних діелектриків у сучасній електротехніці.

Keywords: dielectrics, polarization, electrical strength, dielectric permittivity, electrical insulating materials, leakage current, dielectric breakdown.

План лекції

1. Основні поняття;
2. Діелектрик в електричному полі.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

7.1. Основні поняття

Діелектриками називають матеріали, основною електричною властивістю яких є здатність до поляризації й у яких можливе існування електричного поля.

Відповідно до зонної теорії твердого тіла, – діелектрики – це речовини, в яких заборонена зона є настільки велика, що в нормальних умовах електропровідність у них відсутня.



Рис. 7.1 – Види діелектриків

Тіла виготовлені з діелектрика називають ізоляторами.

Молекула діелектрика складається з позитивних і негативних йонів, а також електронів. Вільних електронів в діелектриках дуже мало.

На практиці діелектрики не вважається абсолютним ізолятором. Зазвичай елементарні заряди молекули діелектрика знаходяться в хаотичному тепловому коливальному русі біля центрів рівноваги. Якщо включити діелектрик в коло постійної напруги, то під дією сил електричного поля елементарні заряди молекул діелектрика перемістяться в напрямку діючих на них сил. В результаті зміщення зарядів в середині діелектрика в колі виникає короткочасний струм поляризації. Через дуже короткий час цей струм зникає.

Струм витоку цей струм може протікати через діелектрик довгий час. Діелектрик завжди має йони та вільні електрони, хоча їх дуже мало. Під дією електричного поля вони почнуть переміщатись. Величина струму витоку значно більша ніж струму поляризації. Проходячи через діелектрик струм витоку виділяє тепло.

Якщо включити діелектрик в коло змінної напруги то процес поляризації буде проходити періодично спочатку в одному напрямку, а потім в іншому й в колі виникне змінний струм. Процес який безперервно повторюється потребує затрат енергії. Періодичне переміщення в матеріалі діелектрика йонів та вільних електронів провокує виникнення струму витоку.

Реальний (технічний) діелектрик тим більш наближається до ідеального, чим менша його питома провідність і чим слабкіше в нього виражені уповільнені види поляризації, пов'язані з розсіюванням електричної енергії й виділенням тепла.

При практичному застосуванні діелектриків – одного з найбільш великих класів електротехнічних матеріалів – доволі чітко визначилися потреби електротехніки у використанні пасивних чи активних властивостей цих матеріалів.

На використанні пасивних властивостей діелектричних матеріалів ґрунтується їхнє застосування в електротехніці в якості електроізоляційних матеріалів і діелектриків у конденсаторах звичайних типів. Електроізоляційними матеріалами називають діелектрики, які застосовують для усунення впливу електричних зарядів в електротехнічних пристроях. У цих випадках величина діелектричної проникності має бути як можна меншою, щоб не вносити у схеми паразитні ємності. При використанні діелектричних матеріалів у якості діелектрика конденсатора необхідно мати матеріал з якомога більшою величиною діелектричної проникності, щоб забезпечити значну його ємність за малих габаритів.

В техніці використовують тверді, рідкі та газоподібні діелектрики.

Тверді діелектрики це фарфор, гума, скло і т.д.

В якості рідких діелектриків використовують трансформаторне, конденсаторне, кабельне масло.

Найчастіше в якості газоподібного діелектрика використовують повітря.

Тіла виготовлені з діелектрика називають ізоляторами. Молекула діелектрика складається з позитивних і негативних йонів, а також електронів. Вільних електронів в діелектриках дуже мало.

На практиці діелектрики не вважається абсолютним ізолятором. Зазвичай елементарні заряди молекули діелектрика знаходяться в хаотичному тепловому коливальному русі біля центрів рівноваги. Якщо включити діелектрик в коло постійної напруги, то під дією сил електричного поля елементарні заряди молекул діелектрика перемістяться в напрямку діючих на них сил. В результаті зміщення зарядів в середині діелектрика в колі виникає короткочасний струм поляризації. Через дуже короткий час цей струм зникає.

Струм витоку цей струм може протікати через діелектрик довгий час. Діелектрик завжди має йони та вільні електрони, хоча їх дуже мало. Під дією електричного поля вони почнуть переміщатись. Величина струму витоку значно більша ніж струму поляризації. Проходячи через діелектрик струм витоку виділяє тепло.

Якщо включити діелектрик в коло змінної напруги то процес поляризації буде проходити періодично спочатку в одному напрямку, а потім в іншому й в колі виникне змінний струм. Процес який безперервно повторюється потребує затрат енергії . Періодичне переміщення в матеріалі діелектрика йонів та вільних електронів провокує виникнення струму витоку.

Характеристики діелектрика:

- питомий опір
- діелектрична проникність
- кут діелектричних втрат
- електрична міцність

Класифікація діелектричних матеріалів.

Навіть найпростіша електрична схема не може бути виконана без використання провідникових і діелектричних матеріалів. У діелектричних матеріалів електропровідність практично відсутня, точніше має дуже мізерне значення порівняно з провідниковими матеріалами.

За призначенням діелектричні матеріали можна розподілити на електроізоляційні матеріали та активні діелектрики.

Основне призначення електроізоляційних матеріалів — це перешкода проходженню струму шляхами, небажаними для роботи даної електричної схеми. їх використовують для створення електричної ізоляції, що оточує струмопровідні частини електричних пристроїв і відокремлює одна від одної частини, що знаходяться під різними електричними потенціалами.



Рис. 7.2.

Призначення електричної ізоляції - це недопущення проходження електричного струму за будь-якими небажаними шляхами, крім передбачених електричною схемою пристроїв.



Рис. 7.3. – Приклад електричної ізоляції

Електроізоляційні матеріали використовуються, як діелектрики в електричних конденсаторах для створення певного значення його електричної ємності, а в деяких випадках для забезпечення певного виду залежності цієї ємності від температури або інших факторів.

Активні діелектрики, тобто діелектрики з керованими властивостями, не тільки створюють електричну ізоляцію (тобто виконують «пасивну» роль), але в різних пристроях використовується зміна їх параметрів під дією різних факторів. До активних діелектриків належать сегнетоелектрики, п'єзоелектрики і електрети.



Рис. 7.4. – Приклад активних діелектриків



Рис. 7.5 – Застосування активних діелектриків

У сегнетоелектриків діелектрична проникність суттєво змінюється при зміні напруженості електричного поля і при зміні температури. Пієзоелектрики генерують електричні заряди під дією механічних напружень і, навпаки, змінюють свої розміри під дією електричного поля. Електрети можуть розглядатися як електричні аналоги постійних магнітів, оскільки вони здатні тривало зберігати електричний заряд.

Електроізоляційні матеріали за агрегатним станом розділяються на тверді, рідкі й газоподібні. Особливу групу становлять матеріали, які тверднуть. У процесі виробництва виробів їх вводяться в ізоляцію рідкими або пластичними, але потім вони стають твердими речовинами. За хімічною основою електроізоляційні матеріали поділяються на органічні (сполуки вуглецю з воднем, азотом, киснем і деякими іншими елементами) та неорганічні.

Неорганічні матеріали порівняно з органічними мають вищу нагрівостійкість. Розрізняють також природні, штучні і синтетичні електроізоляційні матеріали. Природні електроізоляційні матеріали — це матеріали природного походження, які використовуються без хімічної переробки. Штучні електроізоляційні матеріали одержують шляхом хімічної переробки природної сировини. Синтетичні електроізоляційні матеріали одержують методом хімічного синтезу. Електроізоляційні матеріали важко також розділити на полярні й неполярні для оцінювання їхніх електричних, адгезивних властивостей, гігроскопічності та ін.



7.2. Діелектрик в електричному полі

Для будь-якого діелектрика характерним процесом, що виникає при дії на нього електричного поля, є поляризація – обмежений зсув зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул. Про явища, зумовлені поляризацією діелектрика, можна судити за значенням діелектричної проникності, а також кута діелектричних втрат, якщо поляризація діелектрика супроводжується розсіюванням енергії, яка викликає нагрівання діелектрика. У нагріванні технічного діелектрика можуть брати участь нечисленні вільні заряди, що зумовлюють виникнення під впливом електричного поля незначного наскрізного струму, який проходить крізь товщу діелектрика і по його поверхні. Наявність наскрізного струму свідчить про явище електропровідності технічного діелектрика, яка чисельно характеризується значеннями питомої об'ємної і питомої поверхневої електропровідностей, або оберненими відповідними їм значеннями питомих об'ємного і поверхневого електричних опорів. Будь-який діелектрик можна використовувати тільки при напрузі, що не перевищує граничного значення в певних умовах. При перевищенні цього значення напруги настає пробій діелектрика – повна втрата ним електроізоляційних властивостей. Цю граничну напругу називають пробивною напругою, а відповідне значення напруженості однорідного електричного поля – електричною міцністю діелектрика.

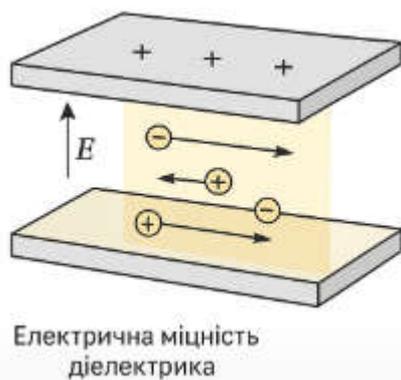


Рис. 7.6 – Електрична міцність діелектрика

Діелектрик в електричному полі зазнає поляризації, яка проявляється у зміщенні зв'язаних зарядів або орієнтації дипольних молекул. Цей процес визначає діелектричні властивості матеріалу, зокрема проникність і втрати енергії, що можуть спричинити його нагрівання. У технічних діелектриках також існує невеликий наскрізний струм, обумовлений наявністю вільних зарядів, що характеризується питомою електропровідністю. Кожен діелектрик має граничну напругу, за перевищення якої відбувається електричний пробій і втрата ізоляційних властивостей; відповідний параметр визначають як електричну міцність матеріалу.

7.3. Електрофізичні властивості діелектриків

Електрофізичні властивості діелектриків визначають їхню здатність взаємодіяти з електричним полем, накопичувати електричну енергію та забезпечувати якісну електричну ізоляцію. Основною характеристикою таких матеріалів є діелектрична проникність, що відображає ступінь поляризації діелектрика та визначає його вплив на електричне поле всередині матеріалу. Поляризація виникає внаслідок зміщення зв'язаних зарядів або орієнтації дипольних молекул, що забезпечує накопичення електричної енергії. Діелектрики мають великий питомий об'ємний і поверхневий опір, проте незначна кількість вільних зарядів зумовлює існування струму витoku, який спричиняє додаткові теплові втрати. Для оцінювання ефективності діелектрика також використовують кут діелектричних втрат, що характеризує частку енергії, яка перетворюється в тепло під час періодичної поляризації матеріалу. Важливою властивістю є електрична міцність — максимальна напруженість електричного поля, яку діелектрик здатен витримати без пробою; перевищення цього значення призводить до втрати ізоляційних властивостей. Електропровідність діелектриків, хоч і дуже мала, залежить від домішок, вологості та температури, що впливає на їхню надійність у різних умовах. Сукупність електрофізичних властивостей визначає придатність діелектрика для використання як ізоляційного матеріалу, діелектрика конденсатора або активного елемента зі змінними параметрами в електротехнічних та електронних пристроях.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке діелектрик, і яка його основна електрична властивість?
2. Як зонна теорія пояснює властивості діелектриків?

3. Чому діелектрики не є абсолютними ізоляторами?
4. Що таке струм поляризації і за яких умов він виникає?
5. Як пояснити явище струму витоку в діелектриках?
6. Чим відрізняється струм поляризації від струму витоку?
7. Які види діелектриків використовуються у техніці (тверді, рідкі, газоподібні)?
8. Наведіть приклади твердих, рідких і газоподібних діелектриків.
9. Яке основне призначення електроізоляційних матеріалів?
10. У чому полягає різниця між пасивними і активними діелектриками?
11. Що таке сегнетоелектрики, п'єзоелектрики і електрети?
12. Які характеристики діелектриків найважливіші для їх оцінки?
13. Як пояснюється явище наскрізного струму в діелектриках?
14. Що таке пробій діелектрика? Які фактори впливають на пробивну напругу?
15. Що називають електричною міцністю діелектрика?
16. Як відрізняються питомий об'ємний опір і питомий поверхневий опір діелектриків?
17. Які обмеження існують для використання діелектриків в електричних пристроях?
18. Які властивості діелектриків є ключовими для їх використання у конденсаторах?
19. Чому діелектрична проникність має бути максимальною у матеріалі для конденсаторів?
20. Як хімічний склад діелектриків (органічні, неорганічні) впливає на їх властивості?
21. У чому різниця між природними, штучними і синтетичними діелектриками?
22. Як активні діелектрики (сегнетоелектрики, п'єзоелектрики) використовуються в техніці?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Діелектрики та їх електрофізичні властивості», звернувши увагу на класифікацію, параметри та сфери застосування діелектричних матеріалів.
2. Підготувати порівняльну таблицю властивостей твердих, рідких та газоподібних діелектриків.
3. Ознайомитися з прикладами застосування активних діелектриків (п'єзоелектриків, сегнетоелектриків, електретів) у сучасних електронних та електротехнічних пристроях.

ТЕМА 8. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ

Мета: пояснити фізичну природу поляризації діелектриків, розкрити види поляризації, а також ознайомити з поняттям діелектричної проникності та її впливом на властивості діелектриків.

Анотація

Тема присвячена фізичній природі поляризації діелектриків та їх електричним властивостям. Розглянуто процеси поляризації у різних типах діелектриків, класифікацію матеріалів за видами поляризації, а також вплив діелектричної проникності на характеристики газоподібних, рідких і твердих речовин. Особлива увага приділена сегнетоелектрикам, їх спонтанній поляризації, гістерезису та залежності діелектричної проникності від температури й напруженості електричного поля. Лекція включає пояснення пружної та релаксаційної поляризацій, а також аналіз особливостей електронної, іонної, дипольної та структурної поляризацій у різних середовищах.

Keywords: dielectric, polarization, dielectric constant, ferroelectrics, elastic polarization, relaxation polarization, dipole molecules, electronic polarization, ionic polarization, hysteresis.

План лекції

1. Поляризація діелектрика;
2. Основні види поляризації діелектриків;
3. Класифікація діелектриків за видом поляризації;
4. Діелектрична проникність газів;
5. Діелектрична проникність рідких діелектриків;
6. Діелектрична проникність твердих діелектриків.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

8.1. Поляризація діелектрика

Поляризація діелектрика – це обмежений рух зв'язаних зарядів або певна орієнтація дипольних молекул під дією зовнішнього електричного поля.

Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку діючих на них сил. Це зміщення прямопропорційне напруженості поля. При зникненні електричного поля заряди знову повертаються в попередній стан.

У дипольних діелектриках вплив електричного поля викликає орієнтацію дипольних молекул у напрямку поля. При зникненні поля диполі орієнтуються довільно внаслідок теплового руху.

При поляризації на поверхнях діелектрика виникають заряди різних знаків. На стороні, зверненій до позитивного електрода, виникає негативний заряд. На стороні, зверненій до негативного електрода – позитивний (рис. 8.1).

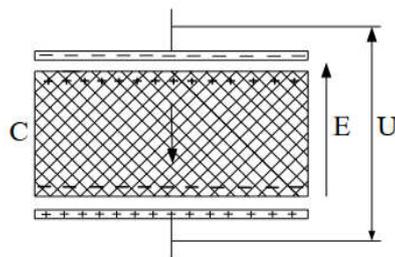


Рис. 8.1 – Розподіл зарядів у діелектрику під дією зовнішнього електричного поля

Більшість діелектриків характеризується лінійною залежністю електричного зміщення від величини напруженості електричного поля. Особливу групу складають діелектрики, у яких зі зміною напруженості поля величина зміщення змінюється нелінійно, насичуючись при певному значенні напруженості поля. Такі діелектрики називають сегнетоелектриками.

Сегнетоелектрики – речовини, що мають самовільну (у відсутності електричного поля) електричну поляризацію, яка суттєво залежить від зовнішніх умов (наприклад, температури), тобто це речовини, у яких діелектрична проникність набуває аномально великих значень внаслідок високої температури.

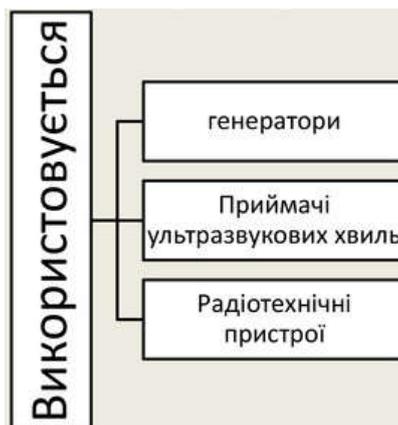


Рис. 8.2 – Використання сегнетоелектриків

Перший сегнетоелектрик (подвійна калієво-натрієва сіль винної кислоти) був створений французьким аптекарем Сен'етом у 1655 р. Але лише в 1918 р. американський фізик Андерсон звернув увагу на те, що при температурі від -15 до $+22^{\circ}\text{C}$ ця сіль має надзвичайно велику діелектричну проникність. Тоді і народилося поняття про новий клас речовин – сегнетоелектрики.

Сегнетоелектрики є електричним аналогом ферромагнетиків. Відомо кілька сот сегнетоелектриків, в тому числі сегнетокераміки, рідкі кристали і полімерні матеріали. До сегнетоелектриків відносяться сегнетова сіль ($\text{NaKC}_1\text{H}_3\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), тіта- нат барію (BaTiO_3), ніобат літію (LiNbO_3).

Сегнетоелектрики характеризуються наявністю доменів - областей з мононаправленою поляризацією в межах одного домену. Діелектрична проникність цих матеріалів досягає декількох тисяч і залежить від передісторії. У сегнетоелектричних діелектриках, поміщених в електричне нулі, виникає залишкова електрична поляризація (ефект пам'яті).

Ці матеріали мають електричну гістерезису (рис. 8.3), подібно до магнітних матеріалів, що володіють магнітною гістерезисом (звідси друга назва сегнетоелектриків – фероелектрики).

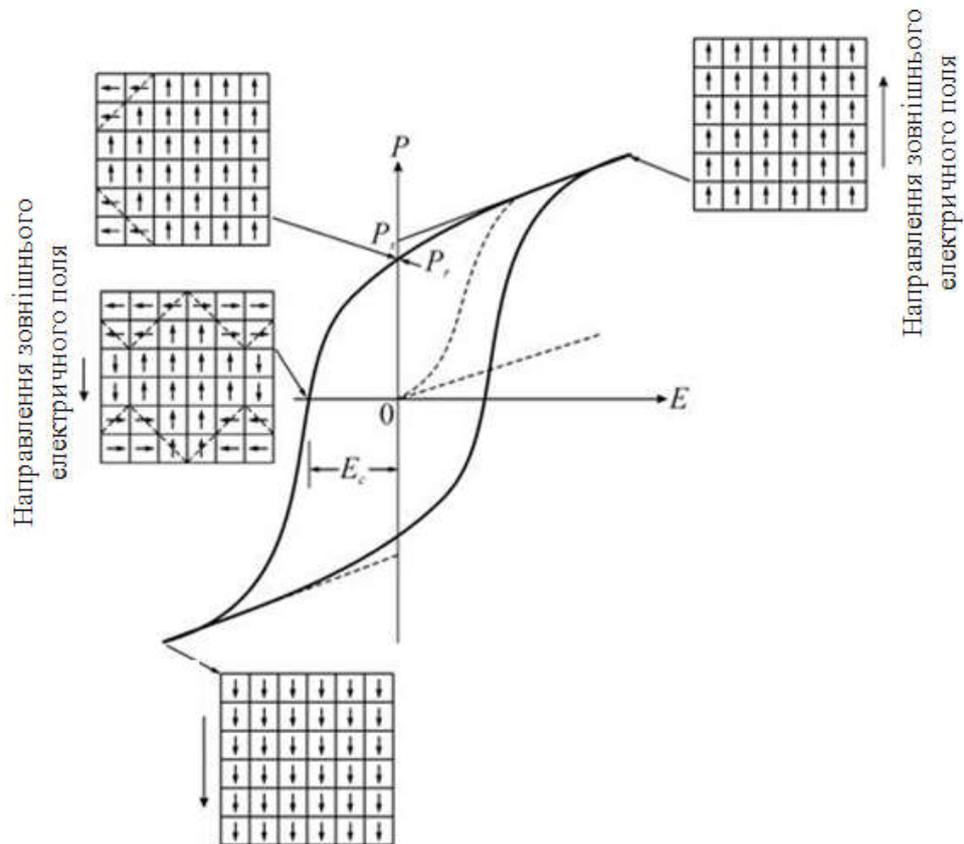


Рис. 8.3 – Петля гістерези для сегнетоелектрика

Фазові переходи між полярним та неполярним станами в сегнетоелектриках можуть бути двох видів: фазові переходи типу зсуву (зсувного характеру) та фазові переходи типу порядок-безлад. У першому випадку при температурі фазового переходу відбувається мимовільне зміщення ґрат кристала, що змінює його симетрію. Це усунення призводить до спонтанної поляризації. Типовим прикладом сегнетоелектриків такого роду є речовини зі структурою перовскіту – титанат барію та його аналоги.

Перехід типу порядок-безлад пов'язаний з тим, що структурні елементи кристала (молекули, іони) можуть перебувати в декількох рівноважних положеннях, кожне з яких характеризується своїм дипольним моментом. За високих температур енергія теплового руху перевищує енергію диполь-дипольної взаємодії. Диполі спрямовані невпорядковано, і сумарна поляризація дорівнює нулю ($P_c=0$). При температурах нижче за температуру фазового переходу роль диполь-дипольної взаємодії зростає настільки, що відбувається спонтанне впорядкування полярних структурних елементів і виникає спонтанна поляризація ($P_c \geq 0$). Прикладом сегнетоелектриків з переходом типу порядок-безлад є сегнетова сіль (назва якої покладено в основу даного класу діелектриків).

Будь-який діелектрик, оточений електродними пластинками, до яких підводиться електричний потенціал, може розглядатися як конденсатор, заряд якого визначається за формулою

$$Q = C \cdot U,$$

де C - ємність конденсатора; U - прикладена до нього напруга.

Заряд Q має дві складові:

$$Q = Q_0 + Q_d,$$

де Q_0 - заряд на електродах, якби їх розділяв вакуум; Q_d - заряд, зумовлений поляризацією діелектрика.

Однієї з найважливіших характеристик діелектрика є його діелектрична проникність, яку звичайно виражають відносно абсолютного значення діелектричної проникності вакууму, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Відносна діелектрична проникність діелектрика - це відношення заряду конденсатора, виготовленого з даного діелектрика, до заряду конденсатора, електроди якого розділяє вакуум:

$$\epsilon_0 = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}.$$

З цього виразу випливає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці і дорівнює одиниці тільки для вакуума.

Таким чином, відносна діелектрична проникність (далі будемо говорити просто діелектрична проникність) – це величина, що показує, у скільки разів сила взаємодії двох електричних зарядів у даному середовищі менше, ніж у вакуумі. Характеризує здатність діелектрика до поляризації і не залежить від вибору системи одиниць.

Ємність плоского конденсатора залежить від діелектричної проникності

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

де S - площа пластини конденсатора; d - відстань між пластинами.

Також, діелектрична проникність залежна від агрегатного стану діелектриків.

8.2. Основні види поляризації діелектриків

Розрізняють два основних види поляризації.

I. Перший вид поляризації – пружна – відбувається в діелектрику під впливом електричного поля практично миттєво без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла. До цього виду поляризації відносяться електронна й іонна поляризація.

Електронна поляризація являє собою пружний зсув і деформацію електронних оболонок атомів і іонів, під дією зовнішнього електричного поля (рис. 8.4), зміщенню протидіє кулонівське притягання електронів до ядра.

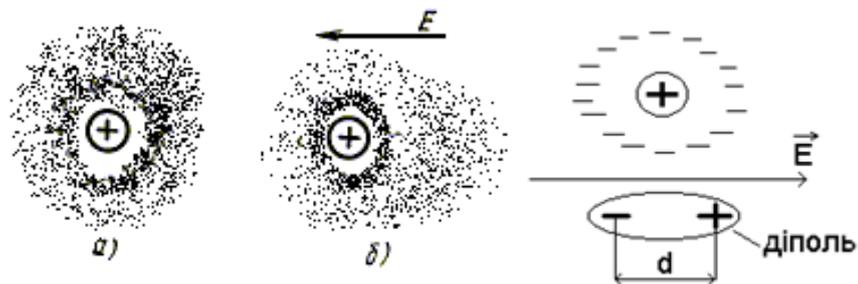


Рис. 8.4 – Схематичне зображення електронної поляризації: а - неполярний атом при відсутності електричного поля; б - полярний атом при дії електричного поля

Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (близько 10^{-15} с). Тому електронну поляризацію умовно називають миттєвою.

Електронна поляризація речовини зменшується з підвищенням температури в зв'язку з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням числа часток в одиниці об'єму. Електронна поляризація спостерігається в усіх видах діелектриків.

Іонна поляризація характерна для твердих тіл з іонною будовою й обумовлюється зміщенням пружно зв'язаних іонів.

З підвищенням температури вона підсилюється в результаті ослаблення пружних сил, що діють між іонами, через збільшення відстані між ними при тепловому розширенні. Час встановлення іонної поляризації – біля 10^{-13} сек.

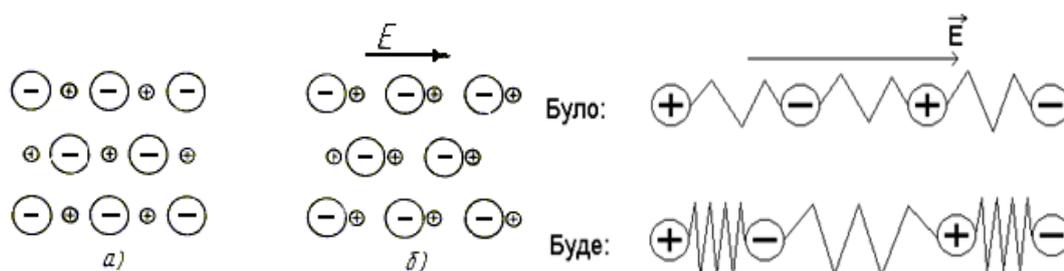


Рис. 8.5 – Схематичне зображення іонної поляризації. Іонна кристалічна решітка: а - при відсутності електричного поля; б - при дії електричного поля

II. Другий вид поляризації – релаксаційна – наростає й убуває повільніше, ніж пружна, і супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням.

Розрізняють наступні види релаксаційної поляризації.

Дипольно-релаксаційна поляризація зумовлена тепловим рухом дипольних молекул, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, і частково орієнтуються під дією поля.

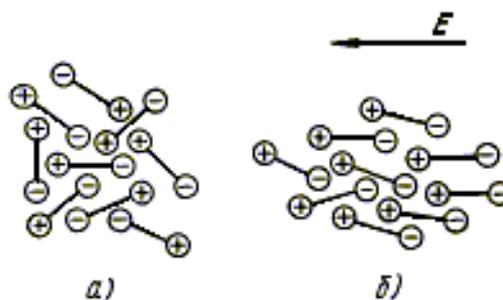


Рис. 8.6 – Схематичне зображення дипольно-релаксаційної поляризації.

Розташування дипольних молекул: а - при відсутності електричного поля; б - при дії електричного поля

Дипольно-релаксаційна поляризація можлива, якщо молекулярні сили не заважають диполям орієнтуватися вздовж поля. Поворот диполів у напрямку поля вимагає подолання деякого опору, а тому дипольно-релаксаційна поляризація супроводжується втратами енергії. Властива полярним газам і рідинам. Цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах.

Іонно - релаксаційна поляризація має місце під впливом зовнішнього електричного поля, коли слабо зв'язані іони речовини одержують надлишкову енергію і можуть рухатися в напрямку поля.

Іонно - релаксаційна поляризація обумовлена зсувом слабо зв'язаних іонів під дією зовнішнього електричного поля на відстань, що перевищує постійну кристалічних ґрат. При цьому виді поляризації виникають втрати енергії і поляризація помітно підсилюється з підвищенням температури. Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в неорганічних кристалічних діелектриках іонної структури з нещільним упакуванням іонів.

Спостерігається в неорганічному склі і в деяких іонних кристалічних неорганічних речовинах з нещільним упакуванням іонів. Зростає з температурою .

Електронно - релаксаційна поляризація виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових «дефектних» електронів або «дірок».

Електронно-релаксаційна поляризація характерна головним чином для діелектриків з високим показником заломлення, великим внутрішнім полем і електронною електропровідністю: двоокису титана, забрудненої домішками, ряду з'єднань на основі окислів металів перемінної валентності – титана, ніобію, вісмуту.

Структурна поляризація проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок. Причинами такої поляризації є провідні і напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів з різною провідністю і т.д.

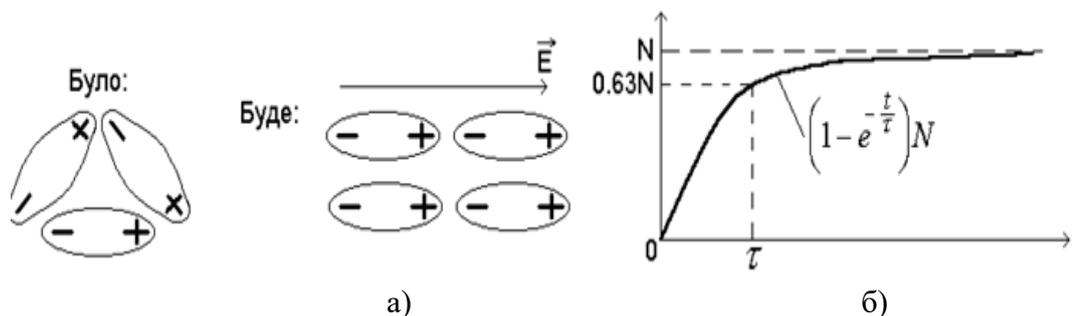


Рис. 8.7 – Структурна поляризація

Процес поляризації з часом відбувається по експоненті, див. рис. 8.7, б. де N - кількість поляризованих молекул, τ - час релаксації діелектрика.

Цей вид поляризації проявляється при низьких частотах і зв'язана зі значним розсіюванням електричної енергії.

Мимовільна (спонтанна) поляризація існує в сегнетоелектриках. Діелектрична проникність при спонтанній поляризації нелінійно залежить від величини напруженості електричного поля і характеризується явно вираженим максимумом при певній температурі. Мимовільна поляризація супроводжується значним розсіюванням енергії.

Речовини з спонтанною поляризацією складаються з окремих областей (доменів), що мають власний електричний момент. У відсутності зовнішнього електричного поля орієнтація електричних моментів різних доменів є довільною. Накладення зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації електричних моментів доменів у напрямку поля, що спричиняє ефект сильної поляризації. При деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає так зване насичення, тобто подальше посилення поля вже не викликає зростання інтенсивності поляризації.

8.3. Класифікація діелектриків за видом поляризації

Всі діелектрики за видом поляризації умовно поділяють на чотири групи.

Перша група – діелектрики, що мають в основному електронну поляризацію. Наприклад, це нейтральні і слабополярні тверді речовини в кристалічному й аморфному станах (парафін, сірка, полістирол), а також нейтральні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень і ін.).

Друга група – діелектрики, що мають одночасно електронну і дипольнорелаксаційну поляризацію. Сюди належать дипольні (полярні) органічні рідкі, напіврідкі і тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза і т.п.).

Третя група - тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною і йонно-електронно-релаксаційною поляризаціями. У цій групі виділяють дві підгрупи матеріалів (через істотне розходження їхніх електричних характеристик):

– діелектрики з електронною й іонною поляризаціями; це кристалічні речовини з щільним упакуванням іонів (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд);

– діелектрики з електронною, іонною і релаксаційною поляризаціями (неорганічне скло, матеріали, що містять склоподібну фазу (порцеляна, мікалекс), кристалічні діелектрики з нещільним упакуванням часток у ґратках).

Четверту групу складають сегнетоелектрики, що характеризуються спонтанною, електронною, іонною і електронно-йоннорелаксаційною поляризаціями (сегнетова сіль, метатитанат барія).

8.4. Діелектрична проникність газів

Газоподібні речовини характеризуються малою густиною внаслідок великих відстаней між молекулами. Завдяки цьому поляризація газів незначна і діелектрична проникність усіх газів близька до одиниці ($\epsilon \cong 1$).

У газах основний вид поляризації – електронний або дипольний (якщо молекули газу полярні).

Діелектрична проникність газу тим вище, чим більше радіус молекули. Однак ця залежність слабка. Наприклад, діаметр молекули вуглекислого газу вдвічі перевищує діаметр молекули гелію ($D_{CO}/D_{HE}=2,3\text{Å}/1,12\text{Å}=2,05$), в той же час значення їх діелектричних проникностей майже на відрізняються ($\epsilon_{CO}/\epsilon_{HE}=1,001/1,000072=1,0009$).

Діелектрична проникність газів прямопропорційна тискові і вологості і оберненопропорційна температурі. Це пояснюється зміною числа молекул в одиниці об'єму газу з зміною температури і тиску. Залежність діелектричної проникності газів від тиску, вологості і температури незначна з практичної точки зору.

Наприклад, при збільшенні тиску повітря в 40 разів його діелектрична проникність збільшується лише на 2%. При зниженні температури від +60 до –60°C діелектрична проникність збільшується на 0,03%. При збільшенні вологості повітря від 0 до 100% діелектрична проникність збільшується на 0,006%.

8.5. Діелектрична проникність рідких діелектриків

Рідкі діелектрики можуть складатися з нейтральних (неполярних) молекул або з дипольних (полярних) молекул.

Нейтральні молекули утворюють **неполярні рідини**. Величина діелектричної проникності неполярних рідин невелика (приблизно у 2,5 рази вище, ніж у газів) і близька до значення квадрата показника переломлення світла². Від в рідині $\epsilon \approx n^2$.

Діелектрична проникність нейтральної рідини залежить від температури і практично не залежить від частоти електричного струму (рис. 8.8). Залежність діелектричної проникності від температури пов'язана зі зменшенням числа молекул в одиниці її об'єму, тобто зі зменшенням густини рідини.

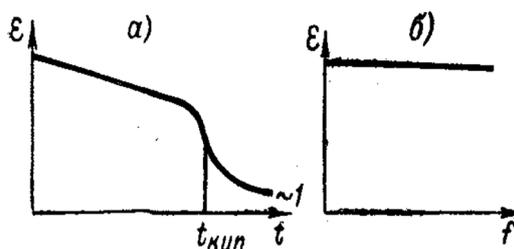


Рис. 8.8 – Залежності діелектричної проникності нейтральної рідини від температури (а) і чистоти струму (б) ($t_{\text{кип}}$ - температура кипіння рідини)

Дипольні молекули утворюють **полярні рідини**. Поляризація рідин, що містять дипольні молекули, визначається одночасно електронним і дипольнорелаксацийним механізмами поляризації. Діелектрична проникність полярних рідин прямо пропорційна величині електричного моменту диполів і кількості молекул в одиниці об'єму. Діелектрична проникність полярних рідин у кілька разів вище, ніж діелектрична проникність нейтральних рідин (наприклад, діелектрична проникність соволу $\epsilon=5,0$).

Сильнополярні рідини (характеризуються дуже високим значенням діелектричної проникності, наприклад вода, етиловий спирт), не можуть знайти практичного застосування як діелектрики внаслідок їхньої великої провідності.

Температурна залежність діелектричної проникності у випадку дипольних рідин має більш складний характер, ніж у випадку нейтральних (рис. 8.9).

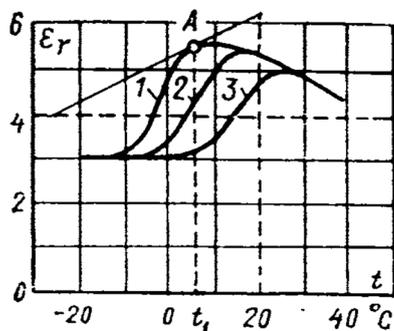


Рис. 8.9 – Залежність діелектричної проникності від температури для совола (полярна рідина): 1 - $f=50$ Гц; 2 - $f=400$ Гц; 3 - $f=1000$ Гц

Температура, при якій відбувається швидке зростання діелектричної проникності, відповідає температурі різкого зменшення в'язкості рідини. При зниженні в'язкості

дипольні молекули мають можливість орієнтуватися, створюючи додаткову поляризацію діелектрика. При подальшому зростанні температури діелектрична проникність зменшується внаслідок посилення теплового руху молекул, що перешкоджає їхній орієнтації в напрямку поля.

Значний вплив на величину діелектричної проникності дипольної рідини має частота (рис. 8.10).

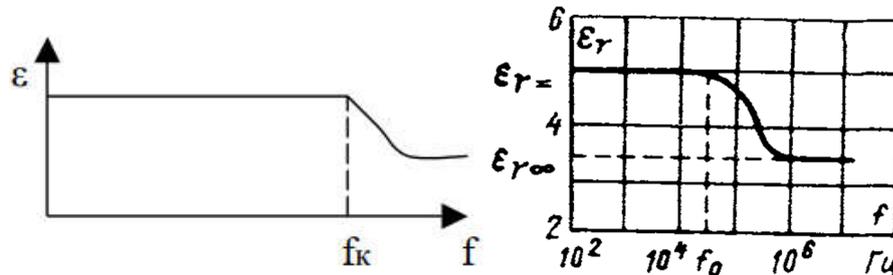


Рис. 8.10 – Залежність діелектричної проникливості від частоти (полярної рідини)

Поки частота мала, диполі встигають змінювати орієнтацію разом з полем, діелектрична проникність ϵ великою і близькою до її значення при постійній напрузі. Коли ж частота стає настільки високою, що молекули вже не встигають слідкувати за змінами поля, діелектрична проникність різко зменшується.

8.6. Діелектрична проникність твердих діелектриків

У твердих тілах можливі усі види поляризації, зазначені вище. Тому діелектрична проникність твердих тіл має широкий діапазон значень.

Нейтральні тверді діелектрики складаються з нейтральних молекул і характеризуються найменшими значеннями діелектричної проникності. Домінуючою в них є електронна поляризація. Діелектрична проникність нейтральних твердих діелектриків приблизно дорівнює квадратові показника переломлення світла: $\epsilon \approx n^2$ (парафін - $\epsilon = 1,9-2,2$; полістирол - $\epsilon = 2,4-2,6$; сірка - $\epsilon = 3,6-4,0$; алмаз $\epsilon = 5,6-5,8$).

Температурна залежність діелектричної проникності нейтральних твердих діелектриків визначається їхньою густиною або числом молекул в одиниці об'єму (рис. 8.11).

При переході парафіну з твердого стану в рідке (температура плавлення близько 55°C) відбувається різке зменшення величини діелектричної проникності внаслідок різкого зниження густини речовини.

Тверді діелектрики, що представляють собою іонні кристали з щільним упакуванням атомів, мають електронну й іонну поляризації і тому характеризуються величинами діелектричної проникності, що лежить у широких межах.

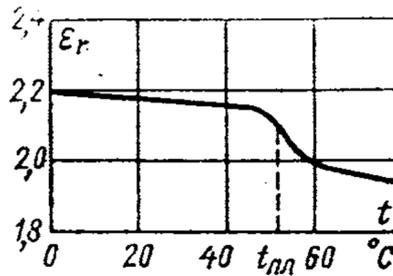


Рис. 8.11 – Залежність діелектричної проникності парафіна (неполярний діелектрик) від температури

Тверді діелектрики, що представляють собою іонні кристали з нещільним упакуванням часток, у яких спостерігається, крім електронної й іонної поляризацій, також і йонно-релаксаційну поляризацію, характеризуються в більшості випадків порівняно невисоким значенням діелектричної проникності. Прикладом може служити високовольтний фарфор ($\epsilon=5$), діелектрична проникність якого суттєво залежить від температури (рис. 8.12).

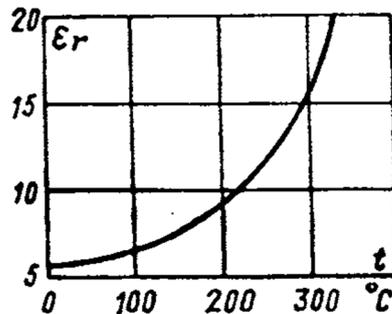


Рис. 8.12. – Температурна залежність діелектричної проникності електротехнічного фарфора

Діелектрична проникність **неорганічного скла**, що наближаються до аморфних діелектриків, лежить у порівняно вузьких межах $\epsilon=4\dots 20$.

Тверді полярні **органічні діелектрики** мають дипольно-релаксаційну поляризацію у твердому стані. До таких діелектриків відносяться целюлоза і полярні полімери. Дипольно-релаксаційна поляризація спостерігається також у льоду. Діелектрична проникність зазначених вище матеріалів великою мірою залежить від температури і від частоти прикладеної напруги таким же чином, як і для дипольних рідин.

Діелектрична проникність **сегнетоелектриків** велика і має різко виражену залежність від напруженості поля і від температури. Характерною рисою сегнетоелектриків є наявність у них діелектричного гістерезиса (відставання змін електричної індукції від змін напруженості електричного поля). До сегнетоелектриків відносяться: сегнетова сіль ($\epsilon=500-600$), метатитанат барію ($\epsilon=1000-1500$), кислий фосфорнокислий калій ($\epsilon=7000-9000$) і ін.

Температура, при якій діелектрична проникність досягає максимуму, називається точкою Кюрі. В області температур вище точки Кюрі втрачаються сегнетоелектричні властивості матеріалу, зокрема зникає залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля.

Діелектрична проникність **твердих складних діелектриків**, що представляють собою суміш компонентів з різними діелектричними проникностями, може бути в першому наближенні (при не занадто великому розходженні діелектричної проникності компонентів) визначена на **підставі рівняння Ліхтенеккера**, що у загальному випадку враховує різні фізичні властивості компонентів (наприклад теплопровідність, показник переломлення та ін.).

Формула Ліхтенеккера:

$$\varepsilon^x = N_1 \varepsilon_1^x + N_2 \varepsilon_2^x,$$

де N_1 і N_2 - це об'ємні концентрації компонентів, ε - відносна діелектрична проникність, $x = 1, 0, 1$; N_1 і N_2 - об'ємні концентрації вінілпласту і ебоніту відповідно.

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке поляризація діелектриків?
2. Які види поляризації ви знаєте?
3. Яким чином температура, вологість, частота та напруженість струму впливають на діелектричну проникність газоподібних, рідких та твердих діелектриків?
4. Як змінюється розташування зарядів у діелектрику під дією електричного поля?
5. Що таке сегнетоелектрики, і чому вони мають аномально високу діелектричну проникність?
6. У чому полягає феномен гістерезису сегнетоелектриків?
7. Як класифікуються діелектрики за видом поляризації? Наведіть приклади.
8. Чим відрізняється пружна поляризація від релаксаційної?
9. Що таке дипольно-релаксаційна поляризація, і для яких речовин вона характерна?
10. Як температура впливає на електронну поляризацію діелектриків?
11. Як залежить діелектрична проникність газів від температури, тиску та вологості?
12. Чим полярні рідини відрізняються від неполярних за діелектричними властивостями?
13. Що характеризує точка Кюрі в сегнетоелектриках?
14. Як за формулою Ліхтенеккера визначається діелектрична проникність складних діелектриків?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Поляризація діелектриків», звернувши увагу на види поляризації (пружна, релаксаційна) та їх фізичний механізм.
2. Підготувати порівняльну таблицю основних видів поляризації: електронна, іонна, дипольно-релаксаційна, іонно-релаксаційна, структурна та спонтанна, вказавши час встановлення та вплив температури.
3. Ознайомитися з прикладами сегнетоелектриків та п'єзоелектриків, підкреслити особливості їхньої спонтанної поляризації, гістерезису та застосування в сучасних електронних та електротехнічних пристроях.
5. Дослідити вплив агрегатного стану, полярності молекул та частоти зовнішнього поля на діелектричну проникність матеріалів.

ТЕМА 9. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета: пояснити природу електропровідності діелектриків, фактори, що впливають на провідність, а також основні механізми, які можуть призвести до провідності в діелектричних матеріалах.

Анотація

В темі розглядаються основні поняття електропровідності діелектриків, включаючи поляризаційні струми та струми наскрізної провідності. Окремо досліджується електропровідність газів, рідин і твердих діелектриків, а також поверхнева провідність твердих ізоляційних матеріалів. Наведено приклади залежності питомої провідності від температури, вологості, стану речовини та домішок. Особлива увага приділяється механізмам електропровідності та впливу фізико-хімічних властивостей матеріалів на їхню електричну поведінку.

Keywords: dielectrics, electrical conductivity, polarization currents, through-conduction currents, surface conductivity, solid dielectric, liquids, gases, insulating materials.

План лекції

1. Основні поняття електропровідності діелектриків;
2. Електропровідність газів;
3. Електропровідність рідин;
4. Електропровідність твердих діелектриків;
5. Поверхнева електропровідність твердих діелектриків.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

9.1. Основні поняття електропровідності діелектриків

Електропровідність діелектриків зумовлена:

- поляризаційними струмами (струми зміщення, абсорбційні струми);
- струмами наскрізної провідності (струми витоку).

Поляризаційні струми викликані поляризаційними процесами зміщення зв'язаних зарядів у речовині. Ці струми при електронній і іонній поляризаціях настільки короткочасні, що їх звичайно не вдається зафіксувати приладом. Спостерігаються у великого числа технічних діелектриків. При постійній напрузі протікають тільки в моменти включення і вимикання напруги. При змінній напрузі мають місце протягом усього часу перебування матеріалу в перемінному електричному полі.

Струми наскрізної провідності є надзвичайно малими, окрім випадку пробою, і зумовлені наявністю в технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів (аналогія зі струмом в металах).

Таким чином, струм в діелектрику представляє собою суму струмів зміщення ($i_{зм}$) і наскрізної провідності ($i_{нп}$):

$$i = i_{зм} + i_{нп}.$$

На рис. 9.1 показаний характер залежності сили струму через діелектрик від часу (τ) при наявності двох типів електропровідності. Після того, як процеси поляризації завершаються, струм зміщення швидко зникає і через діелектрик протікає тільки струм наскрізної електропровідності.

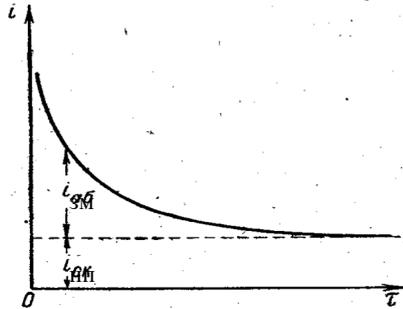


Рис. 9.1 – Залежність сили струму через діелектрик від часу

Провідність діелектрика при **постійній напрузі** визначається наскрізним струмом. При **перемінній напрузі** активна провідність визначається як наскрізним струмом, так і активними складовими поляризаційних струмів.

Особливістю електропровідності переважної більшості діелектриків є її неелектронний (іонний) характер. Дійсний опір діелектрика, що визначає величину наскрізного струму, обчислюється за формулою:

$$R_d = \frac{U}{i},$$

де i - струм; U - прикладена напруга.

Для твердих ізоляційних матеріалів розрізняють **об'ємний і поверхневий опір (провідність)**.

Чисельно **питомий об'ємний опір** дорівнює опору куба з ребром у 1 м, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба. У випадку плоского зразка в однорідному полі питомий об'ємний опір розраховується за формулою

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

де R_v - об'ємний опір зразка, S - площа електрода, h - товщина зразка. Вимірюється в Ом·м.

Питома об'ємна провідність – величина, обернена питомому об'ємному опорі ($\gamma_v = 1/\rho_v$). Питома об'ємна провідність вимірюється в Ом⁻¹·м⁻¹.

Питомий поверхневий опір розраховується за формулою

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

де R_s - поверхневий опір зразка між паралельно розташованими електродами шириною d на відстані l . Вимірюється в Ом.

Питома поверхнева провідність $\gamma_s = 1/\rho_s$ вимірюється в Ом⁻¹.

Повна провідність твердого діелектрика складається з об'ємної і поверхневої провідностей

$$\gamma_\Sigma = \gamma_v + \gamma_s.$$

Електропровідність ізоляційних матеріалів в загальному випадку залежить від стану речовини (газоподібний, рідкий або твердий), від вологості, температури, атмосферного тиску (гази), напруженості електричного поля, деградації фізичних властивостей діелектрика (старіння).

9.2. Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають незначну провідність. Струм у газах може виникнути тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень заряджених часток з молекулами.

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

Електропровідність газу, зумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається **несамостійною**.

Ударна іонізація – виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених часток, яку вони отримують під дією потужного електричного поля, досягає великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, зветься **самостійною**. В слабких полях ударна іонізація відсутня.

Початкова ділянка залежності сили струму від напруги для газу відповідає області виконання закону Ома до напруги насичення (U_n), коли число позитивних і негативних іонів можна вважати постійним (рис. 9.2).

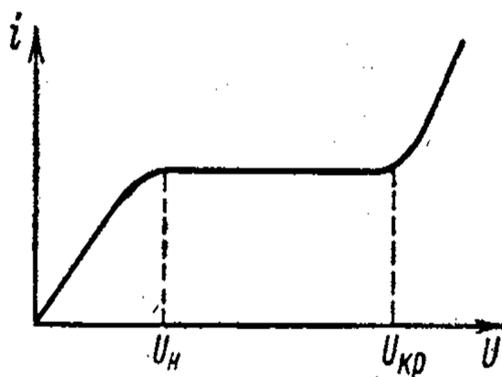


Рис. 9.2 – Залежність сили струму від напруги для газів

Частина негативних іонів з'єднується з негативними часточками, утворюючи нейтральні молекули (процес рекомбінації).

При зростанні величини прикладеної напруги іони досягають електродів, не встигаючи рекомбінуватися, і при деякій напрузі всі іони, утворені в газовому проміжку, розряджаються на електродах. Подальше збільшення напруги вже не буде викликати зростання струму, що відповідає горизонтальній ділянці кривої рис. 9.2 (для повітря струм насичення досягається в нормальних умовах при відстані між електродами 10 мм при напруженості поля близько 0,0006 В/мм).

При деякій критичній напрузі ($U_{кр}$) виникає ударна іонізація, що зумовлює самостійну електропровідність. Сила струму знову починає збільшуватися зі зростанням напруги.

9.3. Електропровідність рідин

Електропровідність рідких діелектриків залежить від їхньої структури, яка визначає, чи є рідина нейтральна, полярна або сильнополярна.

Електропровідність чистих нейтральних рідин є низькою. Тому вони широко використовуються в якості діелектриків. Струм у нейтральній рідині пояснюється переміщенням іонів, а також переміщенням відносно великих заряджених колоїдних частинок.

Електропровідність нейтральних рідин суттєво залежить від наявності дисоційованих домішок, у тому числі води. Очищення рідких діелектриків від домішок підвищує їх питомий опір. При тривалому пропусканні електричного струму через нейтральний рідкий діелектрик відбувається зростання опору за рахунок переносу вільних іонів до електродів (електричне очищення).

У **полярних рідинах** електропровідність визначається не тільки домішками, але і дисоціацією (розпадом молекули або іона на більш прості складові) молекул самої рідини. Полярні рідини завжди мають підвищену провідність у порівнянні з неполярними і за своїми діелектричними властивостями займають проміжне місце між нейтральними і сильнополярними рідинами.

Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Питома провідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Зі збільшенням температури зменшується в'язкість, отже, зростає рухливість іонів і провідність. В інтервалі температур від 0 до 100°C залежність питомої провідності рідких діелектриків від температури є дуже суттєвою і тому виражається експоненційною формулою:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t},$$

де γ_0 і α – постійні для даної рідини; t температура, °C.

На рис. 9.3 представлена така залежність для рідкого масляно-каніфольного компаунда (суміш на основі певної речовини) при $\alpha = 9100$.

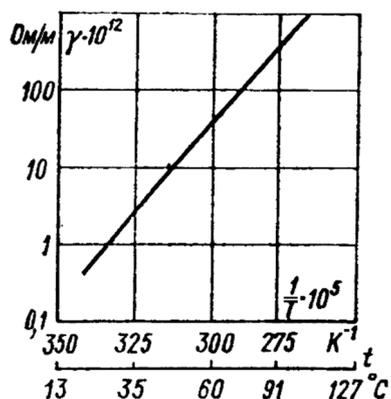


Рис. 9.3 – Залежність питомої провідності масляно-каніфольного компаунда від температури

Провідність рідин прямо пропорційна також і напруженості електричного поля.

Орієнтовні значення питомих опорів різних рідин при 20°C: трансформаторне масло (нейтральна рідина) – $\rho = 10^{10}$ - 10^{13} Ом·м; совол, касторове масло (полярні рідини) – $\rho = 10^8$ - 10^{10} Ом·м; дистильована вода (сильнополярна рідина) – $\rho = 10^3$ - 10^4 Ом·м.

9.4. Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих діелектриків зумовлюється:

- 1) переміщенням іонів самого діелектрика;
- 2) переміщенням іонів випадкових домішок;
- 3) наявністю вільних електронів (електронна провідність).

Вид електропровідності встановлюють експериментально. Наприклад, іонна електропровідність супроводжується переносом речовини на електроди. При електронній електропровідності це явище не спостерігається, але вона стає помітною при сильних електричних полях.

У процесі проходження електричного струму через твердий діелектрик іони домішок, що утримуються в ньому, можуть частково видалятися, виділяючись на електродах; останнє приводить до зменшення провідності з часом і до відповідного спадання струму.

У твердих діелектриках **іонної структури** електропровідність зумовлюється головним чином переміщенням іонів, що вивільняються під впливом підвищеної температури. При низьких температурах пересуваються слабо закріплені іони, зокрема іони домішок.

У кожному окремому випадку питання про механізм електропровідності вирішується на підставі даних про енергію активації носія заряду. Відомо, наприклад, що для кам'яної солі енергія активації іонів натрію при нормальній температурі складає близько 0,85 еВ. Енергія активації іонів хлору в три рази більше, а енергія активації електронів дорівнює 6 еВ, тоді як середня енергія теплового руху при кімнатній температурі складає усього лише 0,025 еВ.

Електронвольт – позасистемна одиниця енергії, що застосовується для виміру енергії і маси мікрочастинок: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Залежність питомого об'ємного опору твердих діелектриків від температури є експоненційною:

$$\rho_v = V e^{\frac{b}{T}},$$

де b і V – постійні для даного матеріалу. На практиці при розгляді залежності ρ_v від температури використовують наближену формулу, у якій замість абсолютної температури T використовують температуру за шкалою Цельсія:

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha t},$$

де ρ_v – питомий об'ємний опір при $t=0^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт. Таким чином, опір твердих діелектриків різко падає з підвищенням температури.

Власна електропровідність твердих тіл, а також її залежність від температури визначаються структурою речовини і його складом.

У тілах кристалічної будови з **іонними ґратами** електропровідність пов'язані з валентністю іонів. Кристали з одновалентними іонами мають більшу провідність, ніж кристали з багатовалентними іонами. Так, для кристала NaCl провідність значно вище, ніж для кристалів MgO або Al₂O₃.

У деяких кристалах провідність не однакова по різних осях кристала (анізотропія властивостей). Так, у кварці провідність у напрямку головної осі приблизно в 1000 разів більше, ніж у напрямку, перпендикулярному цієї осі. Для більшості іонних кристалів $b \approx 10^3$.

У кристалічних тілах з **молекулярними ґратками** (сірка, поліетилен, парафін) питома провідність мала і визначається тільки домішками.

Електропровідність **аморфних тіл** пов'язана насамперед з їхнім складом. Високомолекулярні органічні полімери мають питому провідність, що залежить значною мірою від ряду факторів: хімічного складу і наявності домішок, ступеня полімеризації (наприклад, для фенолформальдегідної смоли), ступеня вулканізації (для ебоніту). Органічні нейтральні аморфні діелектрики, як, наприклад, полістирол, відрізняються дуже малою питомою провідністю.

Кварцове скло має малу питому провідність, яка сильно залежить від температури ($b \approx 22000$), що вказує на велику енергію звільнення іонів. Введення до складу скла окислів важких металів (барію або свинцю) приводить до значного зниження питомої провідності стекл. При розгляді ізоляторного фарфору як системи, що містить скло, виявилось можливим понизити питому провідність цього діелектрика введенням у його склад окису барію.

Рис. 9.4 ілюструє залежність питомого об'ємного опору ізоляторної порцеляни і радіофарфору, що містить окис барію, від температури.

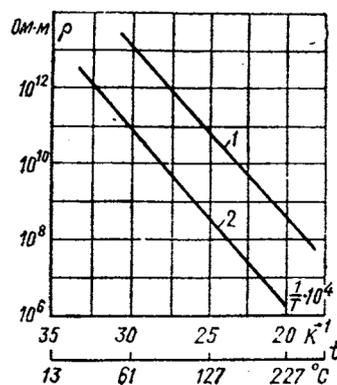


Рис. 9.4 – Залежності питомого об'ємного опору радіофарфору (1) і фарфору (2) від температури

Тверді пористі діелектрики при наявності в них вологи навіть у незначних кількостях різко збільшують свою питому провідність. Висушування матеріалів підвищує питомий опір, але при перебуванні висушених матеріалів у вологому середовищі величина питомого опору знову зменшується.

Дерево: $\rho = 10^{11} - 10^{12}$ Ом·м (20°C; відн. вологість 0%); $\rho = 10^6 - 10^7$ Ом·м (20°C; відн. вологість 70%); $\rho = 10^{11} - 10^{13}$ Ом·м (100°C; відн. вологість 0%).

При великих напруженостях поля в кристалічних діелектриках виникає електронний струм, що швидко зростає зі збільшенням напруженості. При напруженостях поля, що

перевищують 10-100 кВ/мм, залежність електронної електропровідності від сили поля виражається емпіричною формулою:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta E},$$

де E - напруженість поля; γ_0 - питома провідність в області незалежності від E ; β - коефіцієнт, що характеризує матеріал.

Застосування керамічних діелектриків при підвищених температурах викликало необхідність вивчення їхньої електропровідності в залежності від тривалості експлуатації в умовах різних температур і напруженостей електричного поля. Питомий об'ємний опір титанової кераміки зменшується з часом. Керамічні матеріали, на відміну від органічної ізоляції, при відсутності електричного поля не старіють, тобто не зазнають необоротних змін властивостей при дії високих температур у звичайних атмосферних умовах. Однак в електричному полі спостерігається електрохімічне старіння кераміки, раптова втрата електричної міцності діелектрика.

Необоротні зміни в кераміці пов'язані з виходом кисню з кристалічних ґраток. Найбільш ймовірний вихід кисню з поверхні зразка і поблизу всякого роду дефектів - тріщин, пор і ін. Обов'язковою умовою для електрохімічного старіння кераміки є участь в електропровідності хоча б одного виду іонів діелектрика. Якщо електропровідність чисто електронна, електрохімічне старіння не відбувається.

9.5. Поверхнева електропровідність твердих діелектриків

Поверхнева електропровідність зумовлена присутністю вологи або бруду на поверхні діелектрика.

Вода має значну провідність. Досить найтоншого шару вологи на поверхні діелектрика, щоб була виявлена помітна провідність, зумовлена в основному товщиною цього шару. Однак, оскільки опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою матеріалу, на поверхні якого вона знаходиться, поверхневу електропровідність звичайно розглядають як властивість самого діелектрика.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика знаходиться в тісній залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Тому величина відносної вологості є вирішальним чинником, що визначає значення питомої поверхневої провідності діелектрика. Особливо різке зменшення питомого поверхневого опору звичайно спостерігається при значеннях відносної вологості, що перевищують 60-80%.

Питомий поверхневий опір тим вищий, чим менша полярність речовини, чим чистіша поверхня діелектрика і чим краще вона відполірована.

За ступенем поверхневої провідності всі матеріали можна підрозділити на кілька груп (рис. 9.5):

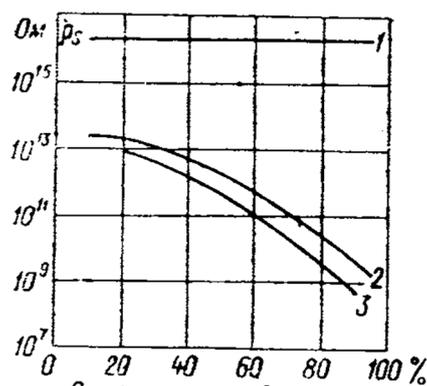


Рис. 9.5 – Залежності питомого поверхневого опору від відносної вологості:
1 - церезин; 2 - лужне скло; 3 - фенопласт

1. Нерозчинні у воді діелектрики.

а) Нейтральні і слабополярні - не змочуються водою (парафін, церезин, полістирол, янтар, сірка).

б) Полярні – деякі види діелектриків, що змочуються (деякі види кераміки).

Усі матеріали цієї групи характеризуються високим питомим поверхневим опором, що мало залежить від вологості навколишнього середовища. До поверхні полярних діелектриків легко прилипають різні забруднення, які знижують поверхневий опір на декілька порядків (табл. 9.1). Тому високий питомий поверхневий опір у вологому середовищі для полярних діелектриків можна одержати тільки при повній відсутності забруднень на їхній поверхні.

Таблиця 9.1 – Питомі поверхневі опори діелектриків при відносній вологості 70%

Діелектрик	ρ_s забрудненої поверхні (Ом)	ρ_s очищеної поверхні (Ом)
лужне скло	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
плавлений кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
мікалекс	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

Для підвищення питомого поверхневого опору, застосовують різноманітні прийоми очищення поверхні - промивання водою, розчинниками, прожарювання при температурі 600-700°C. Найбільш ефективною є очищення поверхні виробу, що не всмоктує воду, тривалим кип'ятінням у дистильованій воді.

2. Частково розчинні у воді діелектрики.

Більшість видів технічного скла, на поверхні якого в результаті часткового розчинення скла утворюється плівка електrolіта. Таким матеріалам властиво більш низький питомий поверхневий опір, значною мірою залежний від вологості.

3. Діелектрики, що мають пористу структуру.

До таких діелектриків відносяться волокнисті матеріали (органічний і неорганічний), мрамур, талькохлорит і більшість пластичних мас. Завдяки пористій структурі у вологому середовищі ці матеріали виявляють велику питому поверхневу провідність.

Просочення поверхневих шарів деталі парафіном або церезином підвищує поверхневий опір, але не забезпечує достатню стійкість значень питомого опору при високій вологості через можливість проникнення вологи в мікропори поверхні виробу через захисні покриття.

Покриття кераміки і скла кремнійорганічними лаками значно підвищує величину питомого поверхневого опору виробів з цих матеріалів у вологому середовищі.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть причини і характер провідності діелектриків.
2. Якими величинами характеризуються електричний опір і провідність діелектриків?
3. Назвіть особливості електропровідності газоподібних, рідких та твердих діелектриків.
4. Яким чином температура впливає на електричний опір газоподібних та рідких діелектриків?
5. Охарактеризуйте поверхневу електропровідність твердих діелектриків та її зв'язок з станом поверхні діелектрика і вологістю зовнішнього середовища.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Електропровідність діелектриків», звернувши увагу на механізми поляризаційних і наскрізних струмів, а також фактори, що впливають на провідність.
2. Підготувати порівняльну таблицю електропровідності газів, рідин і твердих діелектриків із зазначенням питомого об'ємного та поверхневого опору, а також впливу температури, вологості та домішок.
3. Ознайомитися з прикладами самостійної та несамостійної електропровідності газів і пояснити відмінності між цими видами провідності.
4. Проаналізувати вплив структурних особливостей твердих діелектриків (кристалічна, аморфна, пориста будова) на електропровідність та енергетичну активацію носіїв заряду.

ТЕМА 10. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ: МЕХАНІЗМИ, ВИДИ ТА ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними поняттями та механізмами

діелектричних втрат у діелектриках, а також їх впливом на електричні властивості матеріалів в умовах змінного електричного поля.

Анотація

В темі розглядаються основні поняття діелектричних втрат, їх види, фізичні механізми та прояви у газах, рідинах і твердих діелектриках. Особлива увага приділена залежності втрат від частоти змінного поля, температури та структури матеріалу, а також впливу втрат на електричні характеристики ізоляційних матеріалів. Здобувачі вищої освіти отримують знання про природу та види діелектричних втрат, навчаться аналізувати їх залежність від зовнішніх факторів, оцінювати вплив втрат на нагрівання та електричні властивості матеріалів, а також застосовувати ці знання при виборі та експлуатації ізоляційних матеріалів у високовольтних пристроях.

Keywords: dielectric losses, loss tangent, polarization losses, ionization losses, liquid and solid dielectrics, high-voltage equipment.

План лекції

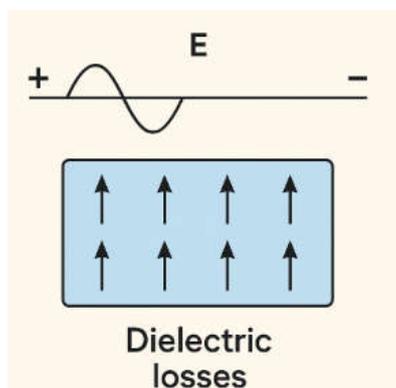
1. Основні поняття про діелектричні втрати;
2. Види діелектричних втрат;
3. Діелектричні втрати в газах;
4. Діелектричні втрати в рідких діелектриках;
5. Діелектричні втрати у твердих діелектриках.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

10.1. Основні поняття про діелектричні втрати

Діелектричними втратами називають енергію, що розсіюється за одиницю часу в діелектрику під впливом електричного поля і спричиняє нагрівання діелектрика. При перемінній напрузі втрати енергії в діелектриках мають місце внаслідок поляризації, а при постійній напрузі – внаслідок виникнення наскрізного струму.



Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання, що може привести до його теплового руйнування.

Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різна в залежності від агрегатного стану речовини.

Діелектричні втрати можуть обумовлюватися наскрізним струмом або активними складовими поляризаційних струмів. При вивченні діелектричних втрат, безпосередньо пов'язаних з поляризацією діелектрика, можна показати це явище у вигляді кривих, що являють собою залежність електричного заряду на обкладках конденсатора з діелектриком від прикладеної до нього напруги (рис. 10.1).

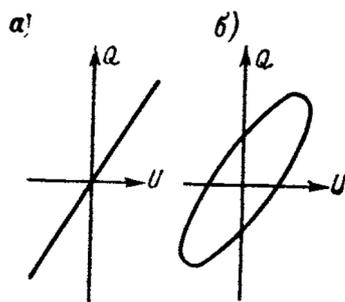


Рис. 10.1 – Залежності заряду конденсатора від напруги для ідеального діелектрика - а і для діелектрика з втратами енергії - б

При відсутності втрат, які були викликані явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги (рис. 10.1, а), і такий діелектрик називається лінійним. Якщо в лінійному діелектрику має місце уповільнена поляризація, пов'язана з втратами енергії, то крива залежності заряду від напруги має вигляд еліпса (рис. 10.1, б). Площа цього еліпса пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги.

Діелектричні втрати характеризуються кутом діелектричних втрат або тангенсом цього кута.

Кутом діелектричних втрат називається кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз ϕ між струмом і напругою в конденсаторному ланцюзі.

У випадку ідеального діелектрика між обкладками конденсатора вектор струму випереджає вектор напруги на кут 90° . При цьому кут $\delta=0$, а це означає, що в ідеальному діелектрику втрат енергії немає. Чим більші діелектричні втрати в діелектрику (тобто енергія, що розсіюється у вигляді тепла), тим меншим є кут зсуву фаз ϕ і тим більшим є кут діелектричних втрат δ і $\text{tg } \delta$ (рис. 10.2).

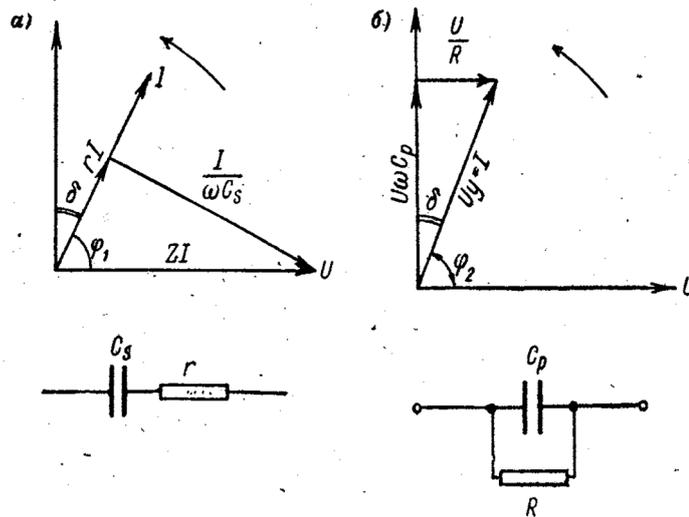


Рис. 10.2 – Векторні діаграми і еквівалентні схеми діелектрика з втратами: а - послідовна; б - паралельна

Великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування.

Якщо напруга, прикладена до діелектрика, недостатньо велика для того, щоб за рахунок діелектричних втрат міг би створитися неприпустимий перегрів, то й у цьому випадку великі діелектричні втрати можуть принести істотної шкоди, збільшуючи, наприклад, активний опір коливальної контури, а також передчасне старіння матеріалу.

Діелектричні втрати, пов'язані з поляризацією діелектрика, зумовлюють специфічні залежності електричного заряду на обкладинках конденсатора з даним діелектриком від прикладеної до конденсатора напруги (рис. 10.1).

При відсутності втрат, викликаних явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги. Якщо в діелектрику має місце поляризація, то крива залежності заряду від напруги має вигляд петлі гістерезиса. Її площа пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги.

Питомі діелектричні втрати (потужність, що розсіюється в одиниці об'єму діелектрика, вимірюється в Вт/м³) визначається формулою:

$$p = \omega \epsilon_0 \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 = \frac{1}{1.8 \cdot 10^{10}} \epsilon f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2,$$

де ϵ_0 - діелектрична постійна ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $\omega = 2\pi f$ - кутова частота (рад/с); E - напруженість електричного поля (В/м).

З формули випливає, що розрахунок діелектричних втрат важливий для матеріалів, що експлуатуються в умовах високої напруги, у високочастотній апаратурі й особливо у високовольтних високочастотних пристроях, оскільки величина діелектричних втрат пропорційна частоті струму і квадрату прикладеної до діелектрика напруги.

10.2. Види діелектричних втрат

Діелектричні втрати за їх фізичною природою можна розділити на чотири основних види:

- 1) діелектричні втрати, зумовлені поляризацією;
- 2) діелектричні втрати наскрізної електропровідності;

- 3) іонізаційні діелектричні втрати;
- 4) діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури.

Діелектричні втрати, зумовлені поляризацією, спостерігаються у діелектриках дипольної структури і у діелектриках іонної структури з нещільним упакуванням іонів (релаксаційні діелектричні втрати). Релаксаційні втрати зростають з частотою струму і тому спостерігаються при радіочастотах і надвисоких частотах.

Температурна залежність тангенса кута релаксаційних діелектричних втрат має максимум при деякій температурі, що характерна для даної речовини. При цій температурі час релаксації часток діелектрика близький до періоду зміни прикладеного перемінного електричного поля.

Діелектричні втрати, зумовлені наскрізною електропровідністю, виявляються в діелектриках, що мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Діелектричні втрати цього виду не залежать від частоти поля і зростають з температурою експоненційно:

$$\rho_t = A e^{-\frac{b}{T}},$$

де A і b - постійні матеріалу.

Іонізаційні діелектричні втрати властиві діелектрикам у газоподібному стані. Іонізаційні втрати мають місце в неоднорідних електричних полях при напруженостях, що перевищують значення початкової іонізації даного газу. Іонізаційні втрати можуть бути обчислені за формулою

$$p_i = A_i f(U - U_0),$$

де A_i - постійний коефіцієнт; f - частота поля; U - прикладена напруга; U_0 - напруга, що відповідає початку іонізації.

Діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури. Неоднорідність структури діелектрика має місце через випадкові домішки (вологи, окислів заліза, вуглецю) або через компоненти, що навмисно додають до діелектрика для бажаної зміни його властивостей. До числа неоднорідних діелектриків відносять просочений папір, пластичні маси з наповнювачем, пористу ізоляцію, що містить повітря і домішки вологи, пористу кераміку.

10.3. Діелектричні втрати в газах

Діелектричні втрати в газах при напруженостях поля, нижчих значення ударної іонізації молекул газу, дуже малі і тому газ можна розглядати як ідеальний діелектрик. Джерелом діелектричних втрат в газах в основному є наскрізна провідність, оскільки орієнтація дипольних молекул газів при їхній поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

При високих напруженості і неоднорідності поля, коли напруженість в окремих місцях перевищує деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, наслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може привести до розігріву і руйнування виробів з газовою ізоляцією.

Виникнення іонізації газу, що заповнює закриті пори у твердій ізоляції, приводить до такого ж руйнування. Іонізація повітря супроводжується утворенням озону й окислів азоту, що викликає хімічне розкладання органічної ізоляції, що містить газові включення.

На рис. 10.3 наведена залежність $tg\delta = f(U)$ для газової ізоляції.

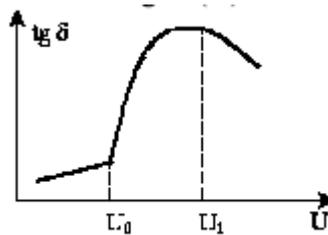


Рис. 10.3 – Іонізаційна характеристика ізоляції

При напрузі U_0 відбувається початок іонізації газу в порах і $\text{tg} \delta$ помітно росте, а при напрузі U_1 в повітряних включеннях газ уже іонізований і енергія на процес іонізації не витрачається, $\text{tg} \delta$ зменшується. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може призвести до розігріву діелектриків та їх руйнування, якщо напруга буде вище значення U_0 .

На високовольних лініях електропередач втрати на іонізацію повітря біля поверхні дротів (**явище корони**) знижують коефіцієнт корисної дії лінії.

10.4. Діелектричні втрати в рідких діелектриках

У чистих нейтральних рідинах діелектричні втрати зумовлені тільки електропровідністю. Оскільки їх питома провідність надзвичайно мала, то малі і діелектричні втрати.

Полярні рідини в залежності від умов (температури, частоти) можуть мати помітні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією.

Застосовувані в техніці рідкі діелектрики є сумішами нейтральних і дипольних речовин (наприклад масляно-каніфольні компаунди), або є полярними рідинами (касторова олія, совол).

Діелектричні втрати в рідких діелектриках з полярними молекулами суттєво залежать від величини в'язкості. Дипольні молекули під впливом електричного поля розвертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати енергії на тертя з виділенням тепла. Якщо в'язкість рідини велика, молекули не встигають слідкувати за зміною поля і дипольна поляризація практично зникає; діелектричні втрати при цьому будуть малі. Дипольні втрати будуть також малі, якщо в'язкість рідини досить мала й орієнтація молекул відбувається без тертя.

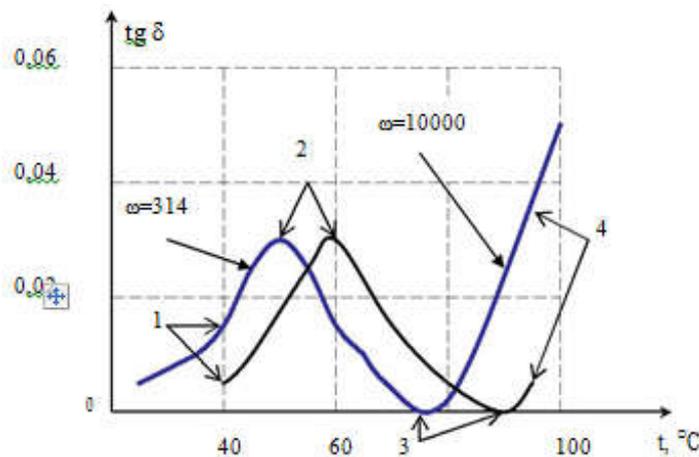


Рис. 10.4 – Залежність діелектричних втрат від температури для масляноканіфольного компаунда

При середніх значеннях в'язкості дипольні втрати можуть є значними і при деякій в'язкості мають максимум (рис. 10.4). Подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням температури пояснюється ростом електропровідності.

На графіках (рис. 10.4) виділено чотири області, що характеризують:

1 - якщо в'язкість речовини велика (при малих t), то молекули не встигають зорієнтуватися при змінні поля і дипольно-релаксаційна поляризація зникає ($\text{tg}\delta$ має мале значення (початок кривих));

2 - при середніх в'язкостях дипольні втрати можуть бути суттєві і при деякому значенні в'язкості мають максимум;

3 - дипольні втрати будуть малими, коли орієнтація молекул відбувається без тертя (мінімум кривої);

4 - подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням t пояснюється ростом електропровідності (за рахунок діелектричних втрат наскрізної електропровідності).

Характер залежностей потужності P_a , що розсіюється при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику, а також $\text{tg}\delta$ від частоти показаний на рис. 10.5:

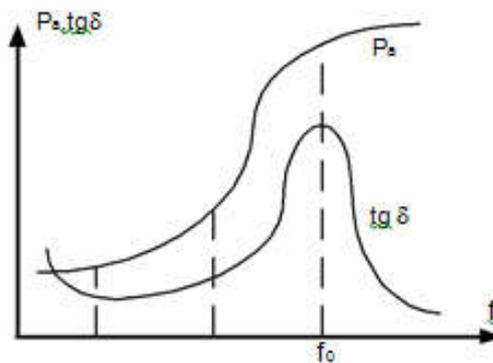


Рис. 10.5 – Залежність P_a і $\text{tg}\delta$ від частоти для дипольної рідини

Втрати зростають з частотою доти, поки поляризація встигає слідувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки велика, що дипольні молекули вже не встигають орієнтуватися в напрямку поля і $\text{tg}\delta$ падає, то втрати P_a стають постійними згідно з формулою $P_a = U_2 w C \text{tg}\delta$. Таким чином, характер залежності діелектричних втрат P_a від частоти не відповідає характерові частотної залежності $\text{tg}\delta$. Дипольно-релаксаційні втрати в малов'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менше втрат наскрізної електропровідності.

10.5. Діелектричні втрати у твердих діелектриках

За структурою тверді діелектрики розділяють на чотири групи:

- 1) діелектрики молекулярної структури;
- 2) іонної структури;
- 3) сегнетоелектрики;
- 4) діелектрики неоднорідної структури.

Діелектричні втрати в **діелектриках молекулярної структури**, залежать від полярності (неполярності) молекул. У твердих діелектриках з неполярних молекул (без домішок), діелектричні втрати мізерно малі (сірка, парафін, неполярні полімери - поліетилен, політетрафторетилен (фторопласт-4), полістирол і ін.). В зв'язку з малими втратами знаходять застосування як високочастотні діелектрики.

Діелектрики з полярних молекул – це головним чином органічні речовини, що широко використовуються в техніці (матеріали на основі целюлози - папір, картон і ін., полярні полімери - поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон і ін.) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолформальдегідні смоли (бакеліт і ін.), ефіри целюлози (ацетилцелюлоза й ін.). Діелектричні втрати в цих діелектриках залежать від температури (рис. 10.6). Максимум втрат пояснюється збільшенням втрат від електропровідності.

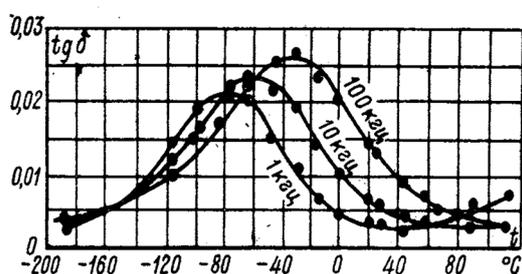


Рис. 10.6 – Залежність діелектричних втрат від температури для сухого паперу

Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури пов'язані з особливостями упакування іонів у ґратах. У речовинах кристалічної структури з щільним упакуванням іонів при відсутності домішок, що спотворюють кристалічні ґратки, діелектричні втрати досить малі. При підвищених температурах в таких речовинах з'являються втрати від електропровідності (кристалічні неорганічні з'єднання, наприклад, корунд, що входить до складу ультрафарфору, кам'яна сіль, чисті кристали якої мають незначні діелектричні втрати). Домішки, що спотворюють ґратки, збільшують діелектричні втрати.

До діелектриків кристалічної структури з нещільним упакуванням іонів відноситься кристалічні речовини, які характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати (муліт, що входить до складу ізоляторного фарфору; кордієрит - компонент кераміки з малим температурним коефіцієнтом розширення; мінерал циркон, що входить до складу вогнетривкої кераміки). Для більшості видів електрокераміки кількості іонів, що беруть участь у релаксаційній поляризації, суттєво зростає з температурою, тому температурна залежність втрат має експоненційний характер (рис. 10.7).

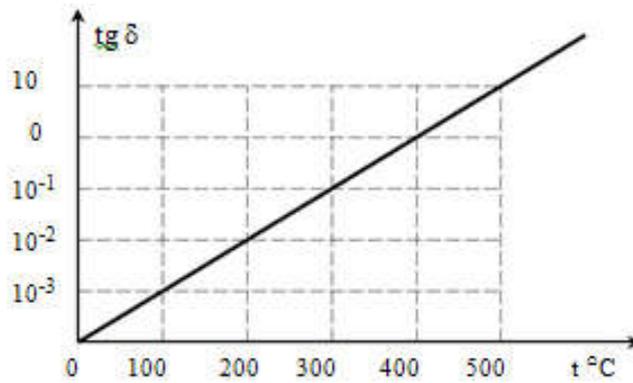


Рис. 10.7 – Температурна залежність діелектричних втрат кераміки, що містить титан ($f=50$ Гц)

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності (технічне скло, кварцове скло). Чисте кварцове скло має малі втрати. Введення в плавлений кварц невеликої кількості окислів викликає помітне, зростання діелектричних втрат через порушення внутрішньої структури скла. Термічна обробка (відпал, гартування) суттєво впливає на величину кута діелектричних втрат скла в зв'язку зі зміною його структури.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках є відносно значними. Особливістю сегнетоелектриків є наявність в них власної поляризації, що характеризується різко вираженою залежністю від температури і має максимум при визначеній температурі (точка Кюрі). При температурах вище точки Кюрі сегнетоелектричні властивості втрачаються.

Тверді матеріали неоднорідної структури – це матеріали, до складу яких входить не менш двох компонентів, механічно змішаних між собою. Насамперед це кераміка і слюда. У складі кераміки розрізняють кристалічну фазу, склоподібну фазу і газову фазу (гази в закритих порах). Діелектричні втрати в кераміці як правило високі і залежать від характеру і кількісного співвідношення кристалічної і склоподібної фаз. Газова фаза в кераміці, а також адсорбована волога (при наявності відкритої пористості) викликають підвищення втрат при високих напруженостях електричного поля.

На рис. 10.8 показана залежність $\text{tg } \delta$ від t °C для конденсаторного паперу. Вона має два максимуми: перший (при низьких температурах) характеризує дипольно-радикальні втрати самого паперу (целюлози), другий (при більш високій температурі) обумовлений дипольно-релаксацийними втратами просочувального компаунда.

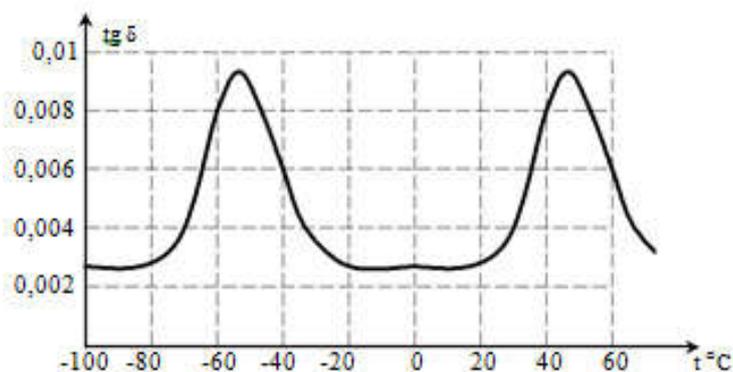


Рис. 10.8 – Залежність $\text{tg}\delta$ від t °C для конденсаторного паперу, просоченого компаундом (80% каніфолі, 20% трансформаторного масла)

В сучасній електроізоляційній техніці неоднорідні діелектрики мають досить широке використання.

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке діелектричні втрати в діелектриках?
2. Якими величинами характеризуються діелектричні втрати в діелектриках?
3. Які види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах ви знаєте?
4. Яким чином температура і частота електричного струму впливає на діелектричні втрати в рідких і твердих діелектриках?
5. Діелектричні втрати при послідовній схемі заміщення діелектриків.
6. Діелектричні втрати при паралельній схемі заміщення діелектриків.
7. Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах.
8. Діелектричні втрати в газах.
9. Діелектричні втрати в рідких діелектриках.
10. Діелектричні втрати в твердих діелектриках.
11. Залежність $\text{tg}\delta = f(U)$ для газової ізоляції.
12. Залежність $\text{tg}\delta$ від t °C при різних частотах.
13. Залежність P_a і $\text{tg}\delta$ від частоти для дипольної рідини.
14. Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури.
15. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках.
16. Діелектричні втрати твердих речовин неоднорідної структури.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Механізми діелектричних втрат», звернувши увагу на релаксаційну (поляризаційну) поведінку, втрати через наскрізну електропровідність, іонізаційні процеси та вплив неоднорідностей структури. Навести по 2–3 приклади джерел (підручники, статті).

2. Підготувати порівняльну таблицю діелектричних втрат у газах, рідинах і твердих діелектриках із зазначенням: домінуючого механізму втрат, типових значень $\text{tg}\delta$ (приблизно), частотної та температурної залежності, а також впливу домішок і вологості.

3. Ознайомитися з прикладами експериментальних проявів втрат (петля гістерезису $Q-U$ у конденсаторі, коронні втрати, іонізація в порах кераміки) і пояснити фізичну природу кожного випадку та наслідки для ізоляції.

ТЕМА 11. ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ ТА МЕХАНІЗМИ ЙОГО ВИНИКНЕННЯ В ГАЗАХ, РІДИНАХ І ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛАХ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з поняттям пробою діелектриків, механізмами виникнення пробою в різних умовах, а також факторами, що впливають на пробійні характеристики матеріалів.

Анотація

Тема присвячена вивченню фізичної природи електричного пробою діелектриків, його основним характеристикам та чинникам, що впливають на електричну міцність матеріалів. Розглянуто явище пробою як процес раптової втрати ізоляційних властивостей під дією електричного поля, наведено визначення напруги та напруженості пробою. Детально проаналізовано механізми пробою в газах, рідких та твердих діелектриках, а також умови, за яких кожен із видів пробою проявляється. Особлива увага приділяється впливу структури матеріалів, домішок, температури, тиску, вологості та неоднорідності поля на пробійні характеристики.

Keywords: dielectric breakdown; electrical strength; breakdown voltage; breakdown voltage; gas breakdown; ionization; corona discharge; breakdown of liquid dielectrics; impurities.

План лекції

1. Основні поняття про пробій діелектриків;
2. Пробій газів;
3. Пробій рідких діелектриків;
4. Електричний пробій твердих діелектриків.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

11.1. Основні поняття про пробій діелектриків

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають у сильному електричному полі і призводять до раптового (різкого) місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою. Якщо діелектрик знаходиться в електричному полі і коли його напруженість перевищить критичне значення $E > E_{кр}$, то діелектрик втрачає властивості електроізоляційного матеріалу.

Кожен діелектрик здатен витримати певну напругу, яка залежить від його фізичних властивостей.

Втрата діелектриком електроізоляційних властивостей під дією електричного поля називається **пробоєм діелектрика** (або втратою його електричної міцності). Напруга, при якій відбувається пробій діелектрика, називається **напругою пробою**.

Напруженість пробою (електрична міцність діелектрика) – це значення напруженості поля, що відповідає нарузі пробою. Напруженість пробою визначається величиною напруги пробою $U_{пр}$, віднесеної до товщини діелектрика в місці пробою h :

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}.$$

Електричну міцність діелектриків зручно виражати в кВ/мм. У системі СІ $1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}$.

11.2. Пробій газів

У багатьох видах електротехнічних конструкцій (у трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередач) ізоляцією є повітря, рис. 11.1.



Рис. 11.1 – Ізоляція ЛЕП

Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з більшістю рідких і твердих діелектриків. Пробій повітря, як і інших газів, варто розглядати, як наслідок розвитку процесів ударної і фотоіонізації.

Звичайно пробій газу відбувається практично миттєво: тривалість підготовки пробою газу при відстані між електродами 1 см складає 10^{-7} - 10^{-8} сек.

Явище пробою газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, у якому здійснюється пробій.

Однорідне поле. Однорідне поле має місце між плоскими електродами з закругленими кінцями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає практично миттєво при досягненні напруги строго визначеної величини, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, що потім переходить у дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність.

При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності через складність досягнення електронами швидкостей, необхідних для іонізації молекул.

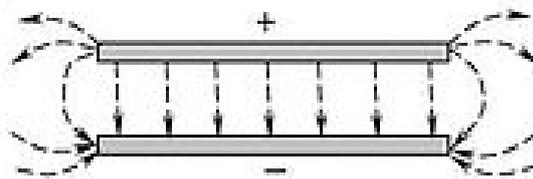


Рис. 11.2 – Однорідне електричне поле

Коли вектори напруженості в усіх точках поля мають однакове значення і напрям, лінії напруженості є прямими лініями, паралельні вектору напруженості, і густина ліній напруженості у всіх ділянках цього поля постійна, таке поле називається **однорідним**.

Напруженість пробою газу в однорідному полі прямопропорційна напрузі і щільності газу, і оберненопропорційна відстані між електродами.

На рис. 11.3 показана залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля.

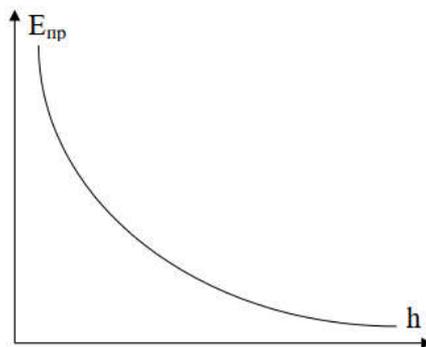


Рис. 11.3 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля

З графіка видно, що при невеликих відстанях між електродами значно збільшується електрична міцність. Це явище пояснюється важкістю формування розряду при малій відстані між електродами.

Велику електричну міцність вакууму використовують у техніці при виготовленні вакуумних конденсаторів для великих напруг високої частоти.

Гази при великих тисках застосовуються як ізоляцію для високовольної апаратури, а також у виробництві кабелів і конденсаторів високої напруги.

Мінімальне значення пробивних напруг для різних газів лежить у межах 280-420В. Для повітря мінімальна пробивна напруга складає близько 300 В.

Неоднорідне поле. Неоднорідне поле має місце між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередач, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери, і т.д.

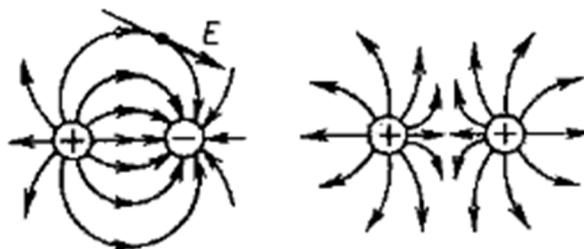


Рис. 11.4 – Неоднорідне електричне поле

Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

На рис. 11.5 приведені значення пробивної і коронної напруги для повітря, отримані при дослідженні пробою між двома паралельними від двома дротами діаметром 8 мм при різних відстанях між ними. Як видно, при малих відстанях значення пробивної і коронної напруг близькі, але при великих відстанях поява корони передуює пробоеві.

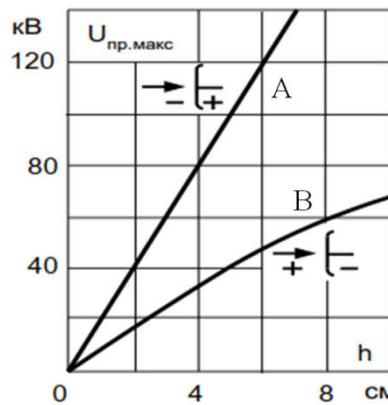


Рис. 11.5 – Залежність коронної (А) і пробивної (В) напруги для повітря відстані між паралельними проводами

Напруга пробою є тим нижчою, чим вищою є частота струму. Збільшення відносної вологості повітря істотно знижує напругу пробою.

На рис. 11.6 наведена залежність електричної міцності газу від тиску. При великих значеннях тиску та, відповідно, підвищеній щільності газу відстань між молекулами менша, тому і довжина вільного пробігу електронів теж зменшується, і для того, щоб відбувся пробій, напруженість поля має бути збільшеною.

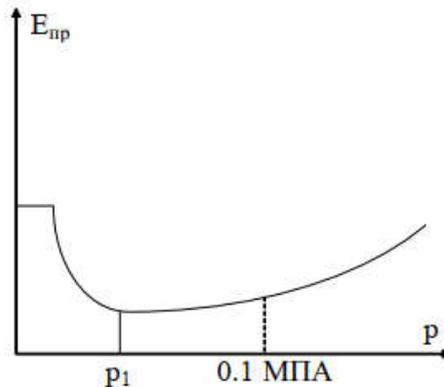


Рис. 11.6 – Залежність електричної міцності газу від тиску

При зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, як видно з рисунка, коли тиск доходить до певної межі, нижчої від атмосферного тиску, розрідження газу досягає високого ступеня, електрична міцність зростає (це використовують у повітряних вимикачах). Таке зростання пояснюється зменшенням кількості молекул газу в одиниці об'єму при сильному розрідженні та, відповідно, зниженням імовірності зіткнення електронів з молекулами. У цьому випадку електрична міцність досягає достатньо високих значень. Це явище використовують для конструювання вакуумних вимикачів.

Як діелектрик повітря має такі позитивні властивості: швидко відновлює свою електричну міцність після пробою, незначно змінює діелектричну проникність, діелектричні втрати повітря практично дорівнюють нулю.

11.3. Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються значно більш високою електричною міцністю, ніж гази.

Теорії механізму пробою рідин:

1). **теплова теорія** пов'язує пробій технічних рідких діелектриків з частковим перегрівом рідини і скипанням її в місцях найбільшої кількості домішок, що приводять до утворення газового містка між електродами.

2). **теорія іонізаційного пробою** (для рідин, максимально очищених від домішок).

3). **теорія чисто електричного пробою** рідких діелектриків пов'язує явище пробою з вириванням електронів з металевих електродів або з руйнуванням самих молекул рідини.

Домішки суттєво впливають на електричну міцність рідких діелектриків. Так, збільшення змісту води в нафтовому маслі від 0 до 0,05% знижує напруженість пробою в 5 разів.

Постійними домішками є вода, гази, тверді частинки. Пробій рідин, що мають газові включення, пояснюється місцевим перегріванням рідини. Вплив води, що не змішується з трансформаторним маслом при нормальній температурі, коли вода тримається в маслі у вигляді окремих крапельок, показано на рис. 11.7.

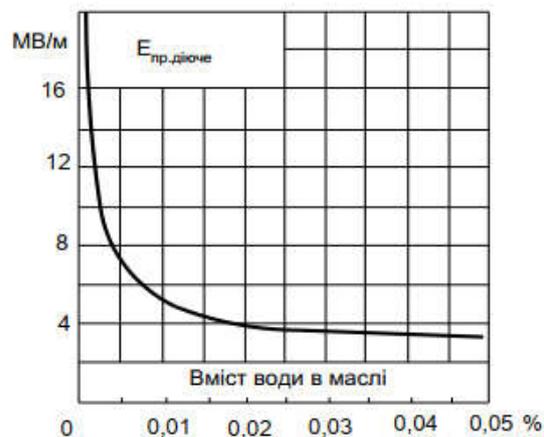


Рис. 11.7 – Залежність електричної міцності від наявності води в трансформаторному маслі

Під впливом електричного поля крапельки води (сильно полярної рідини) поляризуються і створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких відбувається електричний пробій.

На рисунку 11.8 показаний вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла з домішками води.

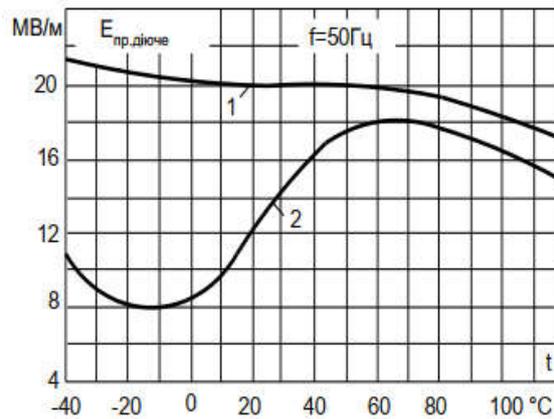


Рис. 11.8 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури (1 - висушене масло; 2 - експлуатаційне масло)

Електрична міцність чистого масла від температури не залежить в межах до 80 °С. При 80 °С починається кипіння легких масляних фракцій і поява великої кількості кульок пару в рідині, що призводить до зниження електричної міцності. Наявність води знижує електричну міцність масла при низькій і нормальній температурі. Збільшення $E_{пр}$ при підвищенні температури обумовлене переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину. Подальше зниження $E_{пр}$ пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких t °С пов'язане зі збільшенням в'язкості масла і меншим значенням діелектричної проникності льоду у порівнянні з водою. Тверді забруднення (сажа, обривки волокон) спотворюють електричне поле всередині рідини і також призводять до зниження електричної міцності. Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність.

11.4. Електричний пробій твердих діелектриків

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- електричний пробій однорідних діелектриків;
- електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- електрохімічний пробій;
- тепловий (електротепловий) пробій;

Кожний з зазначених видів пробою може мати місце у твердому діелектрику в залежності від характеру електричного поля (постійною або перемінною, імпульсного, з низькою або високою частотою), наявності в діелектрику дефектів, умов охолодження, часу дії напруги тощо.

Електричний пробій однорідних діелектриків за своєю природою є чисто електронним процесом, коли у твердому тілі при певній напруженості електричного поля утворюється електронна лавина.

Характеризується швидким розвитком, протікає за час 10^{-7} - 10^{-8} с без виділення теплової енергії, хоча величина електричної міцності при електричному пробі до деякої міри залежить від температури. Такий вид пробою спостерігається в деяких монокристалах (молібденове скло) і в деяких органічних полімерах. В цьому випадку $E_{пр}$ досягає більш 300 кВ/мм.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків спостерігається у технічних діелектриків, що містять газові включення. Характеризується швидким розвитком.

Має місце в деяких видах скла, фарфору, кераміки. Пробивні напруги для неоднорідних діелектриків зазвичай

$$E_{пр}=10-30 \text{ кВ/мм.}$$

Електрична міцність твердих неоднорідних діелектриків практично не залежить від температури до деякого значення останньої. При перевищенні цього значення спостерігається помітне зниження електричної міцності, що говорить про появу механізму теплового пробою (рис. 11.9).

Низькою електричною міцністю відрізняються неоднорідні діелектрики з відкритою пористістю (мармур, непросочений папір, дерево, пориста кераміка). Їх електрична міцність лежить в межах $E_{пр}=1-10 \text{ кВ/мм.}$

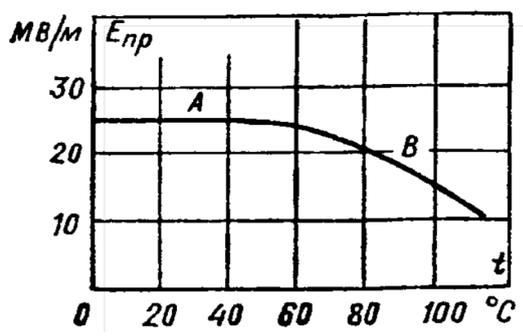


Рис. 11.9 – Залежність електричної міцності електротехнічного фарфору від температури ($f=50 \text{ Гц}$): А - область електричного пробою; В - область теплового пробою

Електрохімічний пробій ізоляційних матеріалів пов'язаний зі зміною їх хімічних властивостей. Зазвичай спостерігається при підвищених температурах і високій вологості повітря.

Часто призводить до старіння діелектрика в електричному полі (тобто до деградації фізичних і механічних властивостей), в результаті чого відбувається поступове зниження електричної міцності. Явище старіння характерне для електролітів, органічних діелектриків (просочений папір, гума і т.д.), і для деяких неорганічних діелектриках, наприклад, для титанової кераміки.

Срібло, дифундуючи в кераміку, полегшує електрохімічний пробій, на противагу, наприклад, золоту.

Тепловий пробій твердих діелектриків виникає в результаті матеріалу в електричному полі до температур, при яких має місце його розтріскування, оплавлення, обуглювання і інші види термічного руйнування. Явище теплового пробою пов'язане з надмірним зростанням наскрізної електропровідності або діелектричних втрат.

Напруга, при якій відбувається тепловий пробій є характеристикою не стільки самого діелектрика, скільки виготовленого з нього електроізоляційного виробу.

Пробивна напруга при тепловому пробіі залежить від частоти поля, умов охолодження, температури навколишнього середовища й ін. Крім того, напруга теплового пробою залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики за інших рівних

умов мають більш низькі значення пробивних напруг при тепловому пробої, ніж неорганічні, внаслідок меншої нагрівостійкості.

Для нормальної роботи ізолятора має бути забезпечений відвід тепла. У більшості випадків тепловідвід зумовлюється природньою конвекцією повітря (підвісні і опорні ізолятори, керамічні конденсатори, каркаси котушок індуктивності). Тепловідвід за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, вмонтованих у стіни. В приладах, комп'ютерах використовується примусове охолодження складових частин, які інтенсивно розігріваються.

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке пробій діелектриків і якою величиною він характеризується?
2. Особливості пробою газоподібних та рідких діелектриків.
3. Назвіть види пробою твердих діелектриків.
4. Яким чином температура і частота струму впливає на електричну міцність твердих діелектриків?
5. Коли в електроізоляційних матеріалах настає тепловий пробій?
6. Коли в електроізоляційних матеріалах настає іонізаційний пробій?
7. Коли в електроізоляційних матеріалах настає електрохімічний пробій?
8. Від чого залежить електрична міцність електроізоляційних матеріалів?
9. Наведіть приклади використання залежності електричної міцності від тиску в електроустановках.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Пробій діелектриків», звернувши увагу на механізми пробою в газах, рідинах і твердих діелектриках, роль іонізації, теплових процесів, електромеханічного руйнування та вплив неоднорідностей електричного поля. Навести по 2–3 приклади джерел (підручники, монографії, наукові статті).

2. Підготувати порівняльну таблицю пробійних характеристик газових, рідких і твердих діелектриків, вказавши:

- типові значення напруженості пробою;
- домінуючий механізм пробою;
- залежність пробійної напруги від температури, тиску, вологості та наявності домішок;
- вплив геометрії електродів і неоднорідності поля.

3. Ознайомитися з експериментальними проявами пробою та передпробійних процесів, такими як коронні розряди, стримерний розряд, пробій у рідких діелектриках через домішки та бульбашки, електромеханічні тріщини в твердих матеріалах. Пояснити фізичну природу кожного явища та можливі наслідки для ізоляційних систем.

4. Проаналізувати вплив структури твердих діелектриків (кристалічна, аморфна, композитна, пориста будова) на механізми пробою та поведінку носіїв заряду. Навести приклади матеріалів із різною структурою та порівняти їхню електричну міцність.

ТЕМА 12. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ВЛАСТИВОСТІ ТА СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними типами та властивостями діелектричних матеріалів, їх застосуванням в електроніці, енергетиці та інших галузях.

Анотація

В темі розглянуто фундаментальні властивості діелектричних матеріалів, їх класифікацію, механізми поляризації та провідності, а також ключові фактори, що визначають їхню поведінку в електричних полях. Особлива увага приділяється діелектричним втратам, їх фізичній природі та залежності від частоти, температури й структурних особливостей матеріалу. Наведено порівняння властивостей газоподібних, рідких і твердих діелектриків, а також аналіз впливу домішок, вологості та дефектів кристалічної ґратки. Розкрито практичні аспекти застосування діелектриків в електротехніці, силовому обладнанні та сучасних ізоляційних системах. Лекція формує цілісне уявлення про роль діелектричних матеріалів у забезпеченні надійності та ефективності електроенергетичних установок.

Keywords: dielectrics, polarization, electrical conductivity, dielectric losses, $\text{tg}\delta$, insulating materials, polarization mechanisms, structural features, temperature dependence, frequency dependence, impurities, humidity.

План лекції

1. Газоподібні електроізоляційні матеріали;
2. Нафтові електроізоляційні масла;
3. Синтетичні рідкі діелектрики;
4. Високомолекулярні органічні діелектрики;
5. Смоли;
6. Рослинні олії;
7. Бітуми;
8. Діелектрики на основі воску;
9. Електроізоляційні лаки і компаунди;
10. Гнучкі плівки.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

Електроізоляційні матеріали розділяють:

- 1) за агрегатним станом – на газоподібні, рідкі і тверді (особлива група – матеріали, що твердіють: у початковому стані вони є рідинами, але в готовій ізоляції стають твердими тілами (наприклад, лаки і компаунди));
- 2) за хімічною природою – на органічні і неорганічні.

12.1. Газоподібні електроізоляційні матеріали

Повітря – основний газоподібний електроізоляційний матеріал.

В окремих частинах електричних установок, на ділянках повітряних високовольтних ліній електропередач повітря утворює єдину ізоляцію між дротами лінії. У ряді випадків замість повітря (наприклад, для заповнення газових конденсаторів) застосовується азот, оскільки, він близький за електричними властивостями до повітря, але не містить кисню, захищаючи матеріали від окислення.

Елегаз (шестифториста сірка, SF_6) має високу електричну міцність (пробивна напруга в нормальних умовах $U_{пр}=20кВ$). Не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріванні до $800^{\circ}C$; його використовують у конденсаторах, кабелях і т.п. Особливо великі переваги елегаза при підвищених тисках.

Фреон (дихлордифторметан, CCl_2F_2) має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегаза. При нормальній температурі може бути стиснутий лише до 6 атм. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні електричних холодильників.

Для заповнення електровакуумних приладів, ламп вживаються **інертні гази**: аргон, неон і інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази мають низьку електричну міцність. Найнижчу електричну міцність серед усіх газів має гелій приблизно в 17 разів менше електричної міцності повітря. Електрична міцність різних газів розрізняється майже в 200 разів.

12.2. Нафтові електроізоляційні масла

Трансформаторне масло. З рідких електроізоляційних матеріалів найбільше застосування в електротехніці має трансформаторне масло, яким заливають силові трансформатори. Воно підвищує електричну міцність ізоляції і відвід тепла, що виділяється в обмотках і сердечнику трансформатора. Масло відводить тепло приблизно в 30 разів краще, ніж повітря.

Лише деякі силові і вимірювальні трансформатори виготовляються з заливанням термореактивними компаундами (наприклад, на основі епоксидних смол).

Компаунди – композиції (суміші) на основі різних полімерів і мономерів.

Трансформаторне масло застосовують також у масляних вимикачах високої напруги, де має місце виникнення електричної дуги між контактами вимикача. Масло сприяє охолодженню каналу дуги і швидкому її гасінню.



Рис. 12.1 – Застосування масла в трансформаторах

Трансформаторне масло – горюча рідина. Пожежна небезпека масла оцінюється за її температурою спалаху (повинна бути не нижче 135°C). Більш в'язке масло гірше відводить тепло від обмоток і сердечника трансформатора. Температура застигання масла повинна бути не нижче -45°C . Ця характеристика важлива для масла, що заливається в масляні вимикачі, встановлювані на відкритих підстанціях.

Електрична міцність трансформаторного масла не встановлюється стандартами, оскільки вона надзвичайно чутлива до зволоження. Різко знижується електрична міцність масла в результаті попадання сторонніх домішок. З часом масло погіршує свої характеристики (старіє). Зовнішня ознака старіння – масло стає більш темним. В ньому утворюються забруднюючі продукти - кислоти, смоли. Низькомолекулярні кислоти, що утворюються в маслі, руйнують ізоляцію обмоток і викликають корозію дотичних з маслом металів.

Швидкість старіння масла зростає:

- а) при доступі повітря (старіння масла в значній мірі пов'язано з його окисленням на повітрі);
- б) при підвищенні температури;

в) при контакті масла з деякими металами (мідь, залізо, свинець і т.п.) і іншими речовинами, що є каталізаторами старіння; г) під дією світла;

д) при дії електричного поля високої напруженості.

Конденсаторне масло служить для просочення паперових конденсаторів, розрахованих на велику напругу. При просоченні паперової ізоляції конденсатора підвищується як опір ізоляції, так і її електрична міцність. Конденсаторне масло досить близьке за властивостями до трансформаторного.

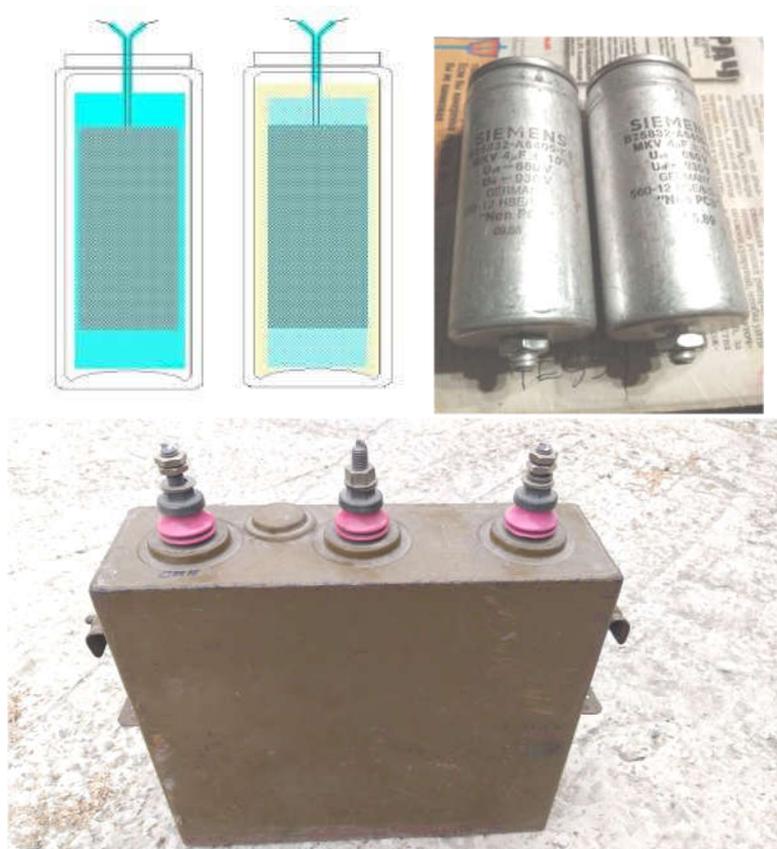


Рис. 12.2 – Приклад масляного конденсатора

Кабельне масло використовуються у виробництві силових електричних кабелів. Просочуючи паперову ізоляцію кабелів, воно підвищує її електричну міцність. Для звичайних силових кабелів із в'язким просоченням, застосовуваних для робочих напруг до 35 кВ, використовуються в'язкі нафтові масла (наприклад, типу "бraitсток"), у яких для додаткового підвищення в'язкості розчиняється каніфоль (масляно-каніфольний компаунд).



Рис. 12.3 – Високовольтний масляний кабель

12.3. Синтетичні рідкі діелектрики

Хлоровані вуглеводні. Походять з різних вуглеводнів шляхом заміни в їхніх молекулах деяких (або усіх) атомів водню атомами хлору. Найбільш широке застосування мають продукти хлорування дифенілу ($C_{12}H_{10}$). У промисловості застосовуються матеріали, що представляють собою суміші різних ізомерів дифенілу з різним ступенем хлорування. Мають загальне найменування "аскарели" (зокрема, піранол, пірален, ароклор, клофен, сибанол, совол і ін.).

Діелектрична проникність совола при нормальній температурі і низькій частоті струму $\epsilon \approx 5$, тобто більш ніж у два рази перевищує проникність нафтового масла. Заміна соволом нафтового масла у виробництві силових паперових конденсаторів дозволила знизити розміри конденсатора в два рази. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є сильне зменшення ємності при спаді температури нижче $0^\circ C$. Совол і совтол токсичні, тому необхідно забезпечувати захист шкіри і вентиляцію повітря.

Кремнійорганічні і фторорганічні рідини. Кремнійорганічні рідини мають малий кут діелектричних втрат, низьку гігроскопічність і підвищену нагрівостійкість. Використовуються, зокрема, для просочення і заливання конденсаторів і інших пристроїв. Перевагою фторорганічних рідин у порівнянні з кремнійорганічними є їхня повна негорючість і висока дугостійкість. Характерними властивостями фторорганічних рідин є мала в'язкість, низький поверхневий натяг, що сприяє просоченню пористої ізоляції, високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення, порівняно значна летючість. Остання обставина вимагає герметизації апаратів, що заливаються фторорганічними рідинами.

12.4. Високомолекулярні органічні діелектрики

Органічні речовини - це низькомолекулярні і високомолекулярні з'єднання вуглецю (C) з іншими елементами. Вже відкрито більш мільйона органічних сполук, в той час як з'єднань, що не містять вуглецю, відомо біля п'ятдесяти тисяч. Кількість діелектриків з органічних матеріалів набагато перевершує кількість діелектриків з неорганічних матеріалів.

Органічні електроізоляційні матеріали бувають **низькомолекулярні і високомолекулярні**.

В молекулу **низькомолекулярного матеріалу** входить порівняно невелика кількість - одиниці або десятки, іноді сотні – атомів (наприклад, фреон, вуглеводні нафтових масел, совол).

Високомолекулярні з'єднання - це речовини з великими молекулами, що складаються з тисяч атомів. Молекулярна маса таких речовин може доходити приблизно до мільйона, а геометричні розміри молекул настільки великі, що розчини цих речовин, якщо вони взагалі здатні розчинятися, за своїми властивостями наближаються до колоїдних систем.

Високомолекулярні речовини, що входять до складу рослинних і тваринних організмів, широко застосовуються в техніці (целюлоза, шовк, каучук і т.п.)

Штучні високомолекулярні матеріали за своїм походженням можуть бути розділені на два класи:

1). Штучні матеріали, виготовлені шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин (наприклад, при переробці целюлози утворюються ефіри целюлози).

2). Синтетичні високомолекулярні матеріали, виготовлені за допомогою синтезу з низькомолекулярних речовин (природний газ, нафта, викопне вугілля й ін.).

Високомолекулярні з'єднання за своєю хімічною природою є **полімерами**, тобто речовинами, молекули яких представляють собою циклічну сукупність великої кількості груп, що мають однакову будову груп атомів (мономерів) **Полімеризація** - реакція утворення полімеру з мономера.

Мономер – речовина, молекули якої здатні реагувати між собою і з молекулами інших речовин з утворенням полімера. Найбільш важливі мономери: етилен, пропілен, ізопрен, вінілхлорид, стирол, фенол, бутадієн.

При полімеризації відбувається закономірна зміна властивостей речовини: молекулярна маса збільшується, зростає температура плавлення і кипіння, підвищується в'язкість (в процесі полімеризації речовина може переходити з газоподібного або рідкого стану в стан густої рідини і далі – в стан твердого тіла), зменшується розчинність, і т.д.

Стирол - рідкий ненасичений вуглеводень, що має елементарний склад C_8H_8 , має здатність легко полімеризуватися. В результаті полімеризації зі стиrolу (мономера) утворюється полімер стиrolу (полістирол), який є твердою речовиною.

За певних умов (вплив високої температури, механічна обробка й ін.) полімер може розкладатися на речовини з меншим ступенем полімеризації до мономера включно. Такий процес, протилежний процесові полімеризації, називається деполімеризацією.

За будовою полімери поділяють на лінійні і просторові.

Молекули лінійних полімерів мають вигляд ланцюжків або ниток. Молекули просторових ("тривимірних") полімерів рівномірно формуються в просторі в різних напрямках, тому мають більш компакту форму, наближаючись до форми кулі.

Як правило, лінійні полімери порівняно гнучкі й еластичні. Зазвичай при підвищенні температури розм'якшуються, а потім розплавляються. Просторові полімери мають більшу твердість. Розм'якшення їх відбувається лише при досить високих температурах, а деякі ще до досягнення температури розм'якшення хімічно руйнуються (згоряють, обвуглюються і т.п.). Лінійні полімери звичайно здатні розчинятися в відповідних розчинниках. Просторові полімери розчиняються важко, багато з них практично нерозчинні.

Більшість лінійних полімерів з досить довгими молекулами здатні при витягуванні з розчину або розплаву утворювати тонкі, гнучкі і міцні волокна, придатні для виготовлення текстильних матеріалів, а також гнучкі плівки. Просторові полімери не можуть утворювати ні текстильних волокон, ні гнучких плівок.

За здатністю відновлювати структуру полімери поділяють на термопластичні і терморективні.

Термопластичні полімери не зазнають необоротних змін їхніх властивостей при нагрівання до температури, що відповідає їхньому пластичному станові. Після охолодження термопластичні полімери відновлюють свої властивості. Це лінійні полімери, що зберігають лінійну структуру молекул і при підвищених температурах (полістирол, поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полікарбонати). При нагріванні стають м'якими (пластичними) і легко деформуються. Можуть розчинятися у відповідних розчинниках.

Терморективні полімери при нагріванні зазнають необоротних змін властивостей. При підвищених температурах зацікаються (отверджуються), тобто здобувають значну механічну міцність і твердість, втрачаючи при цьому властивості розчинності і плавкості. При нагріванні набувають структури, властивої просторовим полімерам (стирол з добавкою дивенілбензола). Використовуються, якщо електрична ізоляція в експлуатації повинна витримувати вплив підвищених температур, не розм'якшуючись, не деформуєчись, зберігаючи високу механічну міцність, якщо вона повинна бути стійкою до дії розчинників.

Термопластичні матеріали більш еластичні, ніж терморективні матеріали, менше піддаються тепловому старінню, технологія їх обробки простіша. Створюються нові термопластичні матеріали, що мають підвищену нагрівостійкість (політетрафторетилен, поліпропілен і т.п.) і можуть застосовуватися для ізоляції, яка працює при порівняно високих температурах.

Гігроскопічність, механічна міцність, електроізоляційні властивості полімерів значною мірою залежать від хімічного складу і структури молекули. Речовини з несиметрично побудованими ланками полімерних молекул є полярними і звичайно мають помітну гігроскопічність, але їх механічна міцність вище, ніж у неполярних полімерів. Високомолекулярні вуглеводні практично неполярні, тому їх гігроскопічність є незначною.

12.5. Смоли

Смоли – це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних, різного ступеню полімеризації. При низьких температурах смоли – це аморфні, склоподібні крихкі маси. При нагріванні (якщо тільки вони не зазнають хімічних змін) смоли розм'якшуються, стають пластичними, а потім – рідкими.

Застосовувані в електроізоляційній техніці смоли здебільшого не розчинні у воді і мало гігроскопічні, але вони розчинні в органічних розчинниках. Звичайно смоли є клейкими і при переході з рідкого стану у твердий міцно пристають до твердих тіл. Смоли застосовуються для створення електричної ізоляції, а також в якості складової частини багатьох лаків, компаундів, пластичних мас, плівок, штучних і синтетичних волокнистих матеріалів і т.п.

За походженням смоли поділяють на **природні, штучні і синтетичні**.

За хімічною природою синтетичні смоли поділяють на **полімеризаційні і конденсаційні**. Молекули конденсаційних смол, як правило, містять полярні групи, що збільшує їх діелектричні втрати і гігроскопічність. Полімеризаційні смоли можуть бути і неполярними (політетрафторетилен).

Природні смоли є продуктом життєдіяльності деяких тваринних організмів (шелак) або рослин-смолоносів (каніфоль). Сюди ж відносять викопні смоли (копали), що представляють собою викопні залишки деревсмолоносів.

Шелак – це смола, що виділяється на гілках дерев деякими комахами, що живуть у тропічних країнах Південної і Південно-Східної Азії. Шелак збирають вручну, очищають від забруднень і переплавляють. Він має вигляд тонких, тендітних лусочок жовтуватого або червоно-коричневого кольору. Основну частину шелаку складають органічні кислоти складного складу. Шелак добре розчиняється в спирті. $E_{пр}=20-30$ кВ/мм. При 50-60°C шелак стає гнучким, а при подальшому підвищенні температури розм'якшується і розплавляється. В електроізоляційній техніці шелак використовується у вигляді клеючих лаків.

Каніфоль – крихка смола жовто-коричневого кольору, одержувана з живиці (природної смоли хвойних дерев, головним чином – сосни) за допомогою відгону її рідких складових частин (скипидару). Каніфоль в основному складається з органічних кислот, розчинна в рідких вуглеводнях, рослинних оліях, спирті, скипидарі й ін. Каніфоль, розчинена в нафтових маслах, застосовується при виготовленні просочувальних і заливних кабельних компаундів.

Копали – тугоплавкі смоли, з характерним блиском, великою твердістю і порівняно важкорозчинні. Ці смоли частково добувають як викопні продукти розкладання викопних дерев-смолоносів. Застосовують як добавку до масляних лаків, що збільшує твердість їхніх плівок. До копал відносять і янтар, який іноді застосовується у приладах, де важливо мати високий опір ізоляції.

Синтетичні смоли на основі етилена і його похідних. Найпростіший ненасичений вуглеводень C_2H_4 називається **етиленом** (мономер). **Поліетилен** отримують полімеризацією етилена. Поліетилен має непагані механічні властивості, високу прозорість, стійкість до дії кислот і лугів, широко застосовується для виготовлення різного роду побутових виробів, посуду, як пакувальний матеріал і т.п. Понад 10% поліетилену використовується для електричної ізоляції - головним чином для ізоляції радіочастотних кабелів і кабелів зв'язку (це основний матеріал для ізоляції підводних телефонних кабелів). Нагрівостійкість поліетилену обмежена.

Поліпропілен – це гомологічний член етиленового ряду вуглеводнів $H_2C=CH-CH_3$. Поліпропілен - полімер цього мономера. Має щільність $0,90-0,91$ г/см³, еластичний (відносне видовження 500-700%). Електроізоляційні властивості того ж порядку, що і поліетилену, але нагрівостійкість вище (температура розм'якшення - до $170^{\circ}C$).

Поліізобутилен – каучукоподібна липка речовина, схильна до холоднотекучості навіть при малих механічних навантаженнях. Є холодостійким (зберігає еластичність при температурі до $-80^{\circ}C$). Щільність поліізобутилену $0,91-0,93$ г/см³. За хімічною стійкістю і гігроскопічністю близький до поліетилену і поліпропілену. Має низьку вологопроникність. Поліізобутилен з низьким ступенем полімеризації є в'язкою рідиною.

Полістирол – утворюється в результаті полімеризації стиролу. Недоліками його є помітна крихкість при знижених температурах, схильність до поступового утворення поверхневих тріщин, мала стійкість до дії розчинників (зокрема, рідких вуглеводнів), а також невисока нагрівостійкість.

Полімери вуглецево-водневого складу (поліетилен, поліпропілен, поліізобутилен, полістирол) є практично неполярними діелектриками, з чим пов'язані їх надзвичайно високі електроізоляційні властивості і вкрай низька гігроскопічність.

Полівінілхлорид, полівініловий спирт, поліакрилати – дипольні похідні етилена.

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) - твердий продукт полімеризації газоподібного мономера - вінілхлориду (хлорвінілу) $H_2C=CH-Cl$. Є полярним діелектриком і тому має занижені властивості в порівнянні з неполярними полімерами. Вологість помітніше впливає на питомий поверхневий опір матеріалу. Поліхлорвініл досить стійкий до дії води, лугів, розведених кислот, олій, бензину і спирту. Широко використовується для виготовлення різноманітних пластичних мас і резиноподібних продуктів, зокрема для ізоляції дротів, для захисних оболонок кабелів, для виготовлення акумуляторних баків і т.п. Для поліпшення еластичності і холодостійкості поліхлорвінілу до нього додають пластифікатори.

Полівініловий спирт – є основою для синтезу смол типу полівінілацеталей, що знаходять широке застосування, зокрема, для виготовлення емалей-лаквів. Ізоляція емалей-дротів на цих лаках має більш високу механічну міцність, ніж ізоляція емалей-дротів на основі олій, що висихають.

Поліакрилати – є полімерами ефірів акрилової і метакрилової кислот. Це полярні діелектрики, що мають гарну холодо-, масло- і лугостійкість. Найбільш розповсюджений полімер з числа поліакрилатів – **поліметилметакрилат (органічне скло або плексиглас)**. Цей прозорий безбарвний матеріал широко застосовується як конструкційний матеріал. Під дією електричної дуги виділяє велику кількість газів (СО, Н₂), які сприяють гасінню дуги. Тому органічне скло застосовують у розрядниках високої напруги, де потрібне швидке гасіння виникаючої дуги.

Фторорганічні смоли – полімери етилена і його похідних. Можуть бути як нейтральними, так і полярними. До складу входить хімічно активний елемент фтор (F).

Політетрафторетилен – утворюється шляхом полімеризації тетрафторетилену. Неполарний діелектрик. Виробляється під назвою фторопласт-4 (або фторлон-4, тефлон, дайфлон і ін.). Цифра 4 вказує на число атомів F в мономері. Має високу для органічної речовини нагрівостійкість (до 250°C). Винятково хімічно стійкий, перевершуючи в цьому відношенні золото і платину (на нього не діють соляна, сірчана, азотна і плавикова кислоти, луги; деяку дію на нього справляють лише розплавлені лужні метали, елементарний фтор і фтористий хлор при підвищеній температурі). Негорючий, практично абсолютно негігроскопічний і не змочується водою й іншими рідинами.

Фторопласт-4 - білий або сіруватий напівпрозорий матеріал. Щільність (2,1-2,3 г/см³) велика в порівнянні з щільністю звичайних органічних полімерів. Матеріал порівняно м'який і має схильність до холоднотекучості. Належить до кращих з відомих діелектриків, особливо при роботі в полях високих і надвисоких частот. Добре механічно обробляється. Має низьку радіаційну стійкість, швидко старіє під впливом корони. Погано склеюється. При температурах вище 375°C фторопласт-4 починає розкладатися з виділенням фтору, отруйного і хімічно активного газу.

Фторопласт-3 – спільний полімер тетрафторетилену з гексафторпропіленом. Має характеристики, що наближаються до характеристик політетрафторетилену, однак технологічніший при механічній обробці. Через несиметричну структуру молекул є полярним діелектриком.

12.5.1. Термопластичні синтетичні смоли

Поліамідні смоли мають відносно високу механічну міцність і еластичність. Розчинні лише в обмеженому числі розчинників (зокрема, у крезолі і розплавленому фенолі). Поліаміди застосовуються для виготовлення синтетичних волокон, гнучких плівок і пластичних мас. Гігроскопічні і пластичні (при підвищених температурах), однак мають низьку радіаційну стійкість і світлостійкість. До числа цих смол належить капрон (силон, дедерон), нейлон.

Поліуретани – лінійні полімери. У деяких умовах можуть утворювати і молекули просторової структури. Використовуються для емальовання дротів. Поліуретанові емалі-дроти більш нагрівостійкі, ніж дроти на полівінілацеталевих лаках, але поступаються поліефірним лакам. Поліуретанові емалі-дроти здатні лудитися без попереднього

зачищення емалевої ізоляції. Недоліком є помітна термопластичність (схильність до розм'якшення емалевої плівки при підвищених температурах, починаючи приблизно з 150°C), що зумовлює небезпеку ушкодження ізоляції при коротких замиканнях.

Фенолформальдегідні смоли – полярні внаслідок наявності в їхніх молекулах гідроксильних груп. Бувають як термореактивними, так і термопластичними. Якщо в реакції смолоутворення бере участь не менш одного моля формальдегіду на моль фенолу, утворюється термореактивна смола **бакеліт** (або резол, резольна смола – синтетичний термореактивний полімер, що утвориться на початковій стадії синтезу фенол-формальдегідної смоли; може отверджуватись без отверджувачів).

Поліефірні смоли - продукти поліконденсації різних спиртів і кислот (або їхніх ангідридів). Велике практичне значення мають ненасичені поліефірні смоли - продукти поліконденсації гліколей або багатоатомних спиртів з ненасиченими кислотами або їх ангідридами, наприклад фталевим ангідридом, малеїновим ангідридом і ін. Ці смоли широко застосовуються для виготовлення термореактивних компаундів, для ізоляції електричних машин і апаратів, як зв'язуючий у виробництві шаруватих пластиків і т.п. Мають хороші електроізоляційні властивості і високу нагрівостійкість.

Епоксидні смоли (епоксисмоли) – характеризуються наявністю в їхніх молекулах епоксидних груп H_2C-CH- . У початковому стані мають лінійну структуру. Є в'язкими рідинами, що розчиняються в ацетоні й інших розчинниках. Після додавання до них отверджувачів епоксидні смоли стають твердими (полімеризуються), здобуваючи просторову структуру. У якості холодних отверджувачів використовуються азотовмісткі речовини (аміни), для отвердження при нагріванні - ангідриди органічних кислот (фталевий, малеїновий і ін.). Вибір отверджувача впливає на властивості (еластичність, нагрівостійкість і ін.) епоксидної смоли. Застосовуються для виготовлення клеїв, лаків, заливальних компаундів (для заливання невеликих трансформаторів або вузлів апаратури). Неотверджені епоксидні смоли шкідливо впливають на організм людини, викликаючи, зокрема, шкірні захворювання. Після закінчення процесу полімеризації епоксидних смол вони не є токсичними.

Кремнійорганічні смоли (поліорганосилоксани, силікони) – складаються з вуглецю і кремнію, який є однієї з найважливіших складових частин багатьох неорганічних діелектриків - слюди, азбесту, деяких видів скла, керамічних матеріалів.

Кремнійорганічні полімери можуть бути як термопластичними і мати лінійну структуру, так і термореактивними й утворювати просторові структури. Є більш нагрівостійкими в порівнянні з більшістю органічних полімерів. Використовуються в лаках, компаундах, пластмасах, в композиціях з термостійкими неорганічними матеріалами (слюда, скляне волокно, азбест і ін.) у вигляді міканітів, склотканей, пластмас. Кремнійорганічні з'єднання мають малу гігроскопічність і практично не змочуються водою. Покриття цими з'єднаннями целюлозних матеріалів, пластичних мас, кераміки створює **гідрофобізацію** оброблюваних матеріалів, тобто знижує їх змочуваність, роблячи їх водовідштовхувальними. Кремнійорганічні матеріали порівняно дорогі, що обмежує можливість їхнього широкого застосування.

12.5.2. Штучні полімери

Ефіри целюлози - це штучні полімери, одержувані шляхом хімічної переробки природного полімеру - целюлози (клітковини). Найбільше значення в техніці мають складні ефіри целюлози (нітроцелюлоза, ацетилцелюлоза).

Нітроцелюлоза досить горюча, а при великому вмісті в ній нітрогруп навіть вибухонебезпечна, що є великим недоліком при використанні в техніці електричної ізоляції. **Ацетилцелюлоза** менш вогнебезпечна, тому що практично негорюча.

12.6. Рослинні олії

Рослинні олії - в'язкі рідини, одержувані з насіння рослин.

Олії, що висихають – це олії, здатні під впливом нагрівання, світла, зіткнення з киснем повітря й інших факторів переходити у твердий стан. Тонкий шар олії, налитий на поверхню якого-небудь матеріалу, висихає і утворює тверду блискучу електроізоляційну плівку. Плівки олій стійкі до дії розчинників. При нагріванні плівка не розм'якшується, тобто є термореактивною. Найбільш розповсюджені олії, що висихають - лляна і тунгова.

Лляна олія – рідина золотаво-жовтого кольору, що отримується з насіння льону. Його щільність $0,93-0,94 \text{ г/см}^3$, температура застигання - біля -20°C .

Тунгова (деревна) олія отримується з насіння тунгового дерева, що росте на Далекому Сході і Кавказі. Тунгова олія не є харчовою (як лляне) і навіть токсична. Щільність $0,94 \text{ г/см}^3$, температура застигання від 0 до -5°C . У порівнянні з лляною олією тунгова висихає швидше і більш рівномірно по товщині і є більш водонепроникною.

Олії, що висихають, застосовуються в електропромисловості для виготовлення електроізоляційних масляних лаків, лакотканей, для просочення дерева і т.п. Рослинні олії, що не висихають, застосовуються як рідкі діелектрики.

Касторова олія – отримується з насіння рицини, іноді використовується для просочення паперових конденсаторів. На противагу лляній і тунговій олії касторова олія не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті. На відміну від нафтових масел касторова олія не викликає набрякання звичайної гуми.

12.7. Бітуми

Бітуми - аморфні матеріали, що є складною сумішшю вуглеводнів, а також деякої кількості кисню і сірки. Мають чорний (або темно-коричневий) колір, при низьких температурах крихкі. Розчиняються у вуглеводнях (бензолі, толуолі, бензині). Не є маслостійкими. У спирті і воді бітуми нерозчинні, мають малу гігроскопічність і практично водонепроникні. Бітуми термопластичні.

За походженням розрізняють бітуми штучні (нафтові) і природні (копалини або асфальти). Бітуми - слабополярні речовини і використовуються для виготовлення лаків і компаундів. $E_{\text{пр}}=10-25 \text{ кВ/мм}$.

12.8. Діелектрики на основі воску

Матеріали на основі воску є твердими легкоплавкими речовинами білого або жовтого кольору, що мають кристалічну структуру, низьку механічну міцність і малу гігроскопічність. Вони вживаються для просочення пористих матеріалів і заливання пустот.

Істотним недоліком їх при використанні як просочувальні маси є значна усадка при застиганні, що доходить до 15-20%. Тому частина об'єму пор ізоляції залишається заповненою повітрям, що приводить до зниження електричної міцності ізоляції.

Парафін – найбільш дешева і широко відома неполярна воскоподібна речовина. Одержують його з парафінистої нафти, що містить підвищену кількість твердих вуглеводнів метанового ряду. Очищений парафін – кристалічна біла речовина з щільністю 0,85-0,90 г/см³ і температурою плавлення 50-55°C.

Діелектрична проникність парафіну знижується з підвищенням температури. Парафін не змочується водою. $E_{пр}=20-25$ кВ/мм. При нормальній температурі парафін має високу хімічну стабільність, але при підвищених температурах на повітрі легко окислюється. Парафін застосовують для просочення паперових конденсаторів низької напруги, для просочення дерева і картону, для заливання котушок з невисокою робочою температурою.

Церезин – суміш твердих вуглеводнів метанового ряду. Звичайно церезин виготовляють шляхом очищення мінералу озокериту ("гірського воску"), що представляє собою продукт природного переродження нафти в умовах доступу повітря. Перевагами церезину в порівнянні з парафіном є більш висока температура плавлення (65-80°C) і стійкість до окислення. Церезин, незважаючи на його підвищену вартість у порівнянні з парафіном, майже цілком замінив його, зокрема при просоченні паперових і слюдяних конденсаторів.

Синтетичний парафін і синтетичний церезин – є високомолекулярними вуглеводнями, що одержуються як побічні продукти при виробленні синтетичного бензину й олій. Електроізоляційні властивості цих матеріалів близькі до властивостей натурального парафіну і натурального церезину, але мають підвищену температуру плавлення (100-130°C).

Галовакс – продукт хлорування ароматичного вуглеводню нафталіну. Полярний кристалічний діелектрик світло-жовто-зеленуватого кольору. Його діелектрична проникність значно вище, ніж у неполярних воскоподібних речовин, тому при просоченні паперових конденсаторів галоваксом можна підвищити їх ємність на 25-30%. На відміну від неполярних воскоподібних речовин, галовакс практично не окислюється при нагріванні і є негорючим. Галовакс токсичний, пари його шкідливо діють на слизові оболонки і викликають захворювання шкіри. Тому в приміщеннях, де ведуть роботи з галоваксом, необхідно забезпечувати вентиляцію.

Вазелін – суміш твердих і рідких вуглеводнів, одержуваних з нафти. При нормальній температурі напіврідка (мазеподібна); застосовується для просочення паперових конденсаторів.

12.9. Електроізоляційні лаки і компаунди

Лаки і компаунди є електроізоляційними матеріалами, що твердіють.

Лаки – колоїдні розчини смол, бітумів, олій, що висихають, і тому подібних речовин, що утворюють так звану лакову основу в розчинниках. При сушінні лаку розчинник випаровується, а лакова основа переходить у твердий стан, утворюючи лакову плівку.

Електроізоляційні лаки розділяють за застосуванням на три основні групи: **просочувальні, покривні і лаки, що клеять.**

Просочувальні лаки служать для просочення пористої, волокнистої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина, ізоляція обмоток електричних машин і апаратів). Після просочення пори в ізоляції виявляються заповненими не повітрям, а лаком, що має значно більш високу електричну міцність і теплопровідність, ніж повітря. В результаті просочення підвищується пробивна напруга, збільшується теплопровідність, зменшується гігроскопічність і вологопроникність, поліпшуються механічні властивості ізоляції, підвищується нагрівостійкість.

Покривні лаки служать для утворення механічно міцної, гладкої, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні виробів. Нерідко цими лаками покривають тверду пористу ізоляцію, попередньо вже піддану просоченню. Це поліпшує властивості твердої ізоляції (зокрема, підвищує напругу поверхневого розряду і поверхневого опору, посилює захист ізоляції від дії вологи або хімічно активних речовин), а також зовнішній вигляд виробу.

Деякі види покривних лаків (емалі-лаки) наносять не на тверду ізоляцію, а безпосередньо на метал, утворюючи на його поверхні електроізоляційний шар (ізоляція емалі-дроту; ізоляція листів електротехнічної сталі в магнітопроводах електричних машин і апаратів).

Лаки, що клеять, застосовуються для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів (наприклад, клеєння листочків розщепленої слюди при виготовленні міканітів) або для приклеювання електроізоляційних матеріалів до металу.

Компаунди відрізняються від лаків відсутністю в їхньому складі розчинника. Складаються з різних смол, бітумів, восків, олій і ін. Якщо компаунд у початковому стані твердий, його перед уживанням нагрівають до необхідної температури, щоб одержати масу низкою в'язкості.

Компаунди бувають просочувальними і заливними.

Просочувальні компаунди призначені для просочення пористої і волокнистої ізоляції.

Заливні компаунди служать для заповнення порівняно великих порожнин, проміжків між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для одержання порівняно товстого покриття на електротехнічних виробках. Застосування заливних компаундів має на меті захист ізоляції від зволоження і від дії хімічно активних речовин, збільшення розрядної напруги, поліпшення умов відводу тепла і т.п. У техніці слабких струмів для просочення і заливання ізоляції застосовують різні **воскоподібні речовини** і їхні сплави з іншими матеріалами.

12.9.1. Найважливіші типи електроізоляційних лаків

Смоляні лаки є розчинами синтетичних, штучних або природних смол.

Бакелітовий лак є розчином бакеліту в спирті. Це просочувальний лак і лак, що клеїть. Дає механічно міцну, але малоеластичну і схильну до теплового старіння плівку. Широко використовується у виробництві **гетинаксу** і **текстоліту**, при виготовленні ізоляції електричних апаратів високої напруги і т.п.

Гліфталеві лаки – розчини гліфталевої смоли в сумішах спиртів і рідких вуглеводнів і тому подібних розчинниках. Це термореактивні лаки з високою клеючою

здатністю, тому використовуються для клеєння міканітів і т.д., гнучкість їхніх плівок вище, ніж плівки бакелітового лаку, але вологостійкість нижче.

Кремнійорганічні лаки вимагають сушіння при підвищеній температурі, утворюють нагрів- і вологостійкі плівки. Застосування цих лаків у колекторних машинах із закритим циклом вентиляції приводить до прискореного зносу щіток і порушенням комутації (внаслідок присутності кремнію).

Поліхлорвінілові лаки є стійкими до дії бензину, масла, багатьох хімічно активних речовин і застосовуються як покривні лаки для захисту ізоляції, що працює в атмосфері з кислотними парами.

Полістирольний лак утворює плівку з високими електроізоляційними властивостями і незначною гігроскопічністю. Використовується у виробництві високочастотної апаратури.

Шелачний лак є розчином шелаку в спирті. Застосовується як клеючий лак при виготовленні міканітів, а також при різних монтажних і ремонтних роботах. Для одержання плівки високої якості її потрібно запікти.

Целюлозні лаки є розчинами ефірів целюлози. Плівки їх термопластичні. Велика частина целюлозних лаків – лаки холодного сушіння. Найбільше значення з них мають нітроцелюлозні лаки (нітролаки). Плівки нітролаків механічно міцні, відрізняються блиском, добре протистоять дії повітря, вологи, олій і ін. Нітролаки погано пристають до металів, тому перед нанесенням нітролаку на метал звичайно попередньо наносять шар "грунтового" лаку, що добре пристає до металу, але менш стійкого до дії повітря, світла і вологи (наприклад, гліфталевого або масляного). Нітролаки застосовують для просочення бавовняних обплетень автомобільних і авіаційних дротів (поверх шару гумової ізоляції), для захисту гуми від впливу озону, масла і бензину.

Масляні лаки – основу цих лаків складають масла, що висихають, головним чином ляне і тунгове. Крім них, масляний лак містить **сикативи**, що служать для прискорення процесу сушіння, і летучий розчинник, що зменшує в'язкість лаку (**сикативи** – каталізатори, що прискорюють висихання лакофарбових матеріалів, що містять рослинні масла.).

Масляно-смоляні лаки – масляні лаки до яких додають природні або синтетичні смоли. Наприклад, масляно-гліфталеві лаки: у порівнянні з чисто масляними лаками вони мають підвищену еластичність, нагрівостійкість і клеючу здатність, а в порівнянні з чисто гліфталевими лаками - знижену гігроскопічність. Такі лаки широко застосовують для просочення обмоток маслonaповнених трансформаторів, забезпечуючи маслостійкість і високу механічну міцність просочених обмоток, для просочення обмоток, що зазнають дії кислотних випарів і хлору, для покриття ізоляції, що містить фенолформальдегідні смоли.

12.10. Гнучкі плівки

Особливий вид виробів з органічних полімерів - тонкі (товщиною до 0,02 мм) прозорі гнучкі плівки, що випускаються в рулонах. Гнучкі плівки, як правило, мають високу електричну і механічну міцність і знаходять широке застосування в ізоляції електричних машин, кабелів і обмотувальних дротів, як діелектрик конденсаторів і в ряді інших випадків.

Гнучкі плівки виготовляються з лінійних полімерів з досить високою молекулярною масою, тобто з великою довжиною молекул.

З неполярних плівок широке застосування мають плівки з поліетилену, поліпропілену, полістиролу, політетрафторетилену.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть основні газоподібні діелектрики, їх властивості та застосування.
2. Назвіть основні рідкі діелектрики, їх властивості та застосування.
3. Властивості і застосування полімерних ізоляційних матеріалів.
4. З чого виготовляють штучні і природні лаки і компаунди?
5. Де використовують діелектрики з воску?
6. Що таке смоли та які їх основні фізичні властивості при низьких і високих температурах?
7. Які властивості смол роблять їх придатними для використання в електроізоляційній техніці?
8. Як класифікують смоли за походженням?
9. У чому різниця між природними, штучними та синтетичними смолами?
10. Що таке шелак, каніфоль і копали? Як вони використовуються в електротехніці?
11. Які властивості янтаря роблять його цінним для використання в ізоляційних матеріалах?
12. Як поділяють синтетичні смоли за хімічною природою?
13. Чим відрізняються полімеризаційні та конденсаційні смоли?
14. Які основні властивості поліетилену? У яких випадках його використовують як електроізоляційний матеріал?
15. У чому різниця між поліетиленом, поліпропіленом і поліізобутиленом?
16. Які недоліки полістиролу як ізоляційного матеріалу?
17. Які властивості характерні для неполярних діелектриків, таких як поліетилен?
18. Чому полівінілхлорид має нижчі ізоляційні властивості в порівнянні з неполярними смолами?
19. У яких виробках використовують кремнійорганічні смоли?
20. Що таке ефіри целюлози, і які з них найбільш застосовуються в техніці?
21. Чому нітроцелюлоза небезпечна для використання?
22. У яких продуктах та виробках застосовуються смоли?
23. Які властивості смол особливо важливі для використання в лакофарбових матеріалах?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Властивості та класифікація діелектриків», звернувши увагу на кристалічні та аморфні матеріали, полімери, гази та рідини. Навести по 2–3 приклади джерел (підручники, наукові статті), які описують структурні та електричні властивості цих матеріалів.

2. Підготувати порівняльну таблицю основних типів діелектриків, зазначивши: структуру матеріалу, електропровідність, діелектричну проникність, температуру плавлення/деформації та типові сфери застосування.

3. Ознайомитися з механізмами поляризації в діелектриках (орієнтаційна, електронна, іонна) і підготувати коротку схему або рисунок, що показує взаємозв'язок між типом поляризації та частотою прикладеного електричного поля.

ТЕМА 13. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЇ: ВЛАСТИВОСТІ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними типами та властивостями діелектричних матеріалів, їх застосуванням в електроніці, енергетиці та інших галузях.

Анотація

Тема присвячена ознайомленню з основними матеріалами, що використовуються в електротехніці для електроізоляції. Розглянуто класифікацію матеріалів: волокнисті та текстильні, пластичні маси, еластоміри, скло, керамічні електроізоляційні матеріали, слюда та матеріали на її основі, азбест і азбестові матеріали, гірські породи, оксидні та фторидні ізоляції. Особлива увага приділяється фізико-хімічним властивостям матеріалів, їх електричній міцності, механічній та тепловій стійкості, гігроскопічності, а також способам обробки та впливу на експлуатаційні характеристики ізоляції. Лекція також висвітлює практичне застосування матеріалів у високовольтних та низьковольтних апаратах, електричних машинах, конденсаторах і кабельних виробках.

Keywords: electrical insulating materials, fibrous materials, textile materials, plastics, elastomers, glass, ceramics, mica, asbestos, rocks, oxide insulation, fluoride insulation, electrical strength, heat resistance.

План лекції

1. Волокнисті і текстильні матеріали;
2. Пластичні маси;
3. Еластоміри;
4. Скло;
5. Керамічні електроізоляційні матеріали;
6. Слюда і матеріали на її основі;
7. Азбест і азбестові матеріали;
8. Гірські породи;
9. Оксидна і фторидна ізоляції.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

13.1. Волокнисті і текстильні матеріали

Волокнисті матеріали – це матеріали, що утворюються з часток подовженої форми (волокон). В волокнистих матеріалах типу дерева, паперу, картону волокниста структура розрізняється під мікроскопом.

Перевагами волокнистих матеріалів є відносна дешевизна, достатня механічна міцність і гнучкість, зручність обробки. Загальними недоліками є невисока електрична міцність і питома теплопровідність (через наявність проміжків між волокнами, заповненими повітрям), значна гігроскопічність. Властивості волокнистих матеріалів істотно поліпшуються просоченням.

Більша частина вироблених волокон – це матеріали органічного складу. До них належать матеріали **рослинного походження** (дерево, бавовняне волокно, папір і ін., що складаються в основному з целюлози), **тваринного походження** (шовк), **штучні волокна**, одержувані шляхом хімічної переробки природного волокнистої сировини, **синтетичні волокна**, що виготовляються з синтетичних полімерів.

Текстильні матеріали виробляють методами прядіння з довговолонистої сировини. За інших рівних умов текстильні матеріали (тканини, стрічки) мають більш високу механічну міцність, ніж волокнисті, особливо при перегині і при стиранні, але просочені вироби з них дорожче і мають нижчу електричну міцність, ніж просочений папір.

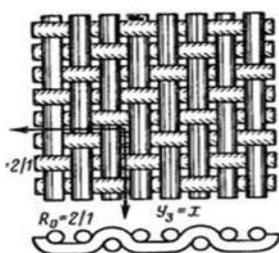


Рис. 13.1 – Текстильні матеріали

В електроізоляційній техніці пряжу (тобто нитки, скручені з окремих волокон) застосовують для ізоляції дротів і шнурів шляхом обмотки й обплетення. Тканини і стрічки звичайно використовують для захисту основної ізоляції електричних машин і апаратів від зовнішніх механічних впливів. Тканини використовують також у виробництві лакотканей і шаруватих пластиків типу **текстоліту**.

Бавовняні тканини і стрічки – в електротехніці застосовують переважно тканини простого полотняного переплетення.

Натуральний шовк – електроізоляційні шовкові тканини мають товщину 0,07-0,08 мм, завдяки чому їхнє застосування дає можливість одержувати більш тонку ізоляцію, ніж з бавовни, однак шовк дорожче бавовняного волокна.



Рис. 13.2 – Натуральний шовк

Штучний шовк – основні типи штучного шовку (віскозний і ацетатний) є результатом переробки ефірів целюлози. На відміну від вихідної целюлози (клітковини) її ефіри мають гарну розчинність у відповідних розчинниках і дозволяють виготовляти з них тонкі нитки при видавлюванні розчинів через отвори (**філ'єри**) малого діаметра.

Синтетичні волокнисті матеріали – поліетилентерефталатні (**лавсан, терилен, терин, дакрон** і ін.), поліамідні (**капрон, дедерон, найлон, анід** і ін.), поліетиленові, полістирольні, полівінілхлоридні (**хлорин** і ін.) і політетрафторетиленові.

Лакотканина – гнучкий електроізоляційний матеріал, що представляє собою тканину, просочену електроізоляційним лаком.



Рис. 13.3 – Приклад лакотканина

Тканина забезпечує значну механічну міцність, а лакова плівка - електричну міцність матеріалу. Як основу для виготовлення лакотканин найчастіше застосовують бавовняну тканину (**перкаль**) або ж тонку шовкову тканину (**ексцельсіор**).

13.2. Пластичні маси

Пластичні маси (пластмаси, пластики) – матеріали, що складаються з наповнювача і зв'язуючого.

Зв'язуюче – органічне, зазвичай високомолекулярне з'єднання (смола), що має здатність до пластичної деформації під впливом прикладеного зовні тиску. В окремих випадках застосовуються і неорганічне зв'язуюче (скло в мікалексі, цемент в асбоцементі).

Наповнювач може бути порошкоподібним, волокнистим, листовим (кам'яне борошно, деревне борошно, бавовняне, азбестове або скляне волокно, слюда, папір, тканина і т.п.). Наповнювач здешевлює пластмасу і поліпшує її механічні характеристики.

Гігроскопічність і електроізоляційні властивості пластмас в результаті введення наповнювача, як правило, погіршуються, тому високі електроізоляційні властивості мають пластмаси без наповнювача. До складу пластмас вводять іноді **пластифікатори**, що збільшують пластичність і зменшують крихкість матеріалу, барвники, що додають пластмасі визначене фарбування, і інші добавки. Пластмаси бувають термопластичними і термореактивними. До термопластів належать пластмаси на основі полівінілових і поліамідних смол, ефірів целюлози і ін., а до реактопластів – пластмаси на основі фенолоформальдегідних, карбамідних і інших термореактивних смол.

Вініпласт – пластмаса з полівінілхлориду, виготовляється у вигляді орієнтованих аркушів товщиною до 1 мм. Крім того з вініпласту виготовляють труби, стержні і різні фасонні вироби. $E_{пр}=15-35$ кВ/мм. Теплостійкість не нижче 65°C . Вініпласт застосовується для створення ізоляції, що працює в умовах високої вологості і впливу хімічно активних речовин, але при відносно невисокій робочій температурі.



13.4 – Вініпласт

Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт і ін.) - композитні матеріали, у яких наповнювачем є той або інший волокнистий матеріал.

Гетинакс виробляють за допомогою гарячого опресування папера, просоченого бакелітом. Для виробництва гетинаксу береться міцний і нагрівостійкий просочувальний папір.



13.5 – Гетинакс

Гетинакс марки А має підвищені ізоляційні властивості: електрична міцність (скрізь шари матеріалу) $E_{пр}=20-25$ кВ/мм. Електричні властивості вздовж шарів матеріалу нижчі (анізотропний матеріал). Питомий об'ємний опір гетинаксу вздовж шарів у 50-100 разів, а електрична міцність – у 5-8 разів нижче, ніж скрізь шари. Гетинакс може оброблятися різальним інструментом із твердих сплавів.

Текстоліт - виготовляється з просоченої тканини. Властивості текстоліту на бавовняній тканині близькі до властивостей гетинаксу. Має підвищену ударну в'язкість, стійкість до стирання і розколювання. Однак текстоліт у п'ятьшість разів дорожче гетинаксу.



13.6 – Текстоліт

Особливим видом текстоліту є **склотекстоліт**, який виготовляється на основі скляної тканини. Має порівняно високу нагрівостійкість, вологостійкість, механічну міцність і електроізоляційні властивості.

Шаруваті пластики застосовують у високо- і низьковольтному апаратоприладобудуванні як основу для виготовлення друкованих плат.

13.3. Еластоміри

Еластоміри - матеріали на основі каучуку і близьких до нього за властивостями речовин. Каучук характеризується високою еластичністю і малою проникністю для вологи і газів.

Натуральний каучук добувають з рослин-каучуконосів. Каучуконоси містять природний сік – **латекс**.



Рис. 13.7 – Натуральний коучуг

Каучук виділяється при коагуляції латексу і видаленні домішок. За хімічним складом натуральний каучук являє собою полімерний вуглеводень, що має склад (C_5H_8). Уже при нагріванні до температури $50^{\circ}C$ каучук розм'якшується і стає липким, а при низьких температурах – крихким. Каучук розчиняється у вуглеводнях і сірковуглеці. Розчин каучуку в бензині (**гумовий клей**) застосовується для склеювання каучуку і гуми.

Через малу стійкість до дії підвищених і низьких температур, а також розчинників чистий каучук для виготовлення електричної ізоляції не вживають. Каучук **вулканізують**, тобто нагрівають після додавання сірки. Вулканізація поліпшує як нагрівостійкість, так і морозостійкість каучуку, підвищує його механічну міцність і стійкість до розчинників.

Гуми. В залежності від кількості сірки, що додається до каучуку, при вулканізації одержують: **м'яку гуму** (1-3% сірки, має високу пружність), **тверду гуму** (30-35% сірки, ебоніт – твердий матеріал, що має високу стійкість до ударних навантажень). Відносно видовження до розриву для різних технічних гум складає від 150 до 500%, а для ебоніту – від 2 до 6%. Крім каучуку і сірки при виготовленні гуми й ебоніту до складу гумової суміші вводять різні наповнювачі (крейда, тальк і ін.), що істотно впливають на властивості гуми, а також барвники, каталізатори ("прискорювачі") процесу вулканізації й інших речовин.

Гуму широко застосовують для ізоляції монтажних дротів, гнучких переносних проводів і кабелів. Вона вживається також для виготовлення захисних рукавичок, галош, ковриків і ізоляційних трубок. Недоліки гуми як електроізоляційного матеріалу – низька нагрівостійкість (при нагріванні гума старіє, охрупчується і тріскається), мала стійкість до дії нафтових масел, у яких гума набухає, і інших неполярних рідин (бензол, бензин і ін.), а також до дії світла, особливо ультрафіолетового, під впливом якого гума швидко старіє.

Залишки вільної сірки, що є в гумі, шкідливо дію на мідь, особливо при підвищеній температурі (мідь з'єднується із сіркою, утворюючи сірчисту мідь).

Тому неприпустимо безпосередньо накладати звичайну гумову ізоляцію на мідну жилу кабельного виробу. Попередньо мідь покривають так званим розділителем – шаром олова або папером. На алюмінієві жили гума може накладатися безпосередньо, без розділителя.

Сажеві гуми містять у якості наповнювача сажу, тому мають чорний колір. Електроізоляційні властивості низькі. Такі гуми використовують лише в тих випадках, коли високі електричні властивості ізоляції не потрібні (наприклад, зовнішні захисні оболонки (шланги) гумових кабелів). Для звичайних електроізоляційних гум $E_{пр} = 20-30 \text{ кВ/мм}$.

Ебоніт для цілей електротехніки випускається у вигляді листів (дошок), стержнів і трубок. Він добре піддається механічній обробці і застосовується переважно в техніці слабких струмів, для акумуляторних баків і т.п. Останнім часом ебоніт значною мірою витісняється пластмасами.

Синтетичні каучуки – синтетичні матеріали, сировиною для виготовлення яких служать спирт, нафта і природний газ.

Бутадієновий каучук – найбільш розповсюджений синтетичний каучук, синтезується в результаті полімеризації газоподібного вуглеводню бутадієну. Широко застосовується замість натурального каучука або в суміші з ним для виготовлення як м'якої гуми, так і ебоніту. Каучуки (натуральний і синтетичні) є термореактивними матеріалами.

13.4. Скло

Скло - неорганічна аморфна речовина, що є складною системою різних окислів. Крім склостворюючих окислів, тобто таких, кожен з яких здатний сам по собі утворювати скло (Si_2O і ін.), до складу скла входять і інші окисли: лужні, лужноземельні й ін. Здебільшого основа скла – кремній (Si_2). Скло на основі кремнія називають **силікатним**.

Властивості скла змінюється в широких межах в залежності від складу і режиму теплової обробки. Щільність скла може становити від 2 до $8,1 \text{ г/см}^3$. Об'ємний опір при нормальних умовах може бути в межах $\rho_v=10^6 \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Електрична міцність при електричному пробі мало залежить від складу скла і досягає $E_{\text{пр}}=500 \text{ кВ/мм}$. Основний вплив на $E_{\text{пр}}$ мають повітряні включення в товщі скла. Як правило, пробій скла має електротепловий характер.

Важке скло – скло з високим вмістом свинцю (кристали, флінти).

Міцність скла при стискаючому навантаженні порівняна з міцністю сталей, а міцність при розтягуванні – майже на порядок менше. У звичайних умовах скло крихке. Як і інші аморфні речовини, скло не має різко вираженої температури плавлення. Температура розм'якшення для різних типів скла знаходиться в межах від 400 до 1600°C .

При швидкому нагріванні або охолодженні скла виникають температурні напруги, що є причиною його розтріскування. Тонкостінні скляні вироби більш стійкі до різкої зміни температур, ніж товстостінні.

Температурний коефіцієнт розширення скла при впаюванні металевого дроту або стрічки в скло (наприклад, у електровакуумних приладах) необхідно підбирати таким чином, щоб його значення були близькими до значень температурного коефіцієнту матеріалів, що з'єднуються з склом.

Гідролітична стійкість (стійкість до дії вологи) оцінюється за кількістю складових частин скла, що переходять у розчин з одиниці поверхні скла при тривалому зіткненні з водою. Розчинність скла збільшується при зростанні температури. Найвищу гідролітичну стійкість має кварцове скло.

Сітал – новий перспективний вид склоподібних матеріалів, що отримують шляхом майже повної кристалізації скла спеціального складу (назва "сітал" скорочення слів "силікат" і "кристал"). Вони займають проміжне положення між звичайним склом і керамікою (тому іноді їх називаються склокерамікою).

Мають відносно високу міцність і хімічну стійкість.

За призначенням розрізняють шість типів електротехнічного скла:

1. Конденсаторне – використовуються як діелектрик конденсаторів, застосовуваних у високовольтних фільтрах, в імпульсних генераторах, у коливальних контурах високочастотних пристроїв.

2. Монтажне – служать для виготовлення кріпильних деталей, ізоляторів (телеграфних, антенних, опорних, прохідних і ін.).

3. Лампове – застосовуються для балонів і ніжок освітлювальних ламп, різних електронних приладів. До них пред'являється вимога з'єднуваності з металом (вольфрамом, молибденом і ін.)

4. Склоемалі – легкоплавкі непрозорі емалі, що призначаються для покриття поверхонь різних виробів.

5. Скло з наповнювачем – пластмаса гарячого пресування зі скла і слюдяного порошку (мікалексу).

6. Скловолокно – скло, що витягується в довгі гнучкі нитки, що використовуються для виготовлення текстильних скломатеріалів і світловодів.

13.5. Керамічні електроізоляційні матеріали

Електротехнічна кераміка – неорганічні матеріали, одержувані спіканням глини з мінеральними добавками, а також оксидів металів і інших неорганічних з'єднань (карбідів, боридів, нітридів). У результаті спікання в керамічній масі відбувається утворення міцних з'язків між складовими суміші, що надає кераміці значної міцності і термостійкості.



Рис. 13.8 – Електротехнічна кераміка

В електротехніці керамічні матеріали використовують в якості напівпровідникових, магнітних (ферити) і електроізоляційних.

Керамічні електроізоляційні матеріали мають високу механічну міцність, малий кут діелектричних втрат, високу діелектричну проникність, значну нагрівостійкість. У порівнянні з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка більш стійка до електричного і теплового старіння, не дає залишкових деформацій при тривалій дії механічного навантаження.

Металізація кераміки – нанесення на поверхню кераміки якогось металу (наприклад, срібла) термічним методом. Забезпечує можливість здійснення м'якої і твердої

спайки кераміки з металом, що має особливе значення для створення герметизованих конструкцій.

Фарфор є одним з основних матеріалів ізоляторного виробництва. Для виготовлення фарфору застосовують спеціальні сорти глини (каолін) і мінерали кварц і польовий шпат. Основні властивості обпаленого фарфору: щільність 2,3-2,5 г/см³; температурний коефіцієнт лінійного розширення менше, ніж у сталі. Фарфор менш крихкий, ніж скло, хімічно стійкий (тому його застосовують для виготовлення хімічного посуду). Електрична міцність при нормальній температурі $E_{пр}=10-30$ кВ/мм; об'ємний опір $\rho_v=10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м. При підвищених температурах електроізоляційні властивості порцеляни погіршуються.

Глазур – склоподібна маса, що наноситься тонким шаром на поверхню фарфорового ізолятора. При випалі глазур розплавляється і покриває поверхню ізолятора тонким шаром. Глазур захищає фарфор від проникнення вологи в пори і тим самим зменшує її гігроскопічність.

З технічного фарфору виготовляють:

– **лінійні ізолятори** – підвісні для більш високих напруг (більше 35кВ) і штиркові для більш низьких;

– **станційні ізолятори**: опорні і прохідні;

– **апаратні ізолятори**, що входять у конструкцію різноманітних апаратів: трансформаторів, масляних вимикачів, роз'єднувачів, розрядників;

– **монтажні фарфорові вироби**: ролики, деталі патронів, вимикачів, штепсельних з'єднань, запобіжників, відтяжні антенні ізолятори, телеграфні і телефонні ізолятори .

Радіофарфор і його сучасна модифікація - **ультрафарфор** - це в основному фарфор з різними добавками, зокрема, окис барію (BaO). Ультрафарфор має підвищену в порівнянні зі звичайним фарфором механічну міцність.

Стеатит – вид кераміки, виготовлений на основі мінералу тальку (завдяки його надзвичайній м'якості розмелюється в порошок). Спеціальні сорти стеатиту використовуються для високочастотної ізоляції. Не потребує в глазуруванні завдяки надзвичайно щільній структурі.

Конденсаторна кераміка – матеріал з високим значенням діелектричної проникності, що дозволяє його використовувати як діелектрик для компактних конденсаторів. Деякі з видів конденсаторної кераміки мають в якості основної складової частини рутил (двоокис титану, титанові білила).

Сегнетокераміка – має високу діелектричну проникність, що сильно змінюється з температурою, а також нелінійну залежність ємності від величини прикладеної напруги, що дає можливість її використовувати в різних електротехнічних і радіотехнічних пристроях. Найпоширеніший представник сегнетоелектриків – титанат барію (тибар, BaO·TiO₂). З сегнетоелектриків виготовляють **вариконди** – особливий тип конденсаторів, ємність яких нелінійно залежить від прикладеної напруги.

13.6. Слюда і матеріали на її основі

Слюда є найважливішим із природних мінеральних електроізоляційних матеріалів завдяки її високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності і гнучкості. Слуду застосовують у відповідальній електричній ізоляції, зокрема, в ізоляції електричних машин високих напруг і великих потужностей (у тому числі великих

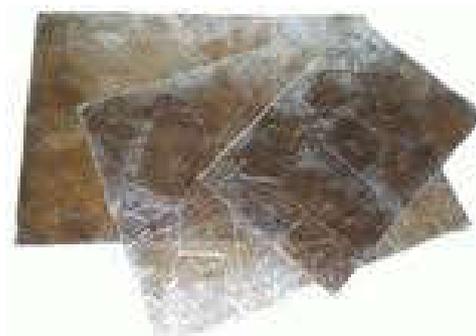
турбогенераторів і гідрогенераторів, тягових електродвигунів і т.п.), і як діелектрик у деяких конструкціях конденсаторів.



Рис. 13.9 – Слюда

Слюда зустрічається в природі у вигляді кристалів, характерною рисою яких є здатність легко розшаровуватись по паралельним площинам (площини спайності). За хімічним складом різні види слюди є водними алюмосилікатами. Найважливіші з них: **мусковіт і флогопіт**. Слюда відноситься до електроізоляційних матеріалів вищого класу нагрівостійкості.

Міканіти – це листові або рулонні матеріали, склеєні з окремих пластинок слюди за допомогою клеючого лаку або сухої смоли, іноді з застосуванням волокнистої "підкладки" з паперу або тканини.



13.10 – Міканіт

Внаслідок наявності в міканітах великої кількості (не менш 50% ваги) слюди вони мають порівняно високою нагрівостійкість.

13.7. Азбест і азбестові матеріали

Азбест – назва групи мінералів, що мають чітко виражену волокнисту структуру. Найбільш розповсюджений тип азбесту – хризотилловий – є волокнистим різновидом мінералу хризотилу (змійовика).



13.11 – Азбест

Азбест залягає в кам'яній гірській породі у вигляді жил, що складаються з пучків волокон. Основною перевагою азбесту в порівнянні з органічними волокнистими матеріалами є висока нагрівостійкість. Азбест є гігроскопічним, тому часто просочується бітумами, смолами і т.п. Звичайний хризотилловий азбест розчиняється в кислотах, однак деякі порівняно рідкі види азбестів мають високу кислотостійкість. Електроізоляційні властивості азбесту порівняно невисокі, тому він не застосовується в ізоляції при високих напругах і частотах струму. Є надзвичайно шкідливим, тому при роботі з азбестом необхідно захищати дихальні шляхи.

Азбестоцемент (азбоцемент) – застосовувана в електротехніці пластикна маса холодного пресування чисто неорганічного складу, у якій наповнювачем є азбестове волокно, а зв'язувальною речовиною – цемент. Азбоцемент випускається у вигляді дошок, труб і фасонних виробів. Він має непогані механічні, властивості і високу нагрівостійкість, добре протистоїть впливові іскор і електричної дуги, тому його використовують для виготовлення розподільних дошок і щитів, стінок іскрогасильних камер і перегородок.

13.8. Гірські породи

Електроізоляційні властивості гірських порід, як правило, невисокі, тому вони зазвичай використовуються лише при низьких напругах і частотах.

Мармур – гірська порода зернисто-кристалічної структури, що має здатність поліруватися до дзеркального блиску. Мармур застосовується як декоративний (лицювальний) матеріал. В електротехніці з нього виготовляють розподільні щити і дошки, основи рубильників і перемикачів при робочих напругах до 500 В. Він має красивий зовнішній вигляд у полірованому стані, досить високу механічну міцність при статичних навантаженнях, негорючий, стійкий до дії води, лугів, органічних розчинників і олій.

Шифер (сланець, аспід) – розповсюджена гірська порода, має звичайно темно-сірий колір і шарувату структуру. Шифер значно поступається мармуру за зовнішнім виглядом, його не можна полірувати. Він гірше за електроізоляційними властивостями, більш гігроскопічний, але і більш кислотостійкий і нагрівостійкий, ніж мармур.

Тальк (мильний камінь, жировик) – водний магнезійний силікат. Це камінь світлого кольору, лускатої будови, жирний або мильний на дотик (звідси і назва), досить м'який, його можна різати ножем. Тальк легко розмелюється в тонкий порошок, що широко застосовується в різних галузях промисловості. У техніці електричної ізоляції тальк використовується як сировина у виробництві керамічних матеріалів, як наповнювач у

гумових сумішах, як присипка для попередження злипання дротів з гумовою й азбестовою ізоляцією й ін.

Гагат (сибірський гагат) – гірська порода органічного походження. Він має темно-коричневий колір, добре полірується і механічно обробляється. При 100°C він стає гнучким, при 250°C починає розкладатися, при 400°C загоряється.

13.9. Оксидна і фторидна ізоляції

При окислюванні деяких металів на їхній поверхні утворюється шар окислу (оксиду) металу, що має електроізоляційні властивості. Найчастіше на практиці застосовується оксидний ізоляційний шар на алюмінії, одержуваний шляхом спеціальної обробки (за допомогою електрохімічної "анодної" обробки). Оксид алюмінію має досить високу для практичних цілей пробивну напругу ($E_{пр}=1,2...4,3$ кВ/мм). Недоліками оксидної ізоляції є мала гнучкість і значна гігроскопічність (тому зазвичай її покривають лаком). Оксидна ізоляція алюмінію відноситься до найвищого класу нагрівостійкості, оскільки її температура плавлення близько 2050°C.

Фторидна ізоляція створюється при взаємодії металу з фтором при підвищеній температурі. Таким чином утворюється фторид алюмінію (AlF_3) і фторид міді (CuF_2).

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке волокнисті матеріали, і які їхні основні переваги та недоліки?
2. Як поліпшуються властивості волокнистих матеріалів у процесі просочення?
3. Які особливості бавовняних тканин і натурального шовку як електроізоляційних матеріалів?
4. Що таке лантаніт, і для чого вона використовується?
5. У чому основні відмінності між натуральними, штучними та синтетичними волокнами?
6. Що таке пластичні маси, і які компоненти входять до їхнього складу?
7. Які властивості шаруватих пластиків (гетинаксу і текстоліту), і де вони застосовуються?
8. Які відмінності між термопластами та терморезистивними пластиками? Наведіть приклади.
9. Які основні недоліки гуми як електроізоляційного матеріалу?
10. Що таке вулканізація каучуку, і як вона впливає на властивості матеріалу?
11. Що таке силікатне скло, і які його властивості як діелектрика?
12. Що таке сітал, і які його переваги порівняно зі звичайним склом?
13. Чим фарфор відрізняється від стеатиту за своїми властивостями та застосуванням?
14. Які види слюди використовуються в техніці, і які їх основні характеристики?
15. Що таке оксидна ізоляція, і чому її зазвичай покривають лаком?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Електроізоляційні матеріали», звернувши увагу на класифікацію, властивості та застосування кожного виду матеріалу. Навести 2–3 приклади джерел (підручники, наукові статті, технічні довідники).

2. Підготувати порівняльну таблицю основних електроізоляційних матеріалів (волокнисті, пластичні, еластоміри, скло, кераміка, слюда, азбест, оксидні та фторидні ізоляції) із зазначенням: механічної міцності та гнучкості; електричної міцності та питомого опору; температурної стійкості; гігроскопічності; особливостей застосування в електротехніці.

3. Проаналізувати приклади практичного застосування матеріалів: обмотки дротів і кабелів, конструкції електричних апаратів, ізолятори, конденсатори. Пояснити, чому для кожного виду виробів обирають саме певний матеріал, і які властивості матеріалу впливають на його вибір.

ТЕМА 14. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з фізико-механічними та хімічними властивостями електротехнічних матеріалів, які впливають на їх ефективність та надійність у процесі експлуатації.

Анотація

Тема присвячена вивченню властивостей електроізоляційних матеріалів та їх впливу на експлуатаційні характеристики електротехнічних виробів. Розглядаються загальні фізичні, механічні та хімічні властивості діелектриків, які впливають на їх вибір залежно від умов експлуатації. Особлива увага приділяється вологостійкості матеріалів, впливу температури, теплових імпульсів та морозостійкості, а також механічній міцності, пружності, пластичності, твердості та в'язкості матеріалів. Висвітлюються хімічні властивості, включаючи корозійну стійкість, адгезію, когезію та розчинність. Окремо розглядаються особливості поведінки електроізоляційних матеріалів під впливом випромінювань високої енергії та оцінка їх радіаційної стійкості. Лекція формує у слухачів розуміння комплексного підходу до оцінки та вибору електроізоляційних матеріалів у сучасній електротехніці.

Keywords: electrical insulating materials, dielectrics, moisture resistance, hygroscopicity, moisture permeability, thermal properties, heat resistance, thermal conductivity, thermal expansion, mechanical properties.

План лекції

1. Загальні поняття;
2. Вологостійкість електроізоляційних матеріалів;
3. Теплові властивості діелектриків;
4. Механічні властивості матеріалів;
5. Хімічні властивості електротехнічних матеріалів;
6. Властивості діелектриків під впливом випромінювань високої енергії.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

14.1. Загальні поняття

При виборі електроізоляційного матеріалу в залежності від умов експлуатації можуть бути важливими не тільки його електричні властивості, але й інші фізичні, а також механічні і хімічні властивості.

Фізичні властивості (зумовлені особливостями мікроструктури): вологостійкість, термостійкість (здатність протистояти високим і низьким температурам), радіаційна стійкість (здатність протистояти різним видам випромінювань), температурні коефіцієнти лінійного розширення (для деталей, у яких контактують різні матеріали).

Механічні властивості (зумовлені особливостями макроструктури): статична і динамічна міцність, твердість, пружність, пластичність, зносостійкість тощо. У ряді випадків до виробів пред'являються вимоги стійкості до вібрацій різних амплітуд і частот.

Хімічні властивості: окислюваність поверхні, розчинність, склеюваність (когезія і адгезія) матеріалів, хіміко-біологічна стійкість в умовах агресивного навколишнього середовища (наприклад, у тропічних умовах захист від гнильних бактерій, комах і утворення цвілі) тощо.

14.2. Вологостійкість електроізоляційних матеріалів

Вологостійкість – здатність матеріалу протистояти проникненню вологи з навколишнього середовища. Безпосередньо залежить від такої його властивості, як гігроскопічність.

Гігроскопічність – здатність матеріалу всотувати вологу з навколишнього середовища.

Вологопроникність – здатність матеріалу пропускати крізь себе пари води.

Атмосферне повітря завжди містить деяку кількість водяної пари. **Абсолютну вологість повітря** оцінюють масою m (г) водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря (m^3).

На рис. 14.1 наведена температурна залежність абсолютної вологості повітря при насиченні ($m_{\text{макс}}$), тобто більшої кількості води при всіх зазначених температурах повітря містити не може, тому надлишок вологи випадає у вигляді роси.

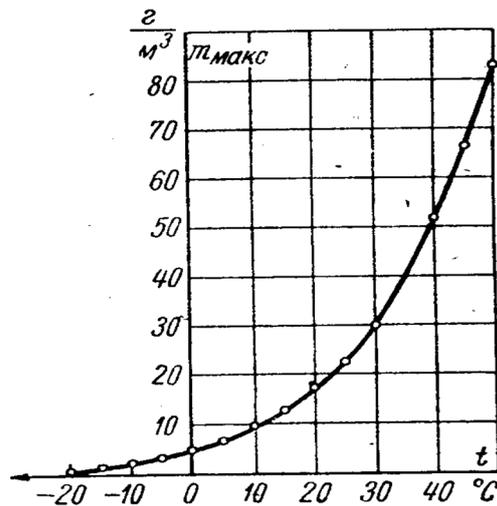


Рис. 14.1 – Залежність абсолютної вологості повітря при насиченні від температури

З рисунка 14.1 видно, що абсолютна вологість різко зростає зі збільшенням температури.

Відносна вологість повітря дорівнює відношенню маси водяної пари в одиниці об'єму до його маси при насиченні

$$\varphi_v = \frac{m}{m_{\max}} 100\%.$$

Вода є сильнополярним діелектриком з низьким питомим опором ($\rho = 10^3 10^4$ Ом·м), а тому її проникнення в пори твердих діелектриків веде до різкого зниження їх електричних властивостей. Особливо помітний вплив вологості при підвищених температурах (30-40°C) і відносній вологості 98-100%. Подібні умови спостерігаються в країнах з вологим тропічним кліматом, причому в період дощів вони можуть зберігатися протягом тривалого періоду часу, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках електричних машин і апаратів.

В першу чергу підвищена вологість повітря впливає на поверхневий опір діелектриків. При наявності в діелектрику відкритої пористості волога потрапляє всередину матеріалу. Для захисту твердих діелектриків від дії вологості їх покривають лаками, що не змочуються водою.

Вологість матеріалів – це деякий "рівноважний" стан вологості, якого досягає електроізоляційний матеріал при даній вологості і температурі навколишнього середовища через достатньо тривалий час.

На гігроскопічність матеріалу істотно впливає його структура і хімічна природа. Велику роль грають наявність і розмір капілярних проміжків усередині матеріалу, в які проникає волога. Крупнопористі матеріали, зокрема волокнисті, більш гігроскопічні, ніж матеріали щільної структури.

Орієнтовані розміри пор, що зустрічаються в різних електроізоляційних матеріалах (для порівняння діаметр молекули води $D_v \approx 2,7 \text{ \AA}$):

- макропори в кераміці – $10^3 - 10^6 \text{ \AA}$;
- капіляри у волокнах целюлози – 10^3 \AA ;
- міжмолекулярна пористість різних матеріалів – $10 - 50 \text{ \AA}$.

Характеристика вологопроникності важлива для оцінки матеріалів, застосовуваних для **захисних покриттів** (шланги кабелів, опресування конденсаторів, компаундні заливання, лакові покриття деталей). Завдяки наявності дрібної пористості більшість матеріалів має вологопроникність. Тільки для скла, добре обпаленої кераміки і металів вологопроникність практично дорівнює нулеві.

Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих ізоляційних матеріалів широко застосовується їхнє **просочування**. Однак просочення целюлозних волокнистих матеріалів і інших пористих органічних діелектриків дає лише уповільнення зволоження матеріалу, оскільки молекули просочувальних речовин більше молекул води і не в змозі створити повну непроникність пор матеріалу для вологи.

Висока вологість сприяє розвитку цвілі. Поява цвілі погіршує питомий поверхневий опір діелектриків, може погіршити механічну міцність ізоляції і викликати корозію дотичних з нею металевих частин. Найбільш уразливі для розвитку цвілі целюлозні матеріали (гетинакс, текстоліт, каніфоль, масляні лаки й ін.). Найбільш стійкими до утворення цвілі є неорганічні діелектрики кераміка, скло, слюда, кремнійорганічні матеріали і деякі з органічних, наприклад епоксидні смоли, фторопласт-4, поліетилен, полістирол.

14.3. Теплові властивості діелектриків

До найважливіших теплових властивостей діелектриків відносяться: нагрівостійкість (тепlostійкість), морозостійкість, теплопровідність і теплове розширення.

Нагрівостійкість – здатність електроізоляційних матеріалів і виробів без шкоди для них витримувати вплив високої температури, а також різкі зміни температури.

Нагрівостійкість неорганічних діелектриків визначають за початком істотної зміни електричних властивостей, наприклад за зниженням питомого електричного опору. Величину нагрівостійкості оцінюють відповідними значеннями температури (°C), при якій з'явилися ці зміни. Нагрівостійкість органічних діелектриків часто визначають за початком механічних деформацій розтягування або згину, зануренню голки під тиском при нагріванні діелектрика (визначення "тепlostійкості").

При оцінці якості, трансформаторного масла, а також розчинників, застосовуваних у виробництві електроізоляційних лаків використовують такі характеристики, як температура спалаху і запалення.

Температура спалаху – це температура рідини, при нагріванні до якої суміш її випарів з повітрям спалахує при піднесенні відкритого полум'я.

Температура запалення – це температура, при якій загоряється випробувана рідина (більш висока, ніж температура спалаху).

Теплове старіння ізоляції – погіршення якості ізоляції при тривалому впливові підвищеної температури через інтенсифікацію хімічних процесів.

Старіння може виявлятися, наприклад, у лакових плівок і целюлозних матеріалів у вигляді підвищення твердості і крихкості, утворення тріщин і т.п. Старіння діелектричних матеріалів прискорюється від опромінення зразка ультрафіолетовими променями, впливу електричного поля, механічних навантажень і агресивного середовища.

Відповідно до рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), електроізоляційні матеріали для електричних машин, трансформаторів і апаратів розділені на 7 класів нагрівостійкості.

Граничне значення температур нагрівостійкості характеризуються основними групами ізоляційних матеріалів, що належать до певного класу та встановлюються відповідно до ДСТУ. Класи ізоляцій наведені у табл. 14.1.

Таблиця 14.1 – Класи ізоляційних матеріалів

Клас	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Тривало допустима температура, 0С	90	105	120	130	155	180	понад 180

Примітка:

Клас У	– волоконні матеріали з целюлози, бавовни і натурального шовку, не просочені і не занурені в рідкий ізоляційний матеріал.
Клас А	– волоконні матеріали з целюлози, бавовни або натурального і штучного шовку, в робочому стані просочені або занурені в рідкий ізоляційний розчин.
Клас Е	– синтетичні органічні матеріали (плівки, волокна, смоли та ін.)
Клас В	– матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, вживані з органічними зв'язувальними та просочувальними складовими.
Клас Ф	– матеріал на основі слюди, азбесту і скловолокна, в поєднанні з синтетичними зв'язувальними та просочувальними складовими.
Клас Н	– матеріал на основі слюди, азбесту і скловолокна, вживані і поєднані з кремнійорганічними зв'язувальними та просочувальними складовими.
Клас С	– слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, або їх комбінації, вживані без зв'язувальними або з неорганічними і елементоорганізаційними складовими.

Теплові імпульси – різка (за короткий проміжок часу) зміна температури експлуатації електротехнічного приладу.

Особливо чутливі до теплових імпульсів крихкі неметалеві матеріали: скло, керамічні матеріали й ін. Результатом швидкоплинного нагрівання чи охолодження можуть бути утворення тріщин чи крихке руйнування ізолятора.

Морозостійкість – здатність ізоляції працювати без погіршення експлуатаційних властивостей при низьких кліматичних температурах (до 70°С).

При низьких температурах, як правило, електричні властивості ізоляційних матеріалів поліпшуються, однак багато матеріалів при низьких температурах стають крихкими (окрихчуються).

Теплопровідність – властивість матеріалу проводити тепло.

Практичне значення теплопровідності визначається тим, що тепло, яке виділяється внаслідок втрат енергії в оточених ізоляцією провідниках і магнітопроводах трансформаторів, а також внаслідок діелектричних втрат в ізоляції, переходить у

навколишнє середовище через різні матеріали. Висока теплопровідність дозволяє відводити зайве тепло і запобігати перегріванню електротехнічних виробів.

Теплове розширення матеріалів оцінюють температурним коефіцієнтом лінійного розширення.

Матеріали, що мають малі значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, мають, як правило, і більш високу нагрівостійкість. Температурні коефіцієнти лінійного розширення деяких діелектриків: кварцове скло (неорганічний матеріал) – $\alpha=0,55 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; поліетилен (органічний матеріал) – $\alpha=100 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Виходячи з цього очевидно, що розміри деталей, виготовлених з неорганічних матеріалів, набагато більш стабільні при коливаннях температури.

Важливо враховувати різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, з яких виготовляється той чи інший електротехнічний виріб, який при експлуатації суттєво розігрівається (вакуумні лампи і тп).

14.4. Механічні властивості матеріалів

Оскільки деталі з електроізоляційних матеріалів зазнають впливу статичних і динамічних навантажень, велике практичне значення має механічна міцність цих матеріалів.

Статична міцність визначається в результаті іспитів матеріалів на розтяг і стиск. Характеризується межею міцності

$$\sigma_B = P/F,$$

де P - сила, F - площа поперечного перетину зразка). Вимірюється в Паскалях (Па = Н/м²).

Для анізотропних електроізоляційних матеріалів (шаруватих, волокнистих і т.п.) значення механічної міцності суттєво залежить від знака навантаження. Наприклад, для скла, керамічних матеріалів, багатьох пластмас і ін. межа міцності при стиску значно більше, ніж при розтягуванні.

Механічна міцність полімерних матеріалів суттєво зменшується з підвищенням температури. Міцність гігроскопічних матеріалів знижується при збільшенні вологості.

Пластичні властивості матеріалу характеризуються **відносним подовженням або звуженням**

$$\delta = \Delta l_k / l, \quad \psi = \Delta F_k / F,$$

де l і F - довжина і площа поперечного перетину зразка; Δl_k і ΔF_k - максимальне видовження і максимальне зменшення площі поперечного перетину зразка після руйнування.

Пластична (залишкова) деформація – деформація, що залишається в матеріалі після зняття навантаження.

Пружна деформація – деформація, що зникає після зняття навантаження.

Пластична (холодна) текучість матеріалу - здатність при тривалому прикладанні порівняно малих навантажень пластично деформуватись.

Врахування можливості пластичної текучості необхідний, якщо виріб в експлуатації знаходиться під дією тривалого статичного навантаження і при цьому повинен зберігати незмінними форму і розміри. При підвищенні температури і наближенні її до температури розм'якшення даного матеріалу пластична текучість матеріалу суттєво збільшується.

В'язкість руйнування (динамічна міцність) характеризує здатність матеріалу протистояти динамічним (раптово прикладеними) зусиллям.

Для оцінки в'язкості руйнування проводять іспит на згинальний удар на маятникових копрах. Визначається як відношення витраченої на злам зразка енергії до поперечного перерізу зразка (вимірюється в Дж/м²). Наприклад ударна в'язкість поліетилену 100 кДж/м², а для керамічних матеріалів вона складає всього 2-5 кДж/м².

У ряді випадків необхідно визначати здатність електроізоляційних матеріалів витримувати без руйнування тривалий вплив вібрацій, тобто повторюваних коливань визначеної частоти й амплітуди. Визначення вібраційної стійкості важливо для електроустаткування, що зазнає вібрацій при експлуатації.

Твердість - здатність матеріалу протистояти механічному проникненню в його поверхню іншого, більш твердого тіла (індентора). Визначається методами Бринеля, Роквелла, Вікерса й ін. за зусиллям, що прикладається до індентора, і за розмірами відбитка в досліджуваній поверхні. Вимірюється в кг/мм².

В'язкість рідин і газів. Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів (масел, лаків, заливальних і просочувальних компаундів і т.п.) і газів важливою механічною характеристикою є в'язкість, яка характеризується величиною динамічної в'язкості.

Динамічна в'язкість (або коефіцієнт внутрішнього тертя рідини) характеризує опір переміщенню одних шарів рідини (газу) щодо інших.

14.5. Хімічні властивості електротехнічних матеріалів

Хімічні властивості матеріалів:

- хімічне руйнування (розкладання) при роботі з виділенням побічних продуктів;
- корозія металів (окислення поверхні);
- хімічна стійкість при контакті з різними речовинами (наприклад, газами, водою, кислотами, лугами, розчинами солей і т.п.);
- здатність склеюватись (когезія і адгезія) і розчинність у розчинниках зутворенням лаків.

Адгезія – здатність різнорідних матеріалів (речовин) утворювати міцне з'єднання (склеюватись). **Когезія** – здатність одного матеріалу (речовини) утворювати міцне з'єднання.

Розчинність твердих матеріалів може бути оцінена кількістю матеріалу, що переходить у розчин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу, що стикається з розчинником. Розчинність зменшується з підвищенням ступеня полімеризації. Високомолекулярні речовини з лінійною структурою молекул розчиняються порівняно легко, а з просторовою структурою - важко. При підвищенні температури розчинність звичайно збільшується.

14.6. Властивості діелектриків під впливом випромінювань високої енергії

У сучасній техніці можливі такі умови використання електроапаратури, при яких вона знаходиться під короткочасним або тривалим впливом радіоактивних випромінювань високої енергії. При цьому важливо знати їх радіаційну стійкість.

Радіаційна стійкість – ступінь стійкості матеріалів (збереження ними своїх електричних і механічних властивостей) до впливу високоенергетичних випромінювань.

У деяких випадках електротехнічні матеріали окрім своїх основних функцій мають виконувати функції поглиначів-екранів випромінювань. Вплив випромінювання може привести до ряду молекулярних перетворень і хімічних реакцій. Іонізаційні процеси викликають миттєвий потік електронів з утворенням вільних радикалів. В органічних полімерах під дією інтенсивного опромінення відбуваються виділення газу, полімеризація, вулканізація й ін.

При тривалому або дуже інтенсивному опроміненні відбувається руйнування будь-якого полімеру. З часом під впливом високоенергетичного опромінювання матеріалів відбувається суттєва деградація (погіршення) як їх електричних властивостей, так і хімічних і фізико-механічних.

Запитання для самоперевірки:

1. Які основні властивості електроізоляційних матеріалів важливі при їх виборі для експлуатації в різних умовах?
2. Що таке вологостійкість і гігроскопічність матеріалів? Як вони впливають на електроізоляційні властивості?
3. Як визначається абсолютна і відносна вологість повітря?
4. Чому підвищена вологість повітря знижує електричні властивості твердих діелектриків?
5. Які матеріали найбільш стійкі до утворення цвілі, і чому?
6. Що таке нагрівостійкість діелектриків, і як її визначають?
7. Як температура спалаху і температура заpalення характеризують рідини, що використовуються в ізоляції?
8. Що таке теплове старіння ізоляції, і як воно впливає на її властивості?
9. Які матеріали належать до класів нагрівостійкості У, А, Е, В, F, Н, С? Які температури відповідають цим класам?
10. Що таке теплові імпульси, і як вони впливають на ізоляційні матеріали?
11. Як оцінюється статична міцність матеріалу? Що таке межа міцності?
12. У чому полягає різниця між пружною та пластичною деформацією?
13. Що таке адгезія і когезія? Як ці властивості використовуються у виробництві електроізоляційних матеріалів?
14. Які зміни відбуваються з електроізоляційними матеріалами під впливом випромінювань високої енергії?
15. Що таке радіаційна стійкість, і які матеріали найбільш стійкі до впливу радіоактивного випромінювання?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Електроізоляційні матеріали», звернувши увагу на їх класифікацію, фізичні, механічні та хімічні властивості, а також на сферу застосування кожного виду матеріалу. Навести 2–3 приклади джерел (підручники, наукові статті, технічні довідники).

2. Підготувати порівняльну таблицю основних електроізоляційних матеріалів, таких як волокнисті, пластичні, еластomers, скло, кераміка, слюда, азбест, оксидні та фторидні ізоляції, із зазначенням: механічної міцності та гнучкості; електричної міцності та питомого опору; температурної стійкості; гігроскопічності; особливостей застосування в електротехніці.

3. Проаналізувати практичні приклади використання матеріалів, наприклад:

- тобомотки дротів і кабелів;
- тконструкції електричних апаратів;
- тізолятори;
- тконденсатори.

Пояснити, чому для кожного виду виробів обирають певний матеріал, та які властивості матеріалу впливають на його вибір.

ТЕМА 15. ВИКОРИСТАННЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ В КОНДЕНСАТОРАХ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з використанням діелектриків у конструкціях конденсаторів, їх властивостями та впливом на ефективність роботи цих електричних компонентів.

Анотація

Тема присвячена використанню діелектриків у конструкціях конденсаторів, їх характеристикам та впливу на ефективність роботи електричних компонентів. Розглядаються основні відомості про конденсатори, параметри їх роботи (номінальна ємність, допуск, номінальна напруга, тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції, температурний коефіцієнт ємності), системи умовних позначень та маркування. Детально аналізуються різні конструкції конденсаторів постійної ємності — рулонні, пакетні, циліндричні, оксидні, литі секційні — та їх практичне застосування. Особлива увага приділяється впливу типу діелектрика на точність, стабільність, електричні параметри і призначення конденсатора в схемах різного призначення, таких як фільтри, захисні кола, високочастотні контури та джерела стабільних напруг. Лекція допомагає здобувачам вищої освіти зрозуміти, як правильно обирати конденсатори для забезпечення надійності та ефективності електронних систем.

Keywords: capacitor, dielectric, nominal capacitance, nominal voltage, temperature coefficient of capacitance, electrical insulation resistance, dielectric loss tangent, capacitor design, capacitor types, marking.

План лекції

1. Основні відомості;
2. Параметри конденсаторів;
3. Система умовних позначень конденсаторів;
4. Маркування конденсаторів;
5. Конструкції конденсаторів постійної ємності;
6. Характеристика та використання конденсаторів постійної ємності.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

15.1. Основні відомості

В основу класифікації конденсаторів покладено поділ їх на групи згідно з типом використовуваного діелектрика та з його конструкційними особливостями. Класифікацію конденсаторів наведено на рис. 15.1.

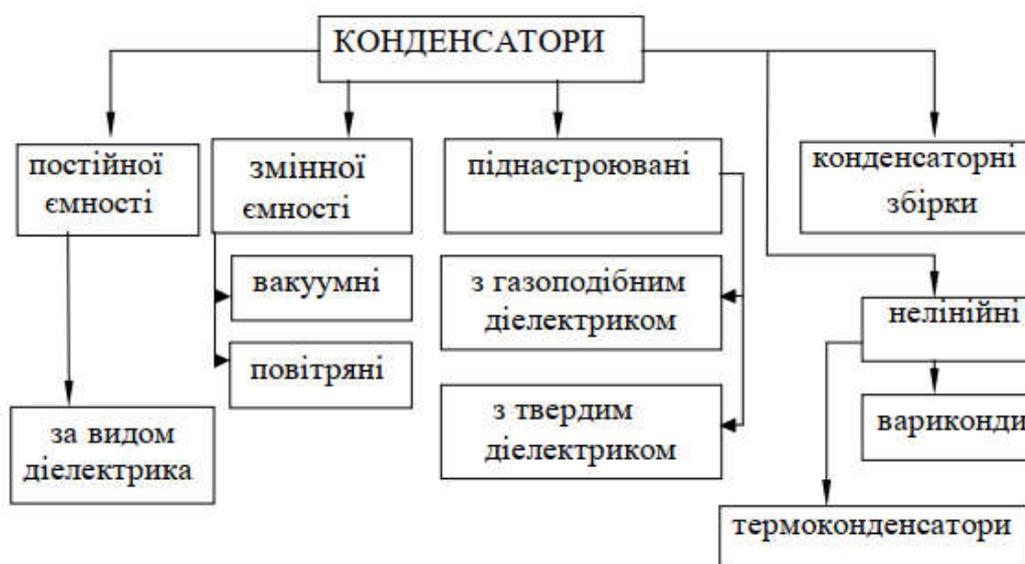


Рис. 15.1 – Класифікація конденсаторів

В залежності від призначення конденсатори умовно поділяють на конденсатори загального та спеціального призначення. Конденсатори загального призначення використовують в основному в приладах, де до них не пред'являють спеціальних вимог. До спеціальних конденсаторів відносять: високовольтні, імпульсні, завадозахисні, пускові тощо.

Ємність постійних конденсаторів фіксується в процесі експлуатації й жодним чином не регулюється. Конденсатори змінної ємності припускають зміну ємності в процесі функціонування апаратури. Ємність піднастроюваних конденсаторів можна змінювати при одноразовому чи періодичному регулюванні.

15.2. Параметри конденсаторів

1. Номінальна ємність – це ємність, яку повинен мати конденсатор згідно з документацією. Значення номінальної ємності встановлюється згідно зі спеціальними рядами: E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192. Числа вказують на кількість номінальних значень у кожній декаді. Так, ряд E6 має шість значень ємності: 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8, а ряд E24 – 24 значення: 1,0; 1,1; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

Номинальна ємність конденсатора завжди вноситься у маркування конденсатора.

2. Припустиме відхилення від номінальної ємності (допуск).

Значення цих відхилень встановлено у відсотках для конденсаторів ємністю більше за 10 пФ та у пікофарадах для конденсаторів з меншою ємністю.

Допуск може бути кодовано літерою:

F ± 1 %	M ± 20 %
J ± 5 %	N ± 30 %
K ± 10 %	D -10 ... +100 %.

3. Номинальна напруга – це значення напруги, за якої він може працювати впродовж терміну служби.

Значення номінальної напруги встановлено й кодовано літерою:

G – 25 В	D – 100 В	T – 350 В
H – 32 В	F – 160 В	Y – 400
C – 63 В	W – 250 В	U – 450 В

4. Тангенс кута діелектричних втрат.

5. Електричний опір ізоляції конденсатора – це його опір постійному струму, який визначається за формулою:

$$R_{із} = U/I_{\text{вит}},$$

де U – напруга, $I_{\text{вит}}$ – струм витоку.

6. Температурний коефіцієнт ємності (ТКС). Для конденсаторів з лінійною залежністю від температури – це відносна зміна ємності за зміни температури на 1 оК. Такі конденсатори поділяють на групи ТКС. Кожна така група позначається, наприклад, як: П100, де П (чи М) – знак ТКС; 100 – номінальне значення ТКС $\times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Такі групи можуть бути кодовані літерами (табл. 15.1).

Таблиця 15.1 – Температурна стабільність конденсаторів

Позначення	Номинальне значення ТКС $\times 10^{-6}, \text{ К}^{-1}$	Кодувальна літера
П100	+ 100	A
П33	+ 33	G
МПО	0	C
М33	- 33	M
М47	- 47	N
М75	- 75	L
М330	- 330	S
М1500	- 1500	V
М3300	- 3300	Y

Для конденсаторів з нелінійною зміною ємності від температури ТКС нормують відповідно до зміни ємності за зміни температури від 20 оС до граничної робочої температури. ТКС таких конденсаторів теж можуть кодуватися літерою (табл. 15.2).

Таблиця 15.2 – Зміна ємності конденсаторів з ненормованим ТКС

Позначення	Припустима зміна ємності %, в межах температури від –60 до +85 оС	Кодувальна літера
H10	± 10	B
H20	± 20	Z
H30	± 30	D
H50	± 50	X
H70	± 70	E
H90	± 90	F

Аналіз параметрів конденсаторів демонструє, що їх вибір залежить від багатьох факторів, таких як точність (допуск), напруга, стабільність при зміні температури (ТКС), втрати енергії ($\text{tg } \delta$) і опір ізоляції. Наявність стандартів (ряди E3–E192, кодувальні позначення) значно спрощує процес вибору і забезпечує взаємозамінність компонентів у різних схемах. Правильний підбір параметрів конденсатора забезпечує стабільність і надійність роботи електронних пристроїв.

15.3. Система умовних позначень конденсаторів

Позначення конденсаторів містять три елементи. Перший елемент (одна чи дві літери) позначає підклас конденсатора: К – постійна ємність; КТ – піднастроюваний; КП – змінна ємність; КН – нелінійний; КС – конденсаторна збірка. Другий елемент – число, яке позначає тип ізоляції (табл. 2.3). Третій елемент – це порядковий номер розробки.

Таблиця 15.3 – Умовні позначення груп конденсаторів

Підклас конденсаторів	Група конденсаторів	Позначення групи
Постійна ємність	Керамічні з напругою нижче за 1600 В	10
	Скляні	21
	Тонкоплівкові	26
	Слюдяні	31
	Паперові з напругою нижче за 2000 В	40
	Паперово-металізовані	42
	Оксидноалюмінієві	50
	Оксидно-танталові	51
	Оксидно-напівпровідникові	53
	Іоністори	58
	Повітряні	60
	Полістирольні	71
	Фторопластові	72
	Поліетилентерефталатні	73
	Комбіновані	75
	Поліпропіленові	78

Повне умовне позначення конденсатора має вигляд:

K75-10-250B – 0,47 мкФ $\pm 5\%$ – В ... ТУ. Це означає: конденсатор постійної ємності з комбінованою ізоляцією з порядковим номером розробки 10 на номінальну напругу 250 В, номінальну ємність 0,47 мкФ, допуском $\pm 5\%$, всекліматичного виконання, виготовлюваний згідно з ... ТУ.

15.4. Маркування конденсаторів

Маркування конденсаторів може бути літерно-цифровим, яке включає умовне позначення конденсатора (його тип), номінальну напругу, ємність, відхилення ємності, групи ТКС, місяць та рік виготовлення.

Кодоване значення ємності містить 3–4 знаки. Літера коду позначає десяткову крапку. Номінальну ємність від 0 до 999 пФ виражають в пікофарадах, з позначенням літерою р (наприклад, 150р); від 1000 до 999999 пФ – в нанофарадах з позначенням літерою н (наприклад, н150); від 1 до 999 мкФ – в мікрофарадах з позначенням літерою μ (наприклад, 1 μ 5); від 1000 до 999999 мкФ – в міліфарадах з позначенням літерою m (наприклад, m100); більше цього значення – у фарадах з позначенням літерою F.

Після номінальної ємності конденсатора слідує кодова літера відхилення ємності, за нею – кодова літера групи ТКС. Так, 33рKL означає, що конденсатор має ємність 33 пФ з допуском $\pm 10\%$ та температурною нестабільністю $-75 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Третій елемент – це порядковий номер розробки. Після цього позначення може слідувати кодова літера номінальної напруги.

15.5. Конструкції конденсаторів постійної ємності

Розглянемо найпоширеніші конструкції конденсаторів постійної ємності.

1. *Рулонна.* У цьому разі тонка плівка діелектрика з двох боків прокладається металетається у рулон (рис. 15.2, а). Таку конструкцію мають паперові (К41, К42)), полістирольні (К71), фторопластові (К72), поліетилентерефталатні (К73) та інші конденсатори. Як металеві обкладинки використовують тонку фольгу з олова чи алюмінію або напильють на діелектрик тонкий шар провідника. Недоліками цієї конструкції є велика індуктивність та відносно мала питома ємність. Такі конденсатори не можна використовувати як завадозахисні.

2 *Пакетна.* У цьому разі тонкі пластини діелектрика перекладають металевими обкладинками послідовно, після чого таку систему стискають у пакет, а металеві обкладинки перемикають через одну (рис. 15.2, б). Металеві обкладинки теж можуть бути як з фольги, так і напиленими. Така конструкція має невелику індуктивність, але малу питому ємність. В пакетній конструкції виготовляють слюдяні (31), скляні (21), лакоплівкові (76) конденсатори, а також деякі керамічні.

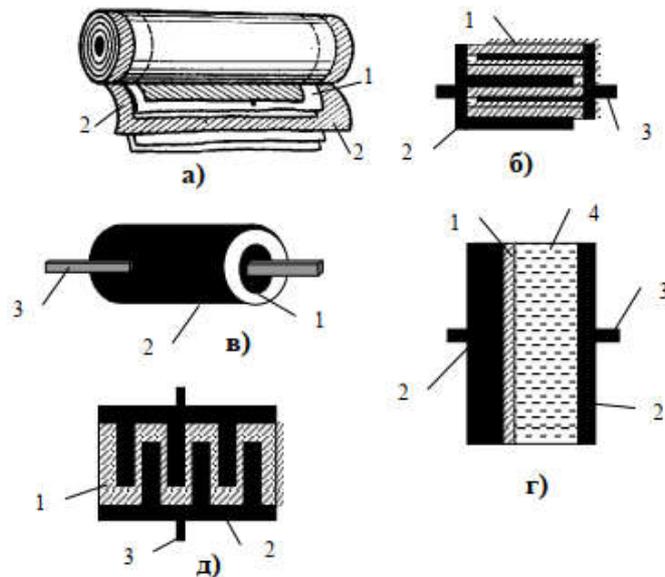


Рис. 15.2 – Конструкції конденсаторів постійної ємності: а - рулонні; б - пакетні; в - циліндричні; г - оксидні; д - литі секційні; 1 - діелектрик; 2 - металева обкладинка; 3 - виводи; 4 - електроліт

3 *Циліндричні.* Діелектрик виготовляють як пустотілу трубку, зовнішню та внутрішню поверхні якої металізують (рис. 15.2, в). Така конструкція має дуже малу індуктивність, але й малу питому ємність. Тому такі конденсатори використовують як високочастотні. Їх виготовляють перш за все з кераміки (К10, К15).

4 *Оксидні.* У цьому разі за діелектрик слугує оксид металу. Наприклад, для конденсаторів оксидно-алюмінієвих (К50) це Al_2O_3 , а для оксиднотанталових (К51) – Ta_2O_5 . Однією обкладинкою слугує металева фольга (анод), а другою (катод) – електроліт, яким просочують паперовий чи тканинний прошарок (рис. 15.2, г). Такі конденсатори мають велику питому ємність, але відносно низькі напруги й великі діелектричні втрати.

5 *Литі секційні.* Таку конструкцію мають керамічні конденсатори. З кераміки відливають “гребінку” з тонкими стінками. Простір між стінками металізують (рис. 15.2, д). Такі конденсатори мають велику питому ємність і малу індуктивність. Це керамічні конденсатори К10, КМ-4, КМ-5 та інші.

Різноманіття конструкцій дозволяє оптимально поєднувати електричні, механічні та технологічні властивості конденсаторів для різних завдань. Наприклад, рулонні конденсатори підходять для загальних застосувань, циліндричні – для високочастотних схем, а оксидні – для створення пристроїв із високою питомою ємністю. Литі секційні конденсатори є оптимальними для використання у високотехнологічних і прецизійних пристроях.

15.6. Характеристика та використання конденсаторів постійної ємності

Тип діелектрика та конструкція відіграють важливу роль при використанні конденсаторів.

Поліетилентерефталатні конденсатори мають дуже малу сорбцію й малі струми витоку. Тому їх вигідно використовувати як інтегруючі у ЦАП, таймерах, генераторах малих частот.

Полістирольні та фторопластові конденсатори теж мають малі струми витоку. Крім того, їхні властивості надто мало змінюються з частотою. Ось чому такі конденсатори використовують у контурах, де важливу роль відіграє стабільність параметрів.

Паперові конденсатори мають велику реактивну потужність. Тому їх широко використовують для захисту від індустриальних завад, як іскрогасячі.

Комбіновані діелектрики мають велику пробивну напругу і широко використовуються в колах з високою напругою.

Оксидні конденсатори мають велику питому ємність, тому їх дуже вигідно використовувати у згладжувальних фільтрах.

Керамічні конденсатори мають малу індуктивність. Це в першу чергу блокувальні й високочастотні конденсатори. В останньому разі їх використовують для термокомпенсації при фіксованому налаштуванні контурів.

Кожен тип конденсатора має свої унікальні властивості, які обумовлюють його специфічне використання:

- **Точність і стабільність:** Поліетилентерефталатні, полістирольні та фторопластові конденсатори.
- **Захист і висока напруга:** Паперові та конденсатори з комбінованими діелектриками.
- **Згладжування фільтрів:** Оксидні конденсатори.
- **Високочастотні кола:** Керамічні конденсатори.

Правильний вибір типу конденсатора дозволяє забезпечити надійність, точність і ефективність роботи електронних схем у різних умовах експлуатації.

Запитання для самоперевірки:

1. На які групи класифікують конденсатори за типом діелектрика?
2. Яка основна відмінність між конденсаторами постійної, змінної та підналаштованої ємності?
3. Які типи конденсаторів належать до спеціального призначення?
4. Що таке номінальна ємність конденсатора, і як вона позначається?
5. Яке припустиме відхилення від номінальної ємності для конденсаторів, і як воно кодується?
6. Як визначається електричний опір ізоляції конденсатора?
7. Що таке температурний коефіцієнт ємності (ТКС), і як він позначається?
8. Які три елементи входять до системи умовних позначень конденсаторів?
9. Що означає умовне позначення "K75-10-250В – 0,47 мкФ $\pm 5\%$ "?
10. Як визначається підклас конденсатора у позначенні?
11. Який вигляд має приклад маркування конденсатора з ємністю 33 пФ, допуском $\pm 10\%$ і температурною нестабільністю $-75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$?
12. Які основні типи конструкцій конденсаторів постійної ємності?
13. У чому особливість оксидних конденсаторів, і які їх основні переваги?
14. Для яких застосувань підходять циліндричні конденсатори?
15. Які основні переваги поліетилентерефталатних конденсаторів, і де їх використовують?

16. Чому полістирольні та фторопластові конденсатори підходять для стабільних резонансних контурів?

17. Які конденсатори використовують для захисту від індустриальних завад, і чому?

18. У яких випадках доцільно використовувати оксидні конденсатори?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Діелектрики в конденсаторах», звернувши увагу на:

- основні властивості діелектриків (електрична міцність, питомий опір, температурна стабільність, втрати енергії, гігроскопічність);

- класифікацію конденсаторів за типом діелектрика та конструктивними особливостями;

- вплив типу діелектрика на характеристики та призначення конденсатора.

2. Підготувати порівняльну таблицю основних типів діелектриків, що застосовуються у конденсаторах (паперові, поліетилентерефталатні, полістирольні, фторопластові, керамічні, оксидні та комбіновані), із зазначенням:

- електричних властивостей (ємність, напруга, $\text{tg } \delta$, опір ізоляції);

- температурної стабільності (ТКС);

- механічних властивостей (гнучкість, міцність);

- особливостей практичного застосування (фільтри, захист від завад, високочастотні кола, джерела стабільної напруги).

3. Проаналізувати конструкції конденсаторів постійної ємності (рулонні, пакетні, циліндричні, оксидні, литі секційні) та пояснити, чому для конкретного типу конденсатора обирають саме певний діелектрик.

ТЕМА 16. ОСНОВИ МАГНЕТИЗМУ: ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА МАГНІТНІ ЯВИЩА

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними поняттями та принципами магнетизму, включаючи механізми виникнення магнітних полів, властивості магнітних матеріалів та закони, що описують магнітні явища.

Анотація

Дана тема знайомить здобувачів вищої освіти з основними поняттями магнетизму, характеристиками магнітного поля, магнітними властивостями матеріалів та законами, що описують магнітні явища. Розглядаються ферромагнітні, парамагнітні та діамагнітні речовини, явища магнітострикції та Віллари-ефект, вплив деформацій і внутрішніх напружень на магнітні властивості матеріалів, а також втрати енергії у ферромагнетиках під час перемагнічування. Лекція формує розуміння принципів вибору магнітних матеріалів для практичних електротехнічних застосувань і забезпечує основу для подальшого вивчення електромагнітних процесів.

Keywords: magnetism, magnetic field, induction, tension, magnetic permeability, ferromagnets, magnetostriction, Villari effect, hysteresis, eddy currents.

План лекції

1. Основні характеристики магнітного поля;
2. Магнітні властивості матеріалів;
3. Вплив деформації на магнітні властивості металів;
4. Втрати енергії в ферромагнетиках.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

16.1. Основні характеристики магнітного поля

Провідники зі струмом, провідники зі струмом і магніти а також магніти взаємодіють між собою. Ця взаємодія здійснюється за допомогою магнітного поля. Величина сили, що діє на провідник одиничної довжини зі струмом у магнітному полі, визначається законом Ампера

$$\Delta F = i \cdot \Delta l \cdot B \cdot \sin\beta,$$

де i - сила струму, Δl - одинична довжина провідника (є вектором, напрямок якого збігається з напрямком струму), B - індукція магнітного поля, β - кут між вектором B і напрямком струму.

Індукція магнітного поля B чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле взаємодіє з одиничним елементом струму ($i \cdot \Delta l = I$), розташованим перпендикулярно векторові індукції. Вимірюється в Тл. Один Тесла - це індукція поля, що діє на одиничний

елемент струму ($i \cdot \Delta l = I \text{ А} \cdot \text{м}$), розташований перпендикулярно векторові індукції, із силою в 1 Н. Залежить від властивостей середовища.

Напруженість магнітного поля H чисельно дорівнює індукції магнітного поля у вакуумі. Не залежить від властивостей середовища, а визначається силою струму і формою провідника.

Відношення $B/H = \mu_a$ називається **абсолютною магнітною проникністю** середовища.

Напруженість магнітного поля H - векторна величина, що збігається в однорідному середовищі за напрямком з вектором магнітної індукції, але за величиною в μ_a раз менше його. У системі СІ вимірюється в А/м.

Відносна магнітна проникність дорівнює $\mu = \mu_a / \mu_0$, де μ_0 - магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Тл·м/А).

Напрямок сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, визначається правилом лівої руки: якщо розташувати долоня лівої руки так, щоб силові лінії магнітного поля входили в неї, а витягнуті пальці вказували напрямок струму, то відставлений великий палець укаже напрямок дії сили (рис. 16.1).

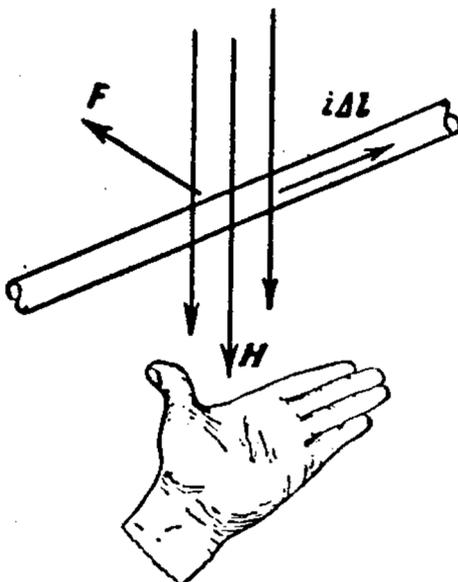


Рис. 16.1 – Правило лівої руки

Два паралельних провідники зі струмом притягаються, якщо напрямок їхніх струмів збігається, і відштовхуються, якщо струми спрямовані в протилежні сторони.

Правило Вектор намагнічування I є мірою намагнічування лівої руки магнетика і дорівнює векторній сумі всіх магнітних моментів молекул, що знаходяться в одиниці об'єму речовини. Вектор намагнічування пропорційний векторові напруженості магнітного поля:

$$I = \kappa \cdot H,$$

де κ - магнітна сприйнятливості (безрозмірна величина), $\mu = 1 + \kappa$.

Крива, що виражає залежність між H і B або H і I , називається **кривою намагнічування**. Речовини, для яких $\kappa > 0$ (але незначно), називаються **парамагнетиками**, $\kappa < 0$ - **діамагнетиками**, $\kappa \gg 1$ - **феромагнетиками**.

16.2. Магнітні властивості матеріалів

Найбільш важливими в електротехніці магнітними матеріалами є феромагнітні речовини і феромагнітні хімічні сполуки - ферити.

Явище феромагнетизму пов'язане з утворенням в матеріалах мікрообластей спонтанної намагніченості до насичення, які називають **магнітними доменами**. Характерною властивістю феромагнітних матеріалів є наявність у них мимовільної (спонтанної) намагніченості у відсутності зовнішнього магнітного поля. Напрямки магнітних моментів окремих доменів при відсутності зовнішнього магнітного поля довільні. Під впливом зовнішнього магнітного поля домени орієнтуються вздовж його ліній, багаторазово підсилюючи магнітний потік.

Монокристали феромагнітних речовин характеризуються магнітною анізотропією, тобто ступінь намагнічування уздовж різних осей суттєво відрізняється.

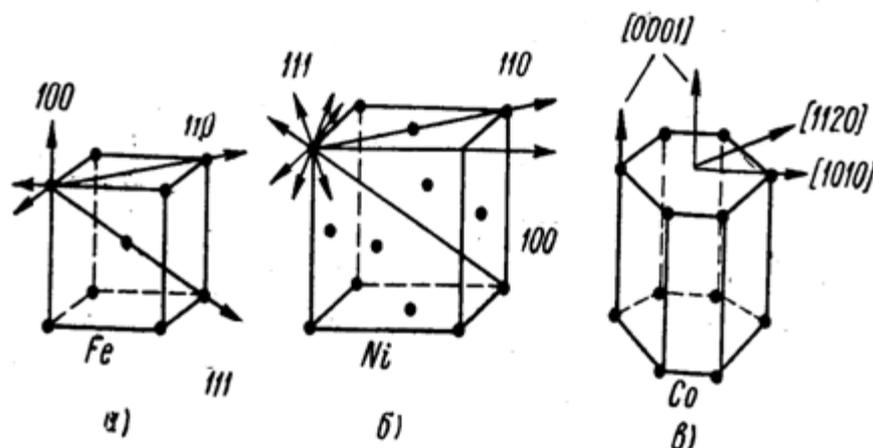


Рис. 16.2 – Анізотропія магнітних властивостей в монокристалах заліза (а), нікелю (б) і кобальта (в)

На рис. 16.2 показані легкі, середні і важкі напрямки намагнічування в монокристалах трьох основних феромагнітних елементів: заліза, нікелю і кобальта.

Легким напрямком намагнічування для монокристала заліза є ребро куба, а найбільш важким діагональ; для кристалічної ґратки нікелю напрямок вздовж ребра куба відповідає напрямкові важкого намагнічування.

У тих випадках, коли анізотропія в полікристалічних магнетиках виражена досить різко, прийнято говорити, що феромагнетик має **магнітну текстуру**. Одержання заданої магнітної текстури використовується для створення підвищених магнітних характеристик матеріалу в потрібному напрямку.

Процес намагнічування феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля зумовлений: 1) ростом доменів, магнітні моменти яких складають найменший кут з напрямком поля; 2) поворотом векторів магнітних моментів у напрямку зовнішнього поля.

Магнітне насичення – це найбільше можливе для даного матеріалу намагнічування, яке досягається, коли ріст доменів досягає максимуму і їхні магнітні моменти орієнтуються в напрямку поля.

Магнітострикція – явище зміни феромагнетиком своїх лінійних розмірів (деформування) під дією зовнішнього магнітного поля. Величина і напрямок деформації залежить від природи феромагнетика і напруженості магнітного поля.

Величина магнітострикційного ефекту не залежить від напрямку поля: нікель під дією магнітного поля коротшає, а залізо – подовжується (у слабких полях, але при істотній зміні величини напруженості поля може коротшати).

Вілларі-ефект – явище, зворотне магнітострикції: зміна намагніченості при деформуванні феромагнетика (явище відкрите італійським фізиком Вілларі у 1865р.).

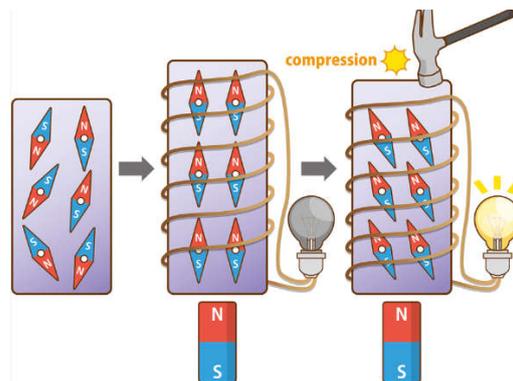


Рис. 16.3 – Вілларі-ефект

Величина магнітострикції монокристала заліза різна для різних напрямків. Монокристал заліза, намагнічений у напрямку ребра куба, подовжується в напрямку діагоналі і стискається в напрямку намагнічування. Магнітострикція має місце й у полікристалічних матеріалах. З трьох основних феромагнітних металів (Fe; Ni; Co) найбільшу магнітострикцію має нікель.

Протікання процесів намагнічування феромагнітного матеріалу характеризують кривими намагнічування $B=f(H)$. На рис. 16.4 наведені криві намагнічування ряду магнітних матеріалів.

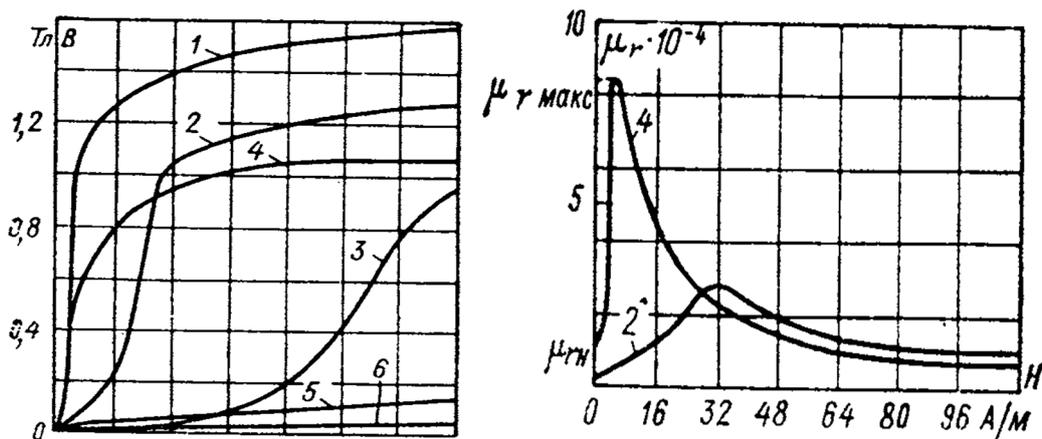


Рис. 16.4 – Залежності магнітної індукції і магнітної проникності від напруженості магнітного поля: 1 - 100%Fe; 2 - 99,98%Fe; 3 - 99,92%Fe; 4 - пермалой; 5 - нікель; 6 - Fe+26%Ni

Відносна магнітна проникність на практиці визначається як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

Магнітну проникність μ при $H \approx 0$ називають **початковою проникністю**, визначаючи її величину при дуже слабких полях (близько 0,1 А/м).

Найбільше значення магнітної проникності носить найменування **максимальної проникності** і позначається μ_{\max} . В сильних полях в області насичення магнітна проникність наближається до одиниці.

Характеристикою феромагнетиків у перемінних магнітних полях є величина динамічної магнітної проникності.

Динамічна магнітна проникність μ_d – це відношення амплітудного значення індукції до амплітудного значення напруженості магнітного поля. Зі збільшенням частоти перемінного поля динамічна магнітна проникність зменшується через інерційність магнітних процесів.

Магнітна проникність феромагнітних матеріалів суттєво залежить від температури, досягаючи максимуму при температурах, близьких до точки Кюрі (для чистого заліза – 768°C, для нікелю – 358°C, для кобальту – 1131°C). При температурах вище точки Кюрі області спонтанного намагнічування руйнуються тепловим рухом і матеріал перестає бути магнітним.

Для характеристики зміни магнітної проникності з температурою використовується **температурний коефіцієнт магнітної проникності**:

$$\alpha_\mu = \frac{1}{\mu_t} \cdot \frac{d\mu}{dt}$$

де μ_t - постійна матеріалу.

При зміні напруженості магнітного поля величина індукції магнітного поля також змінюється, але з деяким відставанням за фазою.

Залежність між ними має вигляд петлі гістерезису (рис. 16.5).

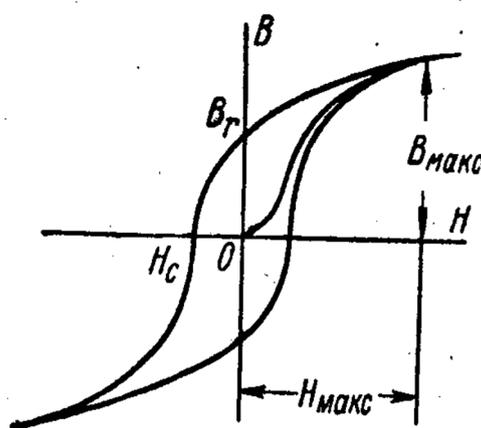


Рис. 16.5 – Початкова крива намагнічування та петля гістерезису для феромагнітного матеріалу

Зміна знака напруженості магнітного поля викликає **перемагнічування матеріалу**.

Максимальна величина індукції магнітного поля для даного матеріалу B_{\max} досягається при його намагнічуванні до насичення. Значення B при $H = 0$ у процесі розмагнічування зразка, намагніченого до насичення, називається залишковою індукцією B_r . Для того щоб зменшити індукцію від значення B_r до нуля (тобто розмагнітити матеріал), необхідно прикласти зворотню напруженість поля H_c , що називається коерцитивною (або затримуючою) силою.

Матеріали з малим значенням H_c і великою величиною магнітної проникності називаються магнітом'якими матеріалами.

Матеріали з великою коерцитивною силою і порівняно малою магнітною проникністю називаються магнітотвердими матеріалами (з магнітотвердих матеріалів виготовляються постійні магніти).

16.3. Вплив деформації на магнітні властивості металів

Деформування феромагнетиків під дією зовнішнього або внутрішнього навантаження впливає на їхні магнітні властивості.

Так прикладення розтягуючої сили викликає різке зменшення магнітної проникності в матеріалах з негативною магнітострикцією (нікель). У матеріалах з позитивною магнітострикцією під дією розтягуючих напружень проникність зростає.

Внутрішні напруження у феромагнетиків виникають в результаті пластичного деформування, наприклад, при прокатці, куванні, протяжці й інших видах механічної обробки. При намагнічуванні вони перешкоджають росту доменів і орієнтації магнітних моментів у напрямку поля. Зі збільшенням внутрішніх напружень магнітна проникність зменшується, а коерцитивна сила зростає.

Внутрішні напруження виникають також при наявності в матеріалі різних домішок або присадок, наприклад кобальту, хрому, вольфраму, або при гартуванні матеріалу. Використовуючи домішки або технологічну операцію гартування, можна штучно збільшити внутрішні напруження й одержати магнітотвердий матеріал. Для відновлення магнітних властивостей магнітом'які матеріали відпалюють, що знімає внутрішні напруження і викликає **рекристалізацію** (відновлення) зерен.

Магнітні властивості феромагнетиків залежать від величини зерна: у дрібнозернистих матеріалів коерцитивна сила більше, ніж у грубозернистих. Це пояснюється більшою поверхнею zdeформованих зерен у дрібнозернистих матеріалів, що приводить до збільшення коерцитивної сили.

16.4. Втрати енергії в феромагнетиках

При перемагнічуванні феромагнетиків мають місце втрати енергії, які викликають розігрів матеріалу. Втрати енергії зумовлені: 1) гістерезисною залежністю між напруженістю й індукцією магнітного поля; 2) динамічними втратами. Динамічні втрати зумовлені **вихровими струмами**.

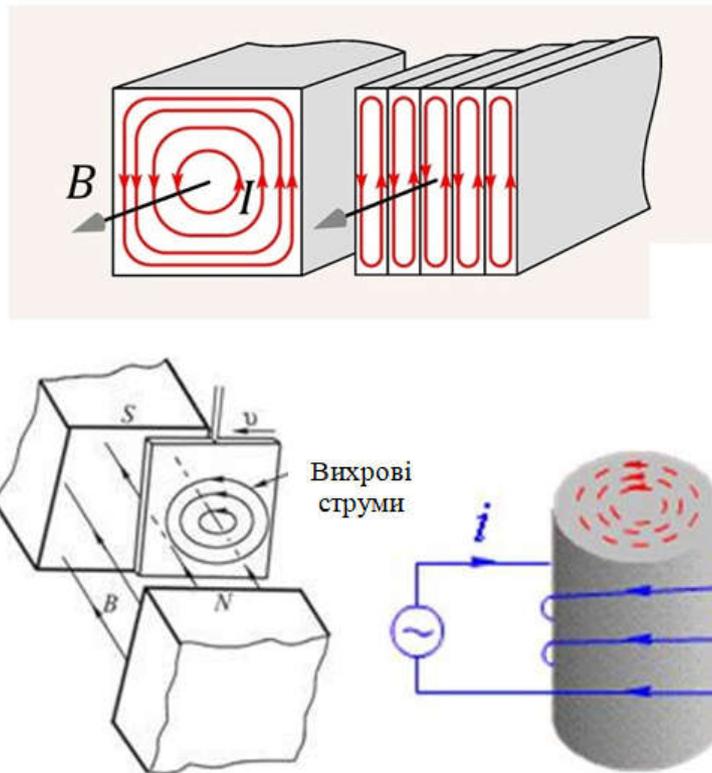


Рис. 16.6 – Вихрові струми, струми «Фуко»

Втрати на вихрові струми залежать від електричного опору феромагнетика: чим вище питомий опір феромагнетика, тим менше втрати на вихрові струми.

Втрати енергії на перемагнічування феромагнетика пропорційні площі петлі гістерезиса і частоті струму. Гістерезисне розсіювання енергії визначається за формулою:

$$W_h = \eta \cdot B_{max}^n \cdot f \cdot V,$$

де η - коефіцієнт, що залежить від матеріалу; B_{max} - максимальна індукція; n - показник ступеня ($n = 1,6 \dots 2,2$); f - частота струму; V - об'єм феромагнетика.

Розсіювання енергії на вихрові струми визначається за формулою:

$$W_f = \xi \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot V,$$

де ξ - коефіцієнт, що залежить від типу феромагнетика (зокрема, від його питомого опору) і форми. Оскільки W_f залежить від частоти у другому ступені, а величина W_h - у першому, то при високих частотах необхідно враховувати в першу чергу втрати на вихрові струми.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке магнітне поле і як визначають його основні характеристики – індукцію B та напруженість H ?
2. У чому полягає різниця між абсолютною та відносною магнітною проникністю?
3. Опишіть правило лівої руки для визначення напрямку сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі.
4. Що таке намагнічування матеріалу і як визначається магнітна сприйнятливості k ?
5. Назвіть основні класи магнітних матеріалів і їхні характерні властивості (діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики).

6. Що таке магнітна анізотропія і як вона проявляється в монокристалах феромагнетиків?
7. Поясніть явища магнітострикції та Віллари-ефекту.
8. Що таке магнітне насичення і залишкова індукція B_r ?
9. Чим відрізняються магнітом'які та магнітотверді матеріали і де вони застосовуються?
10. Як внутрішні напруження та деформації впливають на магнітні властивості металів?
11. Що таке петля гістерезису і які втрати енергії з нею пов'язані?
12. Поясніть, що таке вихрові струми (струми Фуко) і як вони впливають на втрати енергії у феромагнетиках.

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Магнетизм», звернувши увагу на:
 - основні характеристики магнітного поля (індукція B , напруженість H , магнітна проникність);
 - магнітні властивості матеріалів (діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, ферити);
 - явища магнітострикції та Віллари-ефекту;
 - вплив деформації, внутрішніх напружень і домішок на магнітні властивості металів;
 - втрати енергії у феромагнетиках (гістерезисні та вихрові струми).
2. Підготувати порівняльну таблицю основних магнітних матеріалів (залізо, нікель, кобальт, пермалой, ферити) із зазначенням:
 - магнітних властивостей (магнітна проникність, коерцитивна сила, намагнічування, залишкова індукція);
 - характеру магнітної поведінки (магнітом'які чи магнітотверді);
 - температурної стабільності (точка Кюрі, зміна проникності з температурою);
 - механічних властивостей, що впливають на магнітні характеристики (зернистість, внутрішні напруження, магнітострикція);
 - практичного застосування (трансформатори, електромагніти, постійні магніти, високочастотні пристрої).
3. Проаналізувати вплив зовнішньої деформації та внутрішніх напружень на магнітні властивості матеріалів і пояснити, як ці фактори використовуються при виготовленні магнітом'яких та магнітотвердих матеріалів.

ТЕМА 17. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з основними типами магнітних матеріалів, їх властивостями та застосуванням в електротехнічних галузях.

Анотація

Лекція присвячена вивченню магнітних матеріалів, їх основних властивостей та застосування в електротехнічних системах. Розглянуто три основні групи матеріалів: магнітом'які, магнітотверді та спеціалізовані. Описано фізичні та структурні характеристики, класифікацію, технології виготовлення та типові сфери використання для кожного виду матеріалу. Особлива увага приділена впливу складу і технології обробки на магнітні властивості, таким як магнітна проникність, коерцитивна сила, залишкова індукція та магнітна енергія. Лекція формує базові знання для подальшого використання магнітних матеріалів у трансформаторах, електромагнітах, датчиках, магнітних підсилювачах, постійних магнітах та високочастотних пристроях.

Keywords: magnetic materials, soft magnetic materials, hard magnetic materials, ferrites, permalloy, coercive force, residual induction, magnetic permeability, magnetostriction, permanent magnets, magnetic ferrites, specialized alloys.

План лекції

1. Магнітом'які матеріали;
2. Магнітотверді матеріали;
3. Матеріали спеціалізованого призначення.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

17.1. Магнітом'які матеріали

Магнітом'які матеріали – матеріали, що мають високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу і малі втрати на гістерезис. Використовуються як сердечники трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних приладах і в інших випадках, коли необхідно за найменших втрат енергії досягти найбільшої індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах використовують магнітом'які матеріали з великим електричним опором, зазвичай застосовуючи магнітопроводи, зібрані з окремих ізольованих тонких листів.

Залізо – технічно чисте залізо (армко-залізо) звичайно містить невелику кількість домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію й інших елементів (до 0,1%), які погіршують його магнітні, властивості. Через порівняно низький електричний опір використовується рідко, в основному для магнітопроводів постійного магнітного потоку.

Низьковуглецева електротехнічна листова сталь – містить до 0,04% вуглецю і до 0,6% інших домішок. Випускається у вигляді листів товщиною від 0,2 до 4 мм. Відносна магнітна проникність - не менше 3500-4500, коерцитивна сила - до 100 А/м.

Кремнієва електротехнічна сталь – найбільш вживаний магнітом'який матеріал. Введенням кремнію досягається підвищення питомого опору сталі, що дає зниження втрат на вихрові струми і гістерезис, збільшення магнітної проникності, зменшення коерцитивної сили. Кремній несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшуючи його крихкість і утруднюючи прокатку в листи. При вмісті кремнію понад 5% сталь стає дуже крихкою.

Листова електротехнічна сталь маркується буквою E (E11, E12, E13). Перша цифра вказує вміст кремнію у відсотках, друга – характеризує сталь за її електричними і магнітними властивостями.

Пермалой – залізо-нікелеві сплави. Характеризуються великим значенням початкової магнітної проникності в області слабких полів, що пов'язано з практичною відсутністю в них анізотропії і магнітострикції. Розрізняють високонікелеві і низьконікелеві пермалой. Високонікелеві пермалой містять 70-83% Ni, низьконікелеві – 40-50% Ni. Введення до складу пермалоя домішок Mo, Cr, Si, Mn підвищує його питомий опір. Домішка молібдену сприяє також зменшенню чутливості пермалоя до деформування.

Високонікелевий пермалой (79НМ, 80НХС) застосовується для виготовлення сердечників малогабаритних дроселів, слабкострумівих малогабаритних трансформаторів звукового діапазону й імпульсних трансформаторів, а також у магнітних підсилювачах.

Низьконікелевий пермалой (45Н, 50НХХ) має індукцію насичення майже вдвічі вищу, ніж високонікелевий, що дозволяє застосовувати низьконікелеві сплави в силових трансформаторах, дроселях і інших приладах, де потрібна висока концентрація магнітного потоку. Пермалой з прямокутною петлею гістерезису можуть використовуватися для сердечників магнітних підсилювачів, що переключають пристрої, випрямних установок і для елементів комп'ютерів.

Альсіфери – потрійні сплави заліза з кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсіфера: 9,5% Si, 5,6% Al, інше – Fe. Такий сплав відрізняється твердістю і крихкістю, тому виготовляється у вигляді фасонних виливок. Вироби з альсіфера: магнітні екрани, корпуси приладів і т.п. - виготовляються методами лиття з товщиною стінок не менш 2-3 мм через крихкість сплаву. Ця особливість обмежує застосування даного матеріалу. Завдяки крихкості альсіфера його можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих сердечників.

17.2. Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали розділяють на:

- 1) леговані сталі, що гартуються на мартенсит;
- 2) литі магнітотверді сплави;
- 3) магніти з порошків;
- 4) магнітотверді ферити.

Матеріали для постійних магнітів характеризуються за коерцитивною силою, залишковою індукцією і максимальною енергією, що розсіюється магнітом (магнітна

проникність матеріалів для постійних магнітів повинна бути мала, а коерцитивна сила велика).

Леговані сталі, що гартуються на мартенсит – ці сталі є найбільш доступним матеріалом для постійних магнітів. Вони легуються добавками вольфраму, хрому, молібдену, кобальту (ЕХ, ЕХ5К5). Коерцитивна сила досягає 14 кА/м. **Мартенсит** – пересичений твердий розчин вуглецю в залізі, має голчасту структуру й утворюється в результаті гартування легованої сталі.

Переваги постійних магнітів з легованої сталі – відносна дешевизна і можливість механічної обробки. В даний час витісняються постійними магнітами з інших матеріалів з більш високими магнітними властивостями.

Литі магнітотверді сплави – потрібні сплави Al-Ni-Fe (сплави альні). Мають відносно велику магнітну енергію. При додаванні кобальту або кремнію магнітні властивості сплавів підвищуються. Сплав альні з добавкою кремнію називають **альнісі**, а сплав альні з кобальтом – **альніко**. Сплав альніко з найбільшим вмістом кобальту (24%) одержав назву **магніко**.

Недоліком сплавів типу альні, альніко і магніко є труднощі виготовлення з них виробів точних розмірів внаслідок крихкості і твердості сплавів, що допускають обробку тільки шляхом шліфування. Сучасне маркірування сплавів системи Al-Ni-Fe поширюються на 11 складів. У марках сплавів прийняті наступні позначення: Ю – алюміній, Н – нікель, Д – мідь, К – кобальт, Т – титан, Б – ніобій, А – кристалічна текстура. Найбільше застосування мають сплави ЮНД4, ЮНДК24, ЮНДК15. Сплав ЮНД4 найбільш дешевий із усіх магнітотвердих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів. Сплав ЮНДК24 застосовують тоді, коли важливо одержати особливо високі магнітні властивості в одному напрямку, а сплав ЮНДК15 – у тому випадку, коли потрібні порівняно високі магнітні властивості без магнітної анізотропії. Сплави зі спрямованою кристалізацією ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА мають найбільший запас магнітної енергії, тому з них виготовляють малогабаритні магніти.

Магнітні властивості магнітотвердих матеріалів залежать від кристалографічної і магнітної текстур. У всіх магнітотвердих матеріалів найкращі магнітні властивості досягаються при значних спотвореннях кристалічних ґрат. Поліпшення магнітних властивостей магнітних сплавів обумовлені не тільки складом, але і спеціальною обробкою - охолодженням магнітів після виплавки в сильному магнітному полі. Якщо виплавлений магніт є анізотропним, то найкращі магнітні властивості він виявляє в тому напрямку, в якому при охолодженні на нього діяло магнітне поле.

Магніти з порошків виготовляються методами порошкової металургії. Розрізняють **металокерамічні магніти** і **магніти з зерен порошку**, скріплені зв'язуючою речовиною (металопластичні магніти). Виготовлення перших зводиться до пресування порошку, що складається з подрібнених тонкодисперсних магнітотвердих сплавів, і до подальшого його спікання при високих температурах за аналогією з процесами відпалу кераміки. Деталі при такій технології можна виготовляються досить точно і не вимагають подальшої обробки. Виготовлення других аналогічне пресуванню деталей із пластмас, але в порошок додається наповнювач з зерен подрібненого магнітотвердого сплаву.

Металокерамічні магніти (ММК1... ММК11) звичайно мають пористість 35%, а магнітна енергія і залишкова індукція в них на 10-20% нижче, ніж у литих магнітів з

відповідного сплаву, зате за механічною міцністю вони переважають литі магніти в 3-6 разів. Коерцитивна сила 24-128 кА/м.

Магнітні властивості металопластичних магнітів низькі. Коерцитивна сила нижча на 10-15%, залишкова індукція – на 35-50%, а магнітна енергія – на 4060% у порівнянні з литими магнітами. Зниження магнітних властивостей пояснюється великим вмістом (до 30%) немагнітної сполучної речовини. Металопластичні магніти мають високий електричний опір, що дозволяє застосовувати їх в апаратурі з наявністю перемінного магнітного поля підвищеної частоти.

Магнітотверді ферити – найбільш відомий барієвий ферит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (**фероксдюр**). На відміну від магнітом'яких феритів, він має не кубічну, а гексагональну кристалічну ґратку з одноосною анізотропією. Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марки БИ (барієві ізотропні) і марок БА (барієві анізотропні). Технологія виробництва БИ подібна технології магнітом'яких феритів, у технологічному процесі виробництва БА операція пресування ведеться в магнітному полі певної орієнтації напруженістю 650-800 кА/м.

Магніти з ферита барію мають коерцитивну силу до 240 кА/м, що перевищує коерцитивну силу магнітів системи альні (145 кА/м), однак за залишковою індукцією і магнітною енергією вони поступаються цим сплавам.

Барієві магніти доцільно виготовляти у вигляді шайб і тонких дисків, вони відрізняються високою стабільністю по відношенню до впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться тряски й ударів. Магніти з барієвого ферита можна використовувати при високих частотах. Недоліки барієвих магнітів – низька механічна міцність, значна крихкість, сильна залежність магнітних властивостей від температури. Крім того, вони виявляють необоротну зміну магнітних властивостей після охолодження від кімнатної до низької температури (-60°C) і нагрівання до початкової температури.

Матеріали для звукозапису. Для запису звуку використовують магнітотверді сталі і сплави, що дозволяють виготовляти з них дріт або льняні, а також целюлозні стрічки з покриттям з порошкоподібних феритів.

Вікалой відноситься до ковких магнітотвердих сплавів, з яких можна виготовляти стрічку і дріт. Склад вікалоя: 34% Fe; 52% Co; 14% V. Коерцитивна сила його 68 кА/м.

Як магнітний матеріал використовується магнітна стрічка з ацетилцелюлози з покриттям з магнетиту (оксид заліза Fe_3O_4).

17.3. Матеріали спеціалізованого призначення

Спеціальні магнітом'які феромагнетики – це матеріали з особливостями магнітних властивостей, обумовлених структурою і складом:

1. Сплави, що відрізняються незначною зміною магнітної проникності при зміні напруженості поля.

Пермінвар – потрібний сплав Fe-Ni-Co з вмістом цих компонентів відповідно 30, 45 і 25%. Пермінвар має невелику коерцитивну силу. Початкова магнітна проникність пермінвару дорівнює 300 в інтервалі напруженості поля до 250А/м при індукції 0,1 Тл. Однак магнітні властивості пермінвару чутливі до впливу температури і механічних напружень.

Більш стабільним є сплав **ізоперм**, до складу якого входять Fe, Ni і Al або Cu. Ізоперм має магнітну проникність 30-80, що мало змінюється в полях до напруженості кілька сотень А/м.

2. Сплави з різкою залежністю магнітної проникності від температури.

Термомагнітні сплави на основі: Ni-Cu, Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, Fe-Ni-Co. Ці сплави застосовуються для компенсації температурної погрішності в установках, зумовленої зміною індукції постійних магнітів або опору проводів у магнітоелектричних приладах у порівнянні з тим значенням, при якому виконувалось градування. Для одержання різкої температурної залежності магнітної проникності використовується властивість феромагнетиків знижувати індукцію з ростом температури поблизу точки Кюрі. Для зазначених феромагнетиків точка Кюрі лежить між 0 і 100°C в залежності від добавок легуючих елементів. Сплав Ni-Cu при вмісті 30% Cu може компенсувати погрішності в температурних межах від -20 до 80°C, при 40% Cu - від -50 до +10°C.

3. Сплави з високою магнітострикцією.

Це сплави Fe-Pt, Fe-Co і Fe-Al. Такі сплави знаходять застосування в якості сердечників генераторів акустичних коливань при звукових і ультразвукових частотах. Поздовжня магнітострикція цих сплавів має позитивний знак, а відносна деформація коливається в межах $(40-120) \cdot 10^{-6}$. Найчастіше в цій якості використовується чистий нікель, що має значну магнітострикцію.

4. Сплави з особливо високою індукцією насичення.

Залізо-кобальтові сплави – мають особливо високу індукцію насичення (до 2,4 Тл). Електричний опір таких сплавів невеликий. Сплави, що містять від

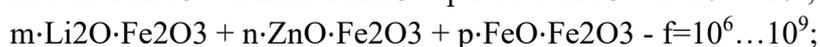
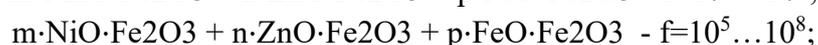
50 до 70% Co, називаються **пермендюрами**. Пермендюри можуть застосовуватися через їх високу вартість тільки в спеціальній апаратурі, зокрема в динамічних репродукторах, осцилографах, телефонних мембранах і т.п.

Феримагнетики (ферити) – це складні оксидні матеріали, що мають доменну структуру. Феримагнетики відрізняються від феромагнетиків меншою величиною індукції, мають більш складну температурну залежність індукції і підвищене або дуже високе значення питомого опору. Ферити тверді і крихкі матеріали, тому їх не можна різати, можна лише шліфувати і полірувати.

Ферити є магнітною керамікою з незначною електронною провідністю, внаслідок чого вони можуть бути віднесені до **електронних напівпровідників**. Велика величина питомого опору, що перевищує ρ заліза в 10^6-10^{11} разів, а отже, і відносно невеликі втрати енергії в діапазоні підвищених і високих частот і досить високі магнітні властивості забезпечують феритам широке застосування у високочастотних пристроях.

Ферити є системою з окислів заліза й окислів двовалентних, рідше одновалентних металів, що відповідають загальній формулі $MeO \cdot Fe_2O_3$, де Me символ двовалентного металу. Ферити мають кубічні кристалічні ґратки. Більшість з'єднань зазначеного типу, як і природний магнітний залізняк (магнетит) $FeO \cdot Fe_2O_3$, мають магнітні властивості.

Технічні ферити є твердими розчинами декількох найпростіших з'єднань, у тому числі і неферомагнітних. В даний час використовуються наступні групи змішаних феритів: марганець-цинковий, нікель-цинкові і літій цинковий:



де m , n , p - визначають кількісні співвідношення компонентів. Процентний склад компонентів впливає на магнітні властивості матеріалу.

Технологічний процес виробництва феритових виробів зводиться до того, що попередньо одержують феритний порошок, що складається з подрібнених і попередньо відпалених окислів відповідних металів. У порошок додають пластифікатор - звичайно розчин полівінілового спирту, і з отриманої маси пресують під великим тиском виробу необхідної форми. Виріб відпалюють при температурі 1100-1400°C. При цьому відбувається спікання порошку і утворення твердих розчинів феритів. Відпалювання проводять в окисному середовищі (звичайно в повітрі). Недолік технології полягає в тому, що усадка феритів при відпалюванні може досягати 20%.

Магнітом'які ферити – до таких відносять **марганець-цинковий, нікель-цинковий і літій-цинковий** ферити. Характеризуються вузькою петлею гістерезису, високою магнітною проникністю і малою коерцитивною силою. У феритах спостерігається явище магнітострикції. Ферити з низькою температурою Кюрі мають менший магнітострикційний ефект.

Найбільш розповсюджене маркірування магнітом'яких феритів: спочатку приводять значення початкової магнітної проникності, потім букви, що позначають частотний діапазон застосування, що обмежується зверху значенням граничної частоти. Під **граничною частотою** розуміють частоту, при якій починається швидкий ріст тангенса кута втрат ферита. Ферити для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот для стислості позначають буквою Н (низькочастотні, 2000НМ). Гранична частота їх для різних марок може лежати в межах від 0,1 до 50 МГц. У маркіруванні високочастотних феритів використовуються букви ВЧ, гранична частота – від 50 до 600 МГц (100ВЧ). Далі в маркіруванні йдуть букви, що позначають склад матеріалу: М марганець-цинковий, Н – нікель-цинковий і т.п.

Магнітна проникність нікель-цинкових феритів підвищується з ростом температури до точки Кюрі і потім різко падає. Чим вище значення початкової проникності, тим нижче точка Кюрі фериту. Ферити мають відносно велику діелектричну проникність, що залежить від частоти поля і складу феритів. З підвищенням частоти діелектрична проникність феритів падає. Тангенс кута втрат феритів – від 0,005 до 0,1.

Ферити з прямокутною формою петлі гістерезису (ППГ) – використовуються для запам'ятовуючих пристроїв обчислювальної техніки. Матеріали з ППГ повинні забезпечувати малий час перемагнічування, можливо велику температурну стабільність магнітних характеристик, а отже, мати високу точку Кюрі.

Магнітострикційні ферити – це матеріали з високим рівнем магнітострикції (ферит заліза, пермалой, кобальтовий ферит). Використовуються як високочастотні перетворювачі електромагнітної енергії в інші види енергії (механічну), а також як датчики тиску.

Магнітодіелектрики – характеризуються великим питомим опором і малими магнітними втратами, оскільки призначені для використання при підвищених частотах як сердечники котушок індуктивності, магнітопроводів (**магнітопровід** – елемент магнітного ланцюга, що служить для локалізації потоку магнітної індукції). Їхня магнітна проникність практично не залежить від зовнішнього магнітного поля. Магнітодіелектрики одержують шляхом пресування порошкоподібного феромагнетика з ізолюючим органічним або неорганічним зв'язуючим. Як основу застосовують карбонільне залізо, пермалой, альсифер та ін. Ізолюючим зв'язуючим служать фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло і т.п.

Від основи вимагається наявність високих магнітних властивостей, від зв'язуючого – здатність утворювати між зернами суцільну ізолюючу плівку.

Конструкційні чавуни і сталі – чавуни і сталі бувають магнітні і немагнітні. До перших відносяться сірий чавун, вуглецеві і леговані сталі; до других - немагнітний сталі і немагнітний чавун.

Сірий чавун містить 3,2-3,5% вуглецю, кремній, марганець, фосфор, сірку. Сірий чавун застосовується для виливків корпусів електричних машин, кріпильних деталей, плит і ін. Чавунні виливки особливо великих розмірів не вимагають подальшої термічної обробки.

Вуглецева сталь з підвищеними механічними властивостями з вмістом вуглецю від 0,08 до 0,2% (виріб відпалюють при 850-900°C) використовується для виготовлення відповідальних деталей електричних машин. Підвищення міцності досягається легуванням сталі нікелем, ванадієм, хромом, молібденом. Межа міцності легованих сталей 500-950 МПа.

Немагнітний чавун – застосовується в тих випадках, коли наявність магнітних властивостей у конструкційному матеріалі не потрібна. Широко застосовується немагнітний чавун, що містить у своєму складі нікель і марганець. Немагнітні чавуни добре механічно обробляються. При нагріванні до 400°C вони зберігають свої парамагнітні властивості. Великий електричний опір немагнітного чавуна знижує втрати на вихрові струми в порівнянні з кольоровими сплавами. Магнітна проникність немагнітного чавуну $\mu = 1,03$, питомий опір $\rho = 1,4$ мкОм·м. Межа міцності 250-350 МПа. Немагнітний чавун використовують при виготовленні кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, обійм силових трансформаторів, кожухів зварювальних трансформаторів і т.п.

Немагнітні сталі – виготовляють шляхом введення нікелю і марганцю, що сприяє зниженню температури переходу γ – заліза в α – залізо до 20°C і нижче. Приклад немагнітної сталі: нікелева сталь, що має склад: 0,25-0,35% C; 22-25% Ni; 2-3% Cr. Межа міцності такої сталі 700-800 МПа, магнітна проникність $\mu=1,05 - 1,2$.

Запитання для самоперевірки

1. На які три великі групи поділяють магнітні матеріали і чим вони відрізняються?
2. Наведіть приклади магнітом'яких матеріалів.
3. Наведіть приклади магнітотвердих матеріалів.
4. Що таке технічні ферити і як вони виготовляються?
5. Чим відрізняються магнітні матеріали особливого призначення?

Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Опрацювати додаткову літературу з теми «Магнітні матеріали», звернувши увагу на:
 - основні типи магнітних матеріалів: магнітом'які, магнітотверді та спеціалізовані матеріали;
 - фізичні та магнітні властивості матеріалів (магнітна проникність, коерцитивна сила, індукція насичення, магнітострикція);
 - вплив хімічного складу та домішок на властивості матеріалів;

- область застосування різних типів магнітних матеріалів в електротехніці.

2. Підготувати порівняльну таблицю основних магнітом'яких матеріалів (залізо, низьковуглецева електротехнічна сталь, кремнієва сталь, пермалої, альсіфери) із зазначенням:

- магнітних характеристик (початкова магнітна проникність, коерцитивна сила, втрати на гістерезис);

- механічних властивостей та технології виготовлення;

- практичного застосування (сердечники трансформаторів, дроселі, магнітні підсилювачі).

3. Підготувати порівняльну таблицю магнітотвердих матеріалів (леговані сталі, литі сплави, магніти з порошків, ферити) із зазначенням:

- магнітних характеристик (залишкова індукція, коерцитивна сила, магнітна енергія);

- технології виробництва та форми виготовлення;

- практичного застосування (постійні магніти, магнітні стрічки, малогабаритні магніти).

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«Електротехнічні матеріали» для підготовки до лекційних занять здобувачами за першим(бакалаврським) рівнем вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Конспекти лекцій повинні бути написані в одному лекційному зошиті з дисципліни «Електротехнічні матеріали».
2. Обсяг сторінок для лекційного зошиту слід обирати в діапазоні 60-90 сторінок.
Лекційний зошит повинний бути підписаний на титульному аркуші чи на початку – Назва дисципліни, П.І.П., курс, група студента.
3. Кількість лекцій та їх зміст повинні відповідати тематичному плану.
4. Кількість рукописних сторінок – 10-15, в залежності від стилю писання студента.
5. Конспект пишеться кожним студентом власноруч (одним коляром пасти) та вміщує: назву теми, план, текстове викладання теми, теми на самостійне опрацювання.
6. Після ознайомлення з текстовим змістом лекції, необхідно додатково опрацювати теми на самосійну підготовку.
7. У разі пропуску лекційного заняття, текстовий матеріал пропущеної теми необхідно записати або вклеїти в зошит.
8. Для перевірки конспекти надаються на кафедру відповідальним представником від групи, або в електронному вигляді (папка з фото сторінок конспекту у випадку дистанційного навчання) викладачу, який проводив практичні заняття у групі.
9. Конспекти перевіряються на проміжних атестаціях та заліковому тижні.
10. Всі конспекти лекцій повинні бути надані до підписання допуску до сесії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посібник. Львів : Магнолія, 2025. 241 с.
2. ДСТУ 2183-93. Картон електроізоляційний. Методи визначення електричної міцності і стійкості до впливу випробної напруги (ГОСТ 12268.2-93). Чинний від 1993-02-17. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1993. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93688.
3. ДСТУ 2267-93. Вироби електротехнічні. Терміни та визначення. Чинний від 1993-11-12. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1993. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60389.
4. ДСТУ ІЕС 60216-1:2015. Матеріали електроізоляційні. Характеристики нагрівостійкості. Частина 1. Методики проведення випробування на старіння й оцінювання результатів (ІЕС 60216-1:2001, IDT). Чинний від 2016-09-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
5. Електроматеріали. Пасивні елементи засобів радіозв'язку та захисту інформації : навч. посібник / С. В. Толюпа та ін. Київ : ДУТ, 2015. 193 с. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/1_1243_86357886.pdf.
5. Електротехнічні матеріали : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти / уклад. В. Мардзявко. Миколаїв : МНАУ, 2025. 205 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20759>
6. Електротехнічні матеріали : метод. реком. для виконання практ. робіт здобувачами за першим(бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти / уклад. : В. Мардзявко, Миколаїв : МНАУ, 2025. 45 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20761>
7. Електротехнічні матеріали. Частина 1. Діелектричні матеріали : курс лекцій / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. М. Кириленко, К. В. Кириленко. В. М. Головка. Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2021. 224 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8d0ebb78-3e8f-4e4a-98ef-dfb18ff2573d/content>.
8. Конструкційні матеріали і технології : навчальний посібник / Р. В. Будяк, Е. К. Посвятенко, Л. В. Швець, Г. А. Жученко. Вінниця : ФОП Т. П. Барановська, 2020. 240 с. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/25442.pdf>.

9. Основи слюсарної справи : навч. посібник / А. Ф. Попов, Т. В. Пахар, О. В. Паржницький, Г. Ю. Шулепіна. Чернівці : Букрек, 2020. 224 с. URL: <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidruchnyku-posibnyku-profsvita/slusarna-sprava-Popov.pdf>.

10. Паржницький О. В., Аушева С. В., Шулепіна Г. Ю. Електроматеріалознавство : навч. посібн. для здобувач. проф. освіти. Київ : Грамота, 2023. 224 с. URL: https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/posibnyku-prof-tech/Elektromaterialoznavstvo_27_01_2023_compressed.pdf.

11. ПУЕ Правила улаштування електроустановок. Київ, 2015. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758.

12. Stability of self-consistent states of flow in a short-circuited diode in a mode with a through passage of particles / V. Mardziavko та ін. *IEEE fifth international conference on information and telecommunication technologies and radio electronics*, м. Київ, 2 груд. 2021 р. Київ, 2021. С. 275–278. doi: 10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716695.

13. Трегуб М. І., Рубець А. М., Хахула В. С. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Біла Церква : БНАУ, 2020. 60 с.

14. Щерба А. А., Поворознюк Н. І. Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси. Вступ до спеціальності : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 497 с.

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Конспект лекцій

Укладач: **Мардзявко** Віталій Анатолійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 11.5.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідотство субекта видавничої справи ДК № 4490 від 09.06.2013 р.