

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

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Конспект лекцій

СУМИ – 2022

УДК 620.9

Укладач: асистент кафедри

«Енергетики та електротехнічних систем» Юрченко О. Ю.

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ. Конспект лекцій для студентів інженерно-технологічного факультету зі спеціальності: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2022. - 83 с.

У конспекті лекцій приведено теоретичні питання щодо здійснення процесу монтажу електрообладнання, з'єднання провідників, заходи з підключення занулення та заземлення, а також основних пристроїв для здійснення автоматизованих електричних процесів.

Рецензенти:

Герасименко В.О. – к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики.

Саржанов О.А. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортні технології.

Відповідальний за випуск: к.т.н., доцент, завідувач кафедри «Енергетики та ЕТС» - Чепіжний А.В.

Рекомендовано до видання методичною радою інженерно-технологічного факультету

протокол № 3 від 28 листопада 2022 року

© Сумський національний аграрний університет, 2022

ЗМІСТ

Лекція 1.....	5
Лекція 2.	11
Лекція 3.	19
Лекція 4.	22
Лекція 5.....	33
Лекція 6.....	35
Лекція 7.....	37
Лекція 8.....	42
Лекція 9.....	54
Лекція 10.....	57
Лекція 11.....	61
Лекція 12.....	72

Лекція 1

Тема 1: Загальні відомості про будову речовини та класифікація електротехнічних матеріалів План

1. Загальні відомості про будову речовини.
2. Види хімічних зв'язків.
3. Елементи зонної теорії твердого тіла.
4. Класифікація електротехнічних матеріалів.

1. Загальні відомості про будову речовини.

Сьогодні види виробництва енергії в різних країнах дуже суттєво відрізняються. В Україні, Франції і Бельгії відповідно 47,3, 76,4 і 56,6 % електроенергії виробляється на АЕС, а в більшості інших розвинутих країн цей показник лежить у межах 30-40 %, решта виробляється на ТЕЦ і ГЕС. Довготривала експлуатація електростанцій залежить від надійності конструкційних матеріалів та прогнозування довготривалої стійкості конструкційних елементів системи котел - [парова турбіна](#) - турбогенератор. Матеріал робочих елементів цієї системи в процесі експлуатації зазнає дії корозійних середовищ та високих механічних і теплових навантажень, які спричинюють пошкодження трубних елементів котлів і найбільшу кількість аварійних зупинок енергоблоків ТЕС і ТЕЦ. Пошкодження відбувається внаслідок деградації сталей і сплавів і зміни їх структури та механічних характеристик - жаротривкості, границі міцності σ_b , границі текучості $\sigma_{0,2}$ та інших. Вирішальний вплив на експлуатаційну стійкість конструкційних елементів мають процеси повзучості, корозії, корозійно-механічної втоми, корозійного розтріскування та водневого окрихчення.

На сьогодні чітко визначені марки сталей і сплавів для цільового призначення, відпрацьовані технології виготовлення конкретних деталей та вузлів енергетичного обладнання. Розробляються також нові і модифіковані конструкційні матеріали та вдосконалюються традиційні сталі і сплави, застосовуються нові способи поверхневого зміцнення елементів конструкцій. Всі ці заходи спрямовані на поліпшення довготривалості та надійності енергетичного обладнання.

Розвиток енергетики та електроніки супроводжується ростом одиничної потужності електроагрегатів і застосуванням новітніх якісніших електротехнічних та конструкційних матеріалів. Підвищуються робочі напруги електричних машин і апаратів, повітряних та кабельних ліній електропередач. Одночасно зростає питома потужність (потужність, віднесена до одиниці об'єму чи маси) машин, підвищуються робочі температури ізоляції. У деяких випадках електрична апаратура експлуатується за наднизьких температур (інколи близьких до абсолютного нуля - криогенних) і зростають вимоги до холодостійкості матеріалів. Часто електротехнічні матеріали працюють за підвищеної вологості навколишнього середовища, зазнають впливу хімічно активних середовищ, різних проникаючих випромінювань та інших чинників. Тому ці матеріали повинні мати не лише високі і стабільні в часі електричні (магнітні), але й фізико-хімічні та механічні властивості: нагрівостійкість, теплопровідність, радіаційну стійкість, еластичність, ударну в'язкість, низьку гігроскопічність тощо за доброї технологічності та невисокої собівартості. Їх раціональне застосування сприяє збільшенню коефіцієнта корисної дії електромашин та апаратів, підвищенню надійності, зменшенню їх ваги та розмірів, зниженню експлуатаційних затрат.

У виробництві електронного обладнання широко застосовується мікроелектроніка. Зменшуються розміри й маса електронної апаратури за одночасного покращання її надійності та довговічності. Розміри окремих функціональних елементів зменшуються до десятих часток мікрметра. Успішний розвиток мікроелектроніки забезпечується підвищенням якості існуючих та створенням і застосуванням нових матеріалів, виготовленням вузлів і цілих схем на основі нових технологій.

Всезростаючі енергетичні потреби людства, вимоги з точки зору екологічної безпеки спонукають до нових рішень та розв'язання інженерно-фізичних проблем, які виникають у процесі розробки заходів щодо підвищення надійності та ефективності використання діючих енергетичних об'єктів, зокрема атомних. Наприклад, досягнення у сфері керованого термоядерного синтезу привели до розробки енергетичних термоядерних реакторів (ТЯР) типу Токамак: ЕТРТ(Росія), UWMAK-1 і 2; PPPL, OPNL (США), JAERI (Японія), CULHAM (Великобританія), ITALY (Італія). Створюються нові реактори, проекти яких міжнародні, наприклад TFTR, IET, IT-60, T-15, ІНТОР, ІТЕР. Ефективність використання високотемпературних атомних, термоядерних та нетрадиційних джерел енергії можливе лише у випадку розширеного застосування найкращих відомих та нових конструкційних і електротехнічних матеріалів.

2. Види хімічних зв'язків.

Атомно-молекулярне вчення зародилось 25 століть назад у Стародавній Греції в дискусіях філософів при розв'язуванні логічних задач, зокрема про те, що відбудеться з каменем, якщо ного весь час подрібнювати. Більшість філософів вважала, що цей процес можна продовжити безмежно. Левкіпп (500-440 рр. до н. е.) і його школа стверджували, що при подрібненні виникає така маленька частинка, яку далі ділити неможливо, а матеріальний світ дискретний і складається з найдрібніших частинок і пустоти. Ці найменші частинки Демокріт (460-370 рр. до н.е.) назвав неподільними, тобто атомами, і наділив їх розміром, формою і здатністю рухатись:

"Як трагедія, чи комедія можуть бути написані одними і тими ж буквами, так і вся різноманітність, що твориться у світі, здійснюється атомами, які займають різне положення і виконують різні рухи". Худіння золотих рук статуй від дотику багатьох уст Демокріт пояснив втратою ними незримих частинок атомів, а чуттєві сприйняття (запахи) - потоками атомів, що відокремлюються від певних тіл. Послідовник Демокріта Епікур (342-270 рр. до п. е.) наділив атоми внутрішнім джерелом руху і здатністю взаємодіяти між собою.

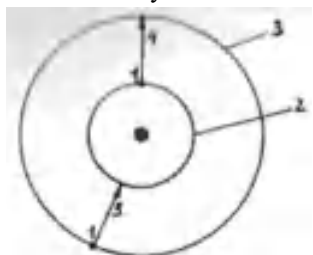
Геніальна догадка Левкіппа, Демократа й Епікура виглядає на диво сучасною, хоча на той час не була підтверджена експериментально і про неї забули (аж до XIX ст.). У 1808 р. Дальтон сформулював атомістичну теорію, згідно з якою всі речовини складаються з атомів, які не можна ні створити, ні знищити: атоми однієї речовини ідентичні і мають однакову масу.

3. Елементи зонної теорії твердого тіла.

Модель атома Резерфорда. У 1911 р. Резерфорд вперше експериментально встановив існування ядра в атомі, на основі чого запропонував планетарну його модель. Згідно з цією моделлю атом нагадує мініатюрну Сонячну систему і складається з невеликого позитивно зарядженого ядра, навколо якого по кругових або еліптичних орбітах рухаються на відносно великих відстанях Негативно заряджені частинки - електрони, подібно до того, як планети обертаються навколо Сонця. Ядра складаються з протонів і нейтронів, а електрони розміщені на декількох оболонках на різних відстанях від ядра. Число протонів відповідає порядковому числу елемента в періодичній таблиці і дорівнює числу електронів. Тому атом електронейтральний.

Модель Резерфорда не давала відповіді на питання: як може вічно існувати такий атом? Обертаючись навколо ядра, електрони повинні випромінювати енергію, втрачати швидкість і падати на ядро, чого не спостерігається. Не пояснювала модель, чому атомні спектри складаються з окремих ліній і чому атоми випромінюють або поглинають світло тільки певних частот тощо.

Атом Бора-Зоммерфельда. Для пояснення лінійчастого характеру спектрів датський фізик Бор у 1913 р. запропонував, опираючись на квантову теорію Планка, нову модель атома. Відповідно квантової теорії енергія може випромінюватись чи поглинатись тільки порціями (квантами). Енергія електрона, який рухається навколо ядра, має тільки певні значення, тобто енергія квантована і залежить, від радіуса орбіти. Чим більший радіус орбіти електрона, тим більша його енергія. Оскільки енергія електронів квантована, то квантовані й радіуси орбіт, тобто вони можуть мати тільки певні значення. Під час руху по одній з таких орбіт електрон не випромінює енергію. Для переміщення на більш віддалену від ядра орбіту (рис. 1.1) електрон повинен поглинути фотон (квант світлової енергії) для компенсації роботи з подолання сили притягання електрона ядром.



Згідно з квантовою теорією енергія фотона - кванта світла частоти ν дорівнює $h \cdot \nu$, де h - стала Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с). Для переходу електрона з орбіти з енергією E_1 на іншу орбіту з енергією E_2 , поглинуте світло повинно мати частоту ν , яка визначається рівнянням Планка

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1.$$

Рис. 1.1. Походження спектральних ліній: 1 - електрон; 2, 3 - орбіти з енергіями E_1 і E_2 ; 4 - поглинена енергія рівна $E_2 - E_1$; частота поглинутого світла $\nu = (E_2 - E_1)/h$; 5 - випромінена енергія рівна $E_2 - E_1$; частота випроміненого світла $\nu = (E_2 - E_1)/h$.

Сpektри поглинання виникають при переході електрона на більш віддалену від ядра орбіту з більшою енергією, а спектри випромінювання тоді, коли електрони, що перейшли раніше на орбіти з більшою енергією, "падають" зворотню на орбіти з меншою енергією. Бор приписав орбітам квантові числа. Найближча до ядра (рис. 1.3) орбіта К з найменшою енергією характеризується квантовим числом n , рівним 1. На цій орбіті знаходиться електрон атома водню в основному стані. Наступному рівню відповідає орбіта L з квантовим числом 2 і т.д. Якщо електрон отримає енергію, достатню для вивільнення від сил притягання ядра (рис. 1.2), то відбувається іонізація атома ($A \rightarrow A^+ + e$).

Широко застосовується позначення оболонок в міру віддалення від ядра відповідно літерами K, L, M, N, O, P, Q. Перші чотири оболонки атома схематично показані на рис. 1.3.

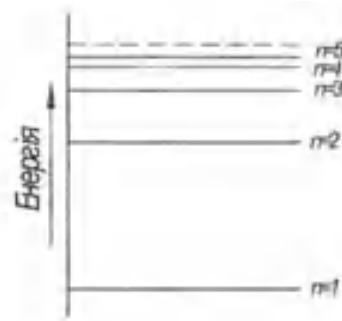


Рис. 1.2. Рівні енергії для деяких значень квантового числа n . Штрихова лінія відповідає рівню, на якому електрон має енергію достатню для того, щоб покинути атом: відбувається іонізація атома



Рис. 1.3. Перші електронні оболонки атомів

Найбільше число z електронів у даній оболонці дорівнює подвоєному квадрату номера цієї оболонки n , тобто головного квантового числа:

$$z = 2n^2.$$

Тому число електронів в першій оболонці дорівнює 2, у другій - 8, у третій - 18 і четвертій - 32. Більшого числа електронів в одній оболонці відомих атомів не буває. Зовнішня оболонка атома вміщає не більше 8 електронів.

Дослідження показали, що спектральні лінії, які відповідають Переходу електрона з одного рівня на інший, часто складаються з декількох близько розташованих окремих ліній, що вказує на різну енергію зв'язку окремих електронів даного енергетичного рівня. Отже, і в межах однієї оболонки електрони мають різні енергії, а значить розміщуються на одній і більше підоболонках, інакше - еліптичних орбітах, або підрівнях енергії. Для характеристики форми еліптичної орбіти (її ексцентриситету) Зоммерфельд ввів друге квантове число l , яке може приймати значення від $(n-1)$ до 0, де n - номер головного квантового числа. Якщо, наприклад, $n = 4$, то $l = 3, 2, 1$ і 0. Кожному значенню l співставляють літеру:

$$\begin{matrix} l = 0 & 1 & 2 & 3 \\ & s & p & d & f \end{matrix}$$

Якщо головне квантове число електрона $n = 2$, а друге квантове число $l = 0$, то вважають, що це 2s-електрон.

Хвильова теорія атома. Явище заломлення і дифракції світла відповідно до хвильової теорії пояснюється законами поширення хвиль. Для пояснення інших властивостей світла - лінійчастого виду атомних спектрів і фотоелектричного ефекту необхідно звертатись до корпускулярної теорії.

Така двоїста природа світла навела в 1924 р. де Бройля на думку, що частинкам притаманні деякі хвильові властивості. Він висунув припущення, що довжина хвилі λ для частинки з масою m , яка рухається із швидкістю v , визначається рівнянням

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

4. Класифікація електротехнічних матеріалів.

Геніальна дошка де Бройля підтверджена експериментально. Виявилось, що умови квантування Бора зводяться до вимог, щоб на кожній електронній орбіті розміщалося ціле число довжин хвиль де Бройля (рис. 1.4.).

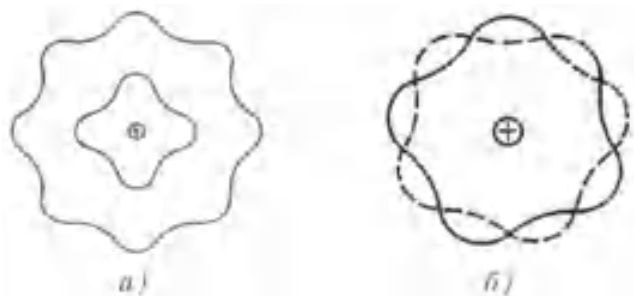
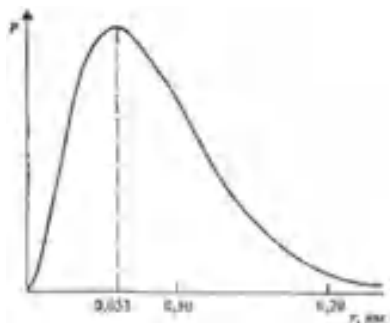


Рис. 1.4. Хвильова природа електрона: а - стоячі хвилі; при обертанні електрона навколо ядра положення максимумів і мінімумів хвиль збігається (рисунок дає двомірну картину тримірних хвиль); б - картина хвильового руху не відповідає розв'язку рівняння Шреодінгера; максимум при одному оберті електрона повністю гаситься мінімумом при наступному оберті.

Спочатку ідею де Бройля не сприймали серйозно: "Идеи диссертанта, конечно, вздорны, но развиты с таким изяществом и блеском, что я принял диссертацию к защите". Так оцінював ідею тоді ще диссертанта де Бройля його науковий керівник Поль Ланжевен. А через шість років диссертант отримав Нобелівську премію.

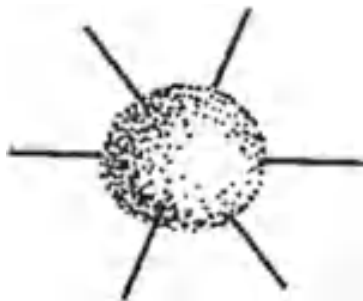
У моделі атома Бора-Зоммерфельда визначені швидкість електрона і орбіта. Щоб експериментально визначити положення електрона в просторі, необхідно використати світло з малою довжиною хвилі. Але при взаємодії з електроном такі фотони змінюють його швидкість. Уникнути цього можна, використавши світло з великою довжиною хвилі, але тоді неможливо визначити радіус орбіти електрона. Гейзенберг у 1927 р. сформулював принцип невизначеності - неможливо одночасно виміряти швидкість частинки та визначити її положення в просторі. Тому модель атома Бора-Зоммерфельда перестала задовольняти вчених.



Ці труднощі долаються розв'язанням 1924 р. хвильового рівняння Шредінгера, яке отримане за умови, коли електрон розглядається як хвиля і на орбіті, по якій рухається електрон, вкладається ціле число довжин хвиль (див. рис. 1.4).

Розв'язання хвильового рівняння дозволило визначити ймовірність знаходження електрона в даній малій області простору. На рис. 1.5 показана ймовірність виявлення електрона на відстані r від ядра атома водню в основному стані.

Рис. 1.5. Густина ймовірності для атома водню в основному стані (імовірність p того, що електрон знаходиться на відстані r від ядра)



Електрон може знаходитись ближче чи далі від ядра, ніж 0,053 нм, але ймовірність виявити електрон тоді різко зменшується.

У такій моделі електрон не обертається навколо ядра. Прийнято розглядати електрон як хмаринку, форма якої і є формою орбіталі. Орбіталь, яка відповідає найнижчому значенню енергії (при $l = 0$) названо $1s$ -орбіталлю. Вона може бути зображена у вигляді сфери з центром в ядрі атома (рис. 1.6).

Розміщення електронів на кожній наступній орбіталі можливе лише після заповнення попередньої. У випадку, коли наявні декілька орбіталей рівної енергії, то жодна з них не може бути заповнена електронною парою, до розміщення на інших хоча б по одному електрону.

Чотири квантові числа. Хвильове рівняння Шредінгера має обмежену кількість розв'язків, тому повна енергія атома може мати тільки деякі певні значення. Розв'язок хвильового рівняння отримується, коли орбіталі охарактеризовані чотирма квантовими числами. Перше квантове число n введене Бором, друге l – Зоммерфельдом. При розв'язанні хвильового рівняння вводиться третє квантове число, яке характеризує положення орбіти даною електрона в атомі. Його часто називають магнітним квантовим числом і позначають m_l . Це число може приймати значення будь-яких чисел від $+1$ до -1 , включаючи 0 . Тому для будь-якої підгрупи кількість можливих значень магнітного квантового числа m_l дорівнює $2l + 1$. Наприклад, при $l = 2$ воно може мати п'ять значень: $+2, +1, 0, -1, -2$.

Четверте квантове число називають спіновим квантовим числом m_s . Поряд з обертанням електрона навколо ядра, відбувається обертання електрона і навколо своєї осі, яке створює відповідне магнітне поле і надає електрону магнітний і механічний момент. Обертання електрона може відбуватися за годинниковою стрілкою або проти неї відносно орбіти електрона. Залежно від цього спін електрона може набувати значень $+1/2$ або $-1/2$.

Згідно з принципом виключення (принципом Паулі) жодні два електрони в атомі не можуть мати однакові набори усіх чотирьох квантових чисел. Це значить, що якщо будь-які два електрони в одному атомі мають одні й ті ж значення n, l і m_l , то вони повинні мати різні значення m_s , тобто їх спіни мають бути спрямовані в протилежні сторони.

Будова атома і періодична система елементів Д.І. Менделєєва

Однозначною ознакою хімічного елемента є заряд ядра, рівний числу протонів в ядрі і атомному номеру елемента в періодичній системі. Відносні атомні маси елементів – це усереднені значення атомних мас їх ізотопів.

В електронейтральних атомах загальне число електронів рівне числу протонів, тобто атомному номеру елемента Z . Електрони в атомах розміщені на різних оболонках (енергетичних рівнях), число яких визначається номером періоду. Поблизу ядра з даним Z розміщені найбільш міцно зв'язані з ним електрони з $n = 1$, потім електрони з $n = 2$, діюче поле притягання яких ядром послаблене відштовхуванням від електронного шару з $n = 1$, розміщеного ближче ядра.

При заданому n спочатку заповнюються підоболонки s -електронів ($l = 0$), потім p -електронів ($l = 1$), d -електронів ($l = 2$) і f -електронів ($l = 3$), оскільки в кожному шарі електрони зв'язані з Ядром тим сильніше, чим менше l . З точки зору просторового розміщення це означає, що спочатку заповнюються внутрішні шари й оболонки, потім зовнішні. В міру зростання Z електронні оболонки періодично утворюють аналогічні зовнішні електронні конфігурації. Однакові зовнішні конфігурації валентних електронів визначають аналогічні хімічні властивості елементів.

Періодичність хімічних, оптичних, електричних і магнітних властивостей атомів залежно від Z зумовлена подібністю будови зовнішніх електронних оболонок.

Число елементів в періоді визначається формулами:

- для непарних періодів $L_n = \frac{(n+1)^2}{2}$;

- для парних періодів $L_n = \frac{(n+2)^2}{2}$;

де L_n - число елементів в періоді;

n - номер періоду.

Згідно з наведеними формулами, у 1-му періоді вміщається 2, у 2-му і 3-му - по 8, у 4-му і 5-му - по 18, а в 6-му 32 і незавершеному 7-му періоді також повинно бути 32 елементів, тобто їх число у періодах дорівнює числу електронів на енергетичних рівнях.

Число перехідних елементів в усіх періодах рівне 10 і визначається різницею між максимальними числами електронів на M і енергетичних рівнях: $18 - 8 = 10$, тобто максимальному числу електронів на d -підрівні.

Число лантаноїдів і актиноїдів дорівнює різниці між максимальним числом електронів на N і M енергетичних рівнях: $32 - 18 = 14$, тобто рівне максимальному числу електронів на f -підрівні.

Періодичність розміщення елементів у періодичній системі зумовлена послідовним характером заповнення енергетичних рівнів, що наглядно видно при зростанні номера групи і номера періоду.

Початок забудови нових оболонок відбувається в атомах основної підгрупи першої групи періодичної системи ($\rightarrow$ водень, $\rightarrow$ літій, $\rightarrow$ натрій, $\rightarrow$ калій, $\rightarrow$ рубідій, $\rightarrow$ цезій і $\rightarrow$ францій). На зовнішній оболонці вказаних атомів знаходиться слабо зв'язаний з атомом один електрон. При переході до наступних елементів (основних елементів другої підгрупи: $\rightarrow$ берилію, $\rightarrow$ магнію, $\rightarrow$ кальцію, $\rightarrow$ стронцію, $\rightarrow$ барію і $\rightarrow$ урадію) на зовнішній оболонці з'являється ще один електрон, який суттєво стабілізує її і міцність зв'язку цих електронів з ядром зростає. Подальша добудова зовнішньої оболонки стабілізує її ще більше і стабілізація досягає максимуму в атомах інертних газів, які за винятком гелію, мають на зовнішній оболонці по вісім електронів. Стабілізація зумовлена збільшенням заряду ядра, яке викликає зростання сил притягання електронів до ядра. Так, при переході від літію до фтору (2-й період) заряд ядра збільшується від $Z = 3$ до $Z = 9$, у результаті радіуси атомів зменшуються (рис. 1.7).

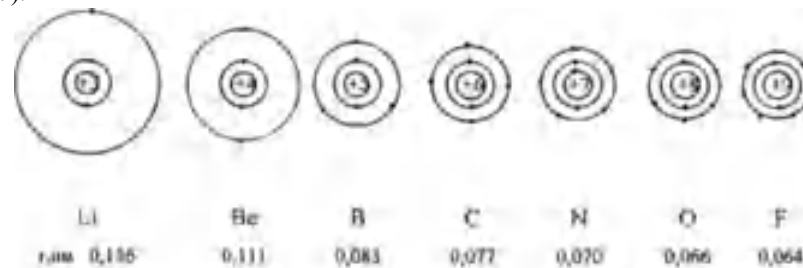


Рис. 1.7. Атомні радіуси елементів другого періоду періодичної таблиці Менделєєва

Тому здатність атомів віддавати електрони (типово металічні властивості) яскраво виражена в атомів літію і поступово зменшується при переході від літію до фтору, який є типовим неметалом, тобто елементом, атоми якого здатні приєднувати електрони. Здатність атомів віддавати чи приєднувати електрони характеризує їх валентність.

Валентність (від лат. *valentia* – сила) – це міра здатності атома хімічного елемента (або атомної групи) утворювати хімічні зв'язки з іншими атомами (або атомними групами).

Кількісно валентність визначається числом атомів водню, яке даний елемент може приєднувати або замінювати. За валентністю елементи поділяють на дві групи: всім металам і водню притаманна додатна валентність, тоді як іншим (неметалам) – від'ємна валентність. Елемент з додатною валентністю позначають знаком (+) справа зверху від його символу. Число знаків відповідає числу утворених елементом зв'язків, наприклад Na^+ , Ba^{++} , Al^{+++} , або Na^+ , Ba^{2+} , Al^{3+} . Елементи з від'ємною валентністю позначаються знаком (-), наприклад O^- або O^{2-} .

В усіх елементів першої групи періодичної системи, починаючи від літію, зовнішня, найбільш віддалена від ядра оболонка вміщує один електрон. Цей електрон притягується позитивно зарядженим ядром. Сила притягання залежить від заряду ядра, відстані від електрона до ядра (атомного радіуса) і відштовхування внутрішніми електронними оболонками. При переході від літію до натрію і далі заряд ядра зростає, але цей ефект нейтралізується збільшенням атомного радіуса і відштовхуванням внутрішніми оболонками. І хоча всі елементи цієї групи можуть відносно легко віддати свій зовнішній (валентний) електрон іншим атомам, ця тенденція на-ростає зі збільшенням атомного номера. Тому металічні властивості елементів в усіх групах періодичної таблиці у напрямі «верх-низ» зростають.

Елементи, які належать до однієї підгрупи, мають ідентичний характер розміщення електронів на зовнішніх електронних рівнях, а елементи, які належать до різних підгруп однієї і тієї ж групи, – тільки подібний. Цим пояснюються відмінності у властивостях елементів головної і допоміжної підгруп у групах.

Сучасна модель будови атома:

- У центрі знаходиться позитивно заряджене ядро, діаметр якого дорівнює близько 0,0001 діаметра всього атома. Весь додатний заряд і майже вся маса атома зосереджені в його ядрі (маса електрона рівна 1/1836 маси атома водню).

- Ядро атома складається з протонів і нейтронів (загальна назва нуклони). Число протонів у ядрі рівне порядковому номеру елемента. Атомні маси елементів є середнім значенням з масових чисел природних сумішей ізотопів.

- Навколо ядра по замкнутих орбітах обертаються електрони, які можна уявити як у вигляді хмаринки, так і окремих частинок. Число електронів рівне позитивному заряду ядра.

Маси і заряди фундаментальних частин наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Маси і заряди фундаментальних частинок

Частинка	Заряд, Кл	Відносний заряд	Маса, кг	Маса, $m_{\text{ат.од.}}$
Протон	$+1,6022 \cdot 10^{-19}$	+1	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	1,0073
Нейтрон	0	0	$1,6750 \cdot 10^{-27}$	1,0087
Електрон	$-1,6022 \cdot 10^{-19}$	-1	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	$5,4858 \cdot 10^{-4}$

Фізичні процеси в діелектриках і їх властивості.

План

1. Класифікація діелектриків.
2. Поляризація діелектриків.
3. Діелектрична проникність.
4. Електропровідність діелектриків.
5. Пробій діелектриків, основні поняття.

1. Класифікація діелектриків.

Матеріали, які використовуються в енергетичному обладнанні, електротехніці та електроніці, умовно поділяють на конструкційні, електротехнічні та спеціального призначення. До конструкційних належать у першу чергу залізобетонні сплави сталі, чавуни й деякі сплави на основі міді (латуні, бронзи) та алюмінію (дюралі і силуміні). Вони використовуються для виготовлення деталей машин, апаратів, механізмів, будівельних конструкцій тощо. Деякі конструкційні матеріали (латуні, бронзи та ін.) можуть застосовуватися як суто електротехнічні (провідникові) матеріали, а типові діелектрики (пластмаси, полімери) - для виготовлення конструкційних деталей (каркаси, котушки тощо).

Електротехнічними називають матеріали, які проявляють специфічні властивості при дії електричного або магнітного полів чи їх сукупності.

За властивостями, які проявляються в електричному полі, матеріали поділяють на провідникові, напівпровідникові та діелектричні, а за відношенням до магнітного поля – на сильномагнітні і слабомагнітні.

Провідниковими є матеріали з сильно вираженою електропровідністю. Умовно до провідникових зараховують матеріали з питомим електроопором ρ в межах від 10^{-8} до 10^{-4} Ом (рис. 2.1).

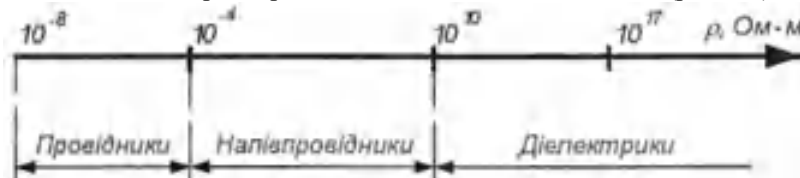


Рис. 2.1. Наближені діапазони питомих опорів провідників, напівпровідників та діелектриків

Напівпровідниковими називають матеріали з питомою провідністю 10^{-4} - 10^{+10} Ом. Вона сильно залежить від концентрації і виду домішок та зовнішніх енергетичних факторів (температури, освітленості та ін.).

Діелектриками називають матеріали, здатні до поляризації і в яких може існувати електростатичне поле. Питомий опір діелектриків 10^{10} - 10^{18} Ом.

Особливості будови твердих тіл.

2. Поляризація діелектриків.

Будь-яка речовина може перебувати в одному з трьох агрегатних станів: твердому, рідкому і газоподібному. Четвертим станом є плазма - сильно іонізований газ. Агрегатний стан характеризується відношенням середньої потенціальної енергії атомів E_n до середньої їх кінетичної енергії E_k :

- $E_n/E_k \gg 1$ - для твердих тіл;
- $E_n/E_k \approx 1$ - для рідин;
- $E_n/E_k \ll 1$ - для газів.

У газоподібному стані відстані між окремими молекулами речовини настільки великі, що молекули практично не притягуються одна до одної і, рухаючись хаотично, заповнюють весь можливий об'єм.

У твердих тілах і рідинах молекули розташовані компактно на міжмолекулярних відстанях і їх взаємне притягання набагато більше, ніж у газах, внаслідок чого тверді тіла і рідини мають сталий власний об'єм.

Кристали. У твердих тілах атоми здійснюють тільки невеликі теплові коливання біля своїх рівноважних положень і можуть створювати впорядковану періодичну просторову структуру. Таке регулярне розміщення атомів твердого тіла утворює кристалічну ґратку.

Тіла, які мають кристалічну ґратку, називаються твердими тілами.

Більшість природних і технічних твердих матеріалів є полікристалами, а окремі кристали названо монокристалами. Кристалічні тверді тіла плавляться за постійної температури. Кристалічну ґратку можна побудувати, вибравши для цього певний «будівельний» блок (цеглинку) - елементарну комірку (рис. 2.2), якщо її багаторазово зміщувати (транлювати) по трьох напрямках, подібно до побудови стіни з цеглинок.

Елементарна комірка - найменша частинка кристала, яка дає уявлення про всі характеристики його структури (будови).

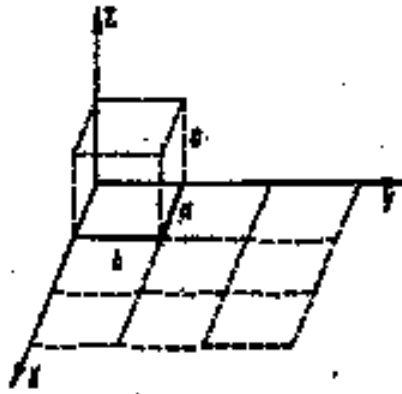


Рис. 2.2. Побудова просторової ґратки кристала шляхом трансляції
Алотропічні перетворення. Найбільш поширеними серед конст-рукційних і електротехнічних матеріалів є об'ємноцентрована, гранецентрована кубічна ґратки і гексагональна ґратка (рис. 2.3).
Низка матеріалів може існувати в станах з різними кристалічними ґратками.

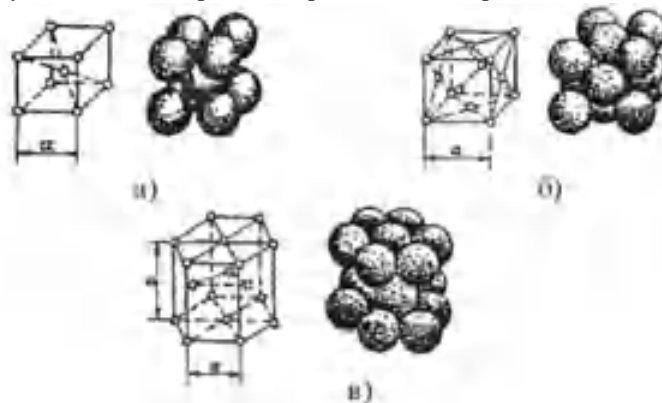


Рис. 2.3. Елементарні кристалічні ґратки: об'ємноцентрована кубічна (а); гранецентрована кубічна (б); гексагональна щільно укладена (в).

Існування матеріалу в декількох кристалічних формах називається алотропією, або поліморфізмом.

Алотропічна форма, яка існує при найбільш низькій температурі, позначається через α , наступна - через β і т.д.

Температура переходу з однієї модифікації в іншу називається температурою поліморфного (алотропічного) перетворення.

Так, залізо має дві температури поліморфного перетворення: 911 і 1392°C. За температур нижче 911°C залізо має об'ємноцентровану кубічну ґратку, а в діапазоні температур 911-1392°C гранецентровану кубічну ґратку.

3. Діелектрична проникність.

Алотропічні перетворення можуть кардинально змінити властивості матеріалу. Вуглець, наприклад, може існувати у вигляді алмазу (найтвердішого у природі матеріалу) і дуже м'якого графіту. Алмаз має тривимірну кристалічну структуру, яка характеризується тетраедричним розташуванням атомів вуглецю в ґратці (рис. 2.4, а). Кожний атом вуглецю зв'язаний з чотирма сусідніми атомами ковалентними зв'язками й утворює кристалічну структуру кубічного типу. Чистий алмаз є діелектриком. Графіт - типовий шаруватий кристал. У почергових плоских шарах атоми вуглецю зв'язані ковалентними силами і розташовані у вершинах шестикутників. Поміж шарами (рис. 2.4, б) діють сили Ван-дер-Ваальса, які значно слабші порівняно з ковалентними.

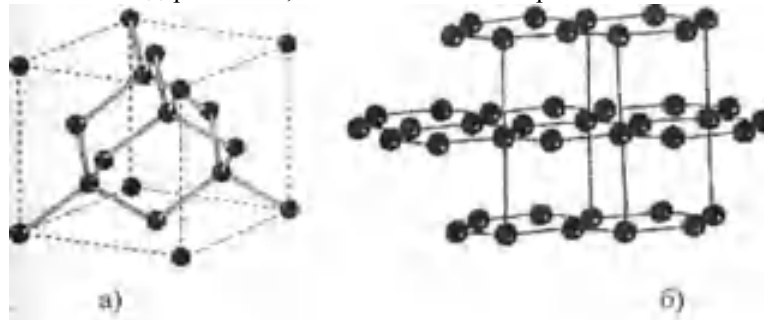


Рис. 2.4. Кристалічна структура алмазу (а) і графіту (б)

Цим зумовлена анізотропія графіту, коли в площинах шарів та в перпендикулярному напрямі фізичні та механічні властивості графіту суттєво відрізняються. Внаслідок слабкої міжшарової взаємодії шари графіту легко зміщуються та від'єднуються. Графіт має високу температуру плавлення (3850°C) і є добрим провідником електричного струму.

Анізотропія. Кристалічна ґратка складається з низки паралельних кристалографічних площин, розміщених

одна від одної на певних відстанях. В окремих атомних площинах може бути розміщена різна кількість атомів (рис. 2.5) внаслідок чого властивості кристала в різних напрямках неоднакові.

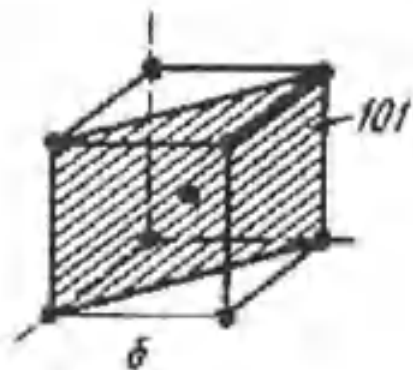


Рис. 2.5. Площини в гратці об'ємноцентрованого куба

Існують - точкові, - лінійні і - поверхневі структурні недосконалості кристалічної ґратки.

Точковими дефектами називаються такі недосконалості кристалічної ґратки, розміри яких близькі до розмірів атома. До точкових дефектів відносять вакансії (рис. 2.6, а), міжвузлові і домішкові атоми (рис. 2.6, б, в).

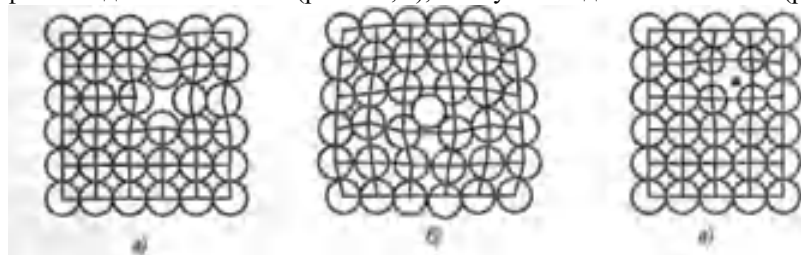


Рис. 2.6. Точкові дефекти в кристалічній ґратці: а) вакансія; б) міжвузловий атом; в) домішковий атом втілення.

Домішкові атоми можуть або заміщувати атоми основного металу (домішки заміщення, рис. 2.7, а), або втілюватися у вільні місця ґратки (домішки втілення, рис. 2.7, б).

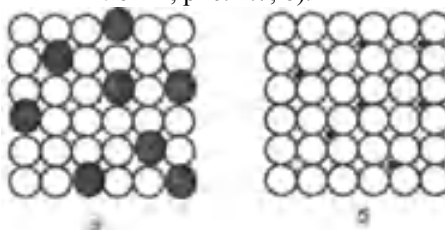


Рис. 2.7. Схема атомно-кристалічної структури твердого розчину: а – заміщення; б – втілення.

Точкові дефекти навіть за незначної копцентрації суттєво впливають на фізичні властивості кристалів. Наприклад, тисячні частки атомного відсотка деяких домішок можуть у 10^5 - 10^6 разів змінити питомий електроопір чистих напівпровідникових кристалів, хоча зміна їх механічних властивостей буде незначною.

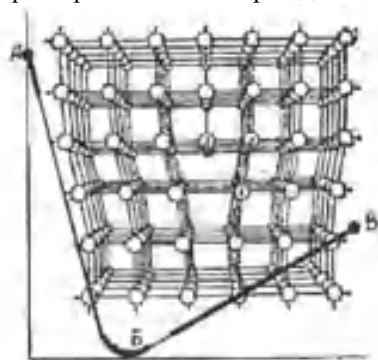


Рис. 2.8. Перспективне зображення розміщення атомів біля крайової дислокації. Крива АБВ відображає залежність міцності від кількості дислокацій.

Лінійні дефекти мають малі розміри у двох вимірах (їх поперечні розміри не перевищують декількох міжатомних відстаней), а їх довжина може досягати розмірів кристала. Ці недосконалості називаються *дислокаціями*. Розрізняють - крайову (лінійну) і - гвинтову дислокації. Крайову дислокацію можна уявити (рис. 2.8), як край 3 півплощини (екстраплощини). Цей край (ядро дислокації) складається з ланцюжка атомів, розміщених перпендикулярно до поверхні рисунка, легко зміщується під дією незначних напружень, прикладених перпендикулярно до ядра дислокації, вправо (вліво), і може утворювати зв'язки з ланцюжком атомів

1.

При цьому сусідня атомна площина стає напівплощиною й утворює дислокацію вздовж ланцюжка атомів 2, а екстраплощина 3 стає площиною (дислокація перемістилась на одну міжатомну відстань). Необхідно пам'ятати, що сама екстраплощина не переміщується.

Лінійні дефекти дуже суттєво впливають як на механічні, так і фізичні властивості матеріалів. Залежність міцності кристалів від густини дислокацій виражена кривою АБВ на рис. 2.8. Найвища міцність у бездефектного кристала (точка А, рис. 2.8), а найнижча за густини дислокацій 10^5 - 10^8 (точка Б, рис. 2.8). В останньому випадку вони під дією незначних напружень легко переміщуються в кристалі (міцність кристала мінімальна). Зростання густини дислокацій викликає їх взаємне гальмування, і міцність матеріалу зростає (точка В, рис. 2.8).

4. Електропровідність діелектриків.

Аморфні тіла. Енергія кристала за впорядкованого розміщення атомів менша, ніж за нерегулярного, тому кристалічний стан більшості твердих тіл - явище природне. Однак у процесі затвердіння матеріалу атоми не завжди мають можливість розміститись регулярно.

Тверді тіла, які характеризуються хаотичним розміщенням атомів (молекул), названі аморфними.

В аморфних тілах атоми коливаються навколо хаотично розміщених положень рівноваги і тому не утворюють кристалічну ґратку. Аморфні тіла - некристалічні і характеризуються ізотропністю властивостей за всіма напрямками.

До аморфних тіл належать: - природні (смола, бітум, опал, янтар та ін.) і - штучні (пластмаси, скло, желатина, плавлений кварц, бакеліт та ін.). Ізотропність аморфних тіл зумовлена хаотичним, не орієнтованим розміщенням у них атомів і молекул. Відмінність властивостей аморфних речовин від кристалів проявляється в плавному переході їх при нагріванні з твердого стану в рідкий, тобто при нагріванні аморфні тіла розм'якшуються поступово.

Аморфні тіла можна розглядати як переохолоджені рідини. Один і той же матеріал, наприклад кварц, може існувати в кристалічному або аморфному стані (рис. 2.9).

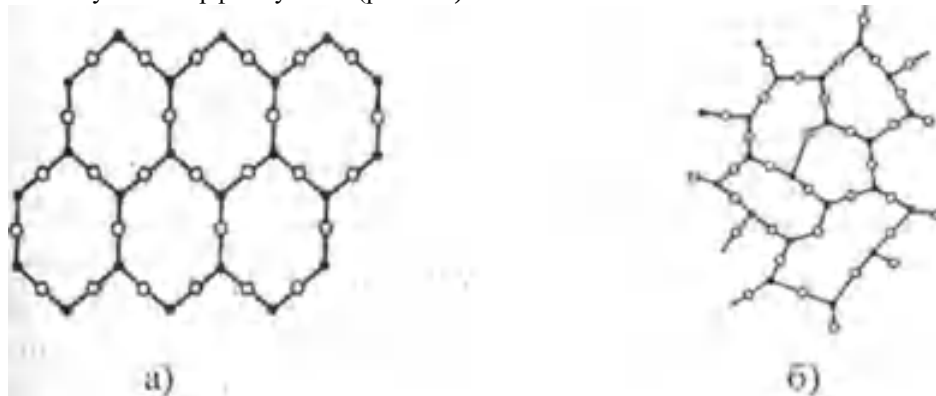


Рис. 2.9. Структури кристалічного кварцу (а) і аморфного кварцового скла (б)

Механічні властивості

Металічні матеріали. Для металів характерний металічний зв'язок і здатність до пластичної деформації. Неметали з іонним і ковалентними зв'язками руйнуються крихко (без деформації).

За навантаження матеріалу його деформація може бути пружною, коли під дією зовнішньої сили змінюється відстань між окремими атомами, а при знятті навантаження атоми повертаються на попередні місця і деформація зникає. Пластична деформація залишається після зняття навантаження. Переміщена частина кристала не повертається на старе місце. Пружній деформації відповідає пряма лінія ОА (рис. 2.10, а), а пластичний відрізок АВ. На ділянці ОА спостерігається пропорційність між видовженням і напруженням.

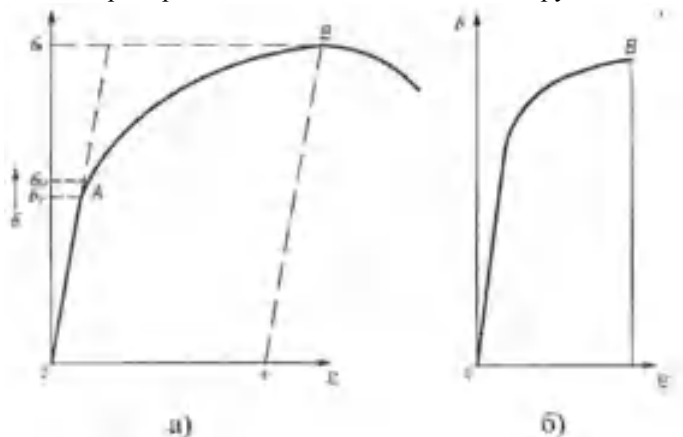


Рис. 2.10. Зміна деформації залежно від напруження: а - пластичного матеріалу; б - крихкого матеріалу

Мінімальне напруження, за якого починається плинність, тобто пластична деформація називається границею текучості σ_T . Мінімальне напруження, при якому пластична деформація досягає 0,2 %, називається умовною

границю текучості $\sigma_{0,2}$.

Вище точки А напруження спричинює пружну і залишкову пластичну деформації. За максимального значення навантаження в точці В матеріал починає руйнуватися. Ця точка на кривій σ - ϵ називається границею міцності і позначається через σ_B . Деформація зосереджується у середині робочої частини зразка, у матеріалі зароджуються тріщини. Зразок видовжується, одночасно площа поперечного перерізу зменшується, навантаження падає і зразок руйнується.

Крихкі матеріали руйнуються без видимої пластичної деформації (точка В, рис. 2.10, б), а пластичні матеріали в процесі деформації зміцнюються.

Пластичність (здатність матеріалу отримувати перед руйнуванням залишкову деформацію) характеризується відносним видовженням δ і відносним звуженням ψ зразка при розриві:

$$\delta = \frac{l_k - l_o}{l_o} \cdot 100\%; \quad \psi = \frac{F_o - F_k}{F_o} \cdot 100\%$$

де l_o - початкова довжина робочої частини зразка, м;

l_k - кінцева довжина зразка після розриву, м;

F_o - початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка, m^2 ;

F_k - найменша кінцева площа поперечного перерізу зразка після розриву.

Твердість - опір поверхневого шару матеріалу деформації І за контактної взаємодії з індентором.

Як правило, індентор виготовляють з алмазу або із загартованої інструментальної сталі. У більшості випадків твердість (рис. 2.11) визначається твердомірами - ТШ - вдавллюванням у поверхню сталеві загартованої кульки (прес Брінелля), - ТК - алмазного конуса, або загартованої сталеві кульки (прилад Рок-велла) і - алмазної піраміди (прилад Віккерса).

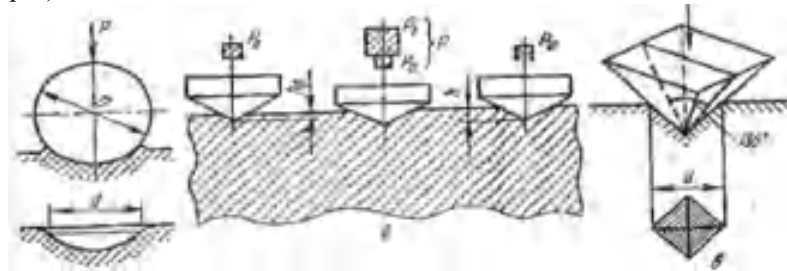


Рис. 2.11. Схеми випробування на твердість: а - за Брінеллем; б - за Роквеллом; в - за Віккерсом

Ударна в'язкість - здатність матеріалу поглинати роботу пластичної деформації.

Її визначають за ударних випробувань зразків з надрізом на маятниковому копрі (рис. 2.12). Ударну в'язкість σ_n , Дж/м² визначають за формулою $\sigma_n = A/F_0$, де A - робота, затрачена на руйнування зразка, F_0 - площа перерізу зразка в місці надрізу, м².

Стійкість до зношування - опір матеріалу зношуванню (зменшенню розмірів) при терті.

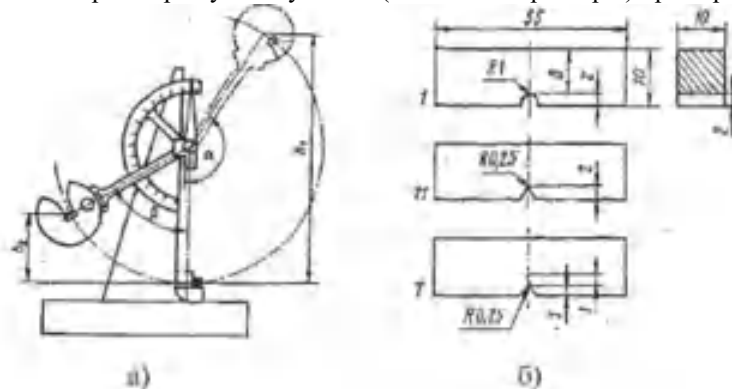


Рис. 2.12. Схема копра для дослідження на удар (а) і зразки (б).

Витривалість здатність матеріалу витримувати до руйнування повторнозмінні навантаження.

Найбільше напруження, за якого метал витримує задану кількість циклів навантаження (для сталей 107, для кольорових металів 108) не руйнуючись, називається границею витривалості (рис. 2.13).

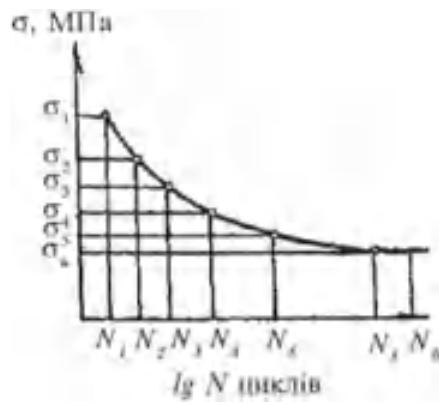


Рис. 2.13. Крива втоми в координатах σ - $\lg N$: σ - максимальне напруження циклу; N - число циклів напружень; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_5$ - максимальні напруження; $N_1, N_2, \dots, N_5$ - відповідні їм числа циклів, при яких були зруйновані зразки; σ_w - границя витривалості; N_6 - базове число.

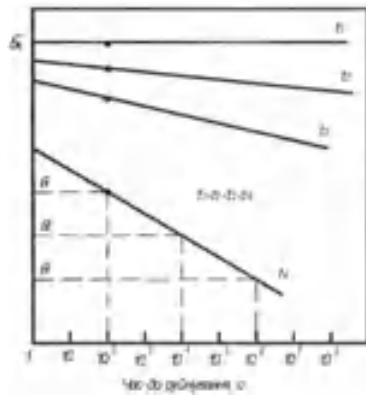


Рис. 2.14. Залежність міцності від температури і часу випробування

5. Пробій діелектриків, основні поняття.

Високотемпературна міцність. За підвищених температур міцність металу залежить від двох факторів - температури і часу (рис. 2.14). За низьких температур міцність металів практично не залежить від тривалості дії навантаження і при напруженнях нижче σ_v руйнування не відбувається. З підвищенням температури із збільшенням тривалості випробувань міцність зменшується і тим більше, чим вища температура. Так, за t_4 напруження σ_3 спричинює руйнування за 10^6 с, а при напруженні σ_1 - уже за 10^2 с, тобто в 10000 разів швидше.

За високих температур міцність матеріалів характеризується довготривалою міцністю, тобто границею міцності для даної температури за певний час дії напруження, яке зумовлює руйнування матеріалу. Довготривала міцність позначається σ з індексом, який показує тривалість дії навантаження в годинах. Наприклад σ_{100} - напруження, за якого метал руйнується протягом 100 год.

Границя повзучості σ - напруження, яке викликає задану швидкість деформації за даної температури.

Вуглецеві сталі - залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю до 2,14%. Їх поділяють на:

- сталі звичайної якості, в яких вміст сірки та фосфору не перевищує 0,04% кожного. Їх маркують Ст0, Ст1,...,Ст6;

- якісні сталі, з вмістом сірки та фосфору не більше 0,03% кожного. Маркуються числами, які вказують вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Наприклад, марка сталі 20 означає, що сталь якісна і містить 0,20% вуглецю.

- високоякісні сталі з вмістом сірки і фосфору не більше 0,020% кожного. Після числа, що вказує вміст вуглецю, ставиться літера А. Наприклад, 20А означає, що сталь містить 0,20% вуглецю і є високоякісна. В енергетиці застосовуються якісні і високоякісні маловуглецеві та леговані сталі.

Леговані сталі. Для покращання механічних, фізичних, хімічних і технологічних властивостей сталей в їх склад вводять легуючі елементи: нікель, хром, молібден, вольфрам та ін. Такі сталі називаються легованими. Леговані сталі маркуються числами і літерами, які вказують приблизний хімічний склад сталі. Легуючі елементи позначаються початковою літерою назви елемента: Н - нікель, Х - хром, М - молібден і т. д. Дев'ять наступних елементів позначається літерами: Г - марганець, С - кремній, Д - мідь, Р - бор, Б - ніобій, П - фосфор, Ф - ванадій, Ю - алюміній, Ч - рідкоземельні елементи. Перше число в марці вказує вміст вуглецю в сотих частках відсотка за масою (у високо-вуглецевих сталях - у десятих частках). Цифри після літер означають приблизний вміст даного легуючого елемента у відсотках. При вмісті елемента менше 1% цифра після літери не ставиться. Наприклад, сталь марки 08Х18Н12Т містить 0,08 % вуглецю, 18 % хрому, 12 % нікелю і до 0,1 % Ті.

Чавуни залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю 3-4,5 %. Залежно від того, в якому стані в чавуні перебуває вуглець, чавуни поділяються на білі (весь вуглець міститься у вигляді цементиту) і сірі (весь або частина вуглецю знаходиться у вигляді графіту). У свою чергу, сірі чавуни (СЧ) залежно від форми графітових виділень, поділяють на - високоміцні (ВЧ) і - ковкі (КЧ). У сірих чавунах графітові виділення мають форму пластинок, а у високоміцних та ковких чавунах - форму, близьку до кульки.

Конструкційні матеріали енергетичного обладнання

Для виготовлення енергетичного обладнання широко використовують переважно маловуглецеві леговані сталі, зокрема жароміцні і жаротривкі.

Жаротривкими (окалиностійкими) називаються сталі і сплави, стійкі проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах при температурах вище 550°C, які експлуатуються в ненавантаженому або слабонавантаженому стані.

Жаротривкість досягається легуванням сталей хромом, алюмінієм та кремнієм. У процесі окиснення на поверхні утворюються щільні оксиди Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 які гальмують подальше окиснення.

Жароміцними називають сталі і сплави з підвищеними механічними характеристиками за високих температур.

Для підвищення жароміцності сталі легують хромом, молібденом, ванадієм, вольфрамом тощо.

Лекція 3

Тверді органічні діелектрики

План

1. Класифікація органічних діелектриків.
2. Основні відомості про будову і властивості полімерів.
3. Природні смоли: каніфоль, шелак, янтар.
4. Лаки, емалі і клеї.

1. Класифікація органічних діелектриків.

Відомо, що електричний струм у речовині являє собою впорядковане переміщення електричних зарядів під впливом прикладеної електричної напруги. Необхідною умовою електропровідності є наявність у речовині вільних (здатних захоплюватися силами електричного поля) заряджених матеріальних частинок - носіїв заряду.

Нехай в одиниці об'єму даної речовини знаходиться n носіїв заряду, а заряд кожного з цих носіїв дорівнює q . Тоді сумарний вільний заряд одиниці об'єму дорівнює добутку nq . За відсутності електричного поля ці носії внаслідок теплових коливань хаотично рухаються зі швидкостями v_m і не створюють струму. Якщо ж у цьому об'ємі діє зовнішнє електричне поле з напруженістю E перпендикулярно до однієї з граней куба (рис. 3.1), то на кожний носій заряду діє сила, рівна

$$F = Eq,$$

і він отримує компонент швидкості v_e спрямований в напрямку поля в той чи інший бік залежно від знака заряду.

Добуток v_e на nq , рівний кількості електрики, яка проходить через одиницю поперечного перерізу речовини, є густиною струму J .

$$J = n \cdot q \cdot v_e \quad (3.1)$$

У звичайний вираз закону Ома $I = U/R$ для зображеного на рис. 3.1 тіла замість I підставляємо $J \cdot S$, замість $U - El$, замість $R - \rho \frac{l}{S}$ і після скорочення отримуємо:

$$J = E/\rho = E\gamma, \quad (3.2)$$

тобто найбільш загальну форму запису закону Ома. Прирівнявши праві частини (3.1) і (3.2), отримуємо:

$$\gamma = nqv_e/E, \quad (3.3)$$

де γ - питома об'ємна провідність.

Формула (3.2) є загальною для всіх видів електропровідності, і ому що при її виведенні не розглядалися конкретні носії заряду.

Відношення $u = v_e/E$, яке визначає швидкість носіїв заряду при напруженості поля, що дорівнює одиниці, називається рухомістю носіїв зарядів.

Вводячи в (3.3) величину u , отримуємо:

$$\gamma = nqu \quad (3.4)$$

2. Основні відомості про будову і властивості полімерів.
Електропровідність металів

У металах і їх сплавах є велика кількість вільних, тобто не зв'язаних з конкретними атомами, електронів. В кристалі об'ємом 1 см^3 міститься 10^{23} - 10^{22} атомів. Якщо прийняти, що атоми в металі іонізовані однократно, то концентрація вільних електронів рівна концентрації атомів. Ці вільні електрони та іони кристалічної ґратки перебувають у безперервному хаотичному русі. Іони тільки коливаються навколо своїх положень рівноваги, а вільні електрони можуть переміщатися у всьому об'ємі металу. Розміри електронів дуже малі порівняно з відстанями між іонами ґратки, а хаотичний рух подібний до руху молекул газу. Інколи їх називають «електронним газом».

Гіпотеза про електронний газ підтверджується експериментально, а саме:

- За тривалого протікання струму в колі, складеному з провідників різних металів, атоми одного металу не проникають в інші, тобто атоми металу не переміщуються разом зі струмом.

- За раптової зупинки провідника, який швидко рухався, вільні електрони за інерцією продовжують деякий час рухатись і на кінцях загальмованого провідника виникає різниця потенціалів.

Згідно з атомно-кінематичною теорією ідеальних газів кінетична енергія електронів лінійно зростає з температурою:

$$\frac{mv_m^2}{2} = \frac{3kT}{2} \quad (3.8)$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура. Підстановка v_m з (3.8) у (3.7) дає:

$$\gamma = \frac{ne^2 l}{2\sqrt{3mkT}}, \quad (3.9)$$

або

$$\rho = \frac{2\sqrt{3mkT}}{ne^2 l} \quad (3.10)$$

Температурна залежність питомого опору металічних провідників

3. Природні смоли: каніфоль, шелак, янтар.

Рух вільних електронів у металі можна розглядати як поширення плоских електронних хвиль, які в сірого періодичному потенціальному полі поширюються без розсіювання енергії. Тому в ідеальній кристалічній ґратці довжина вільного пробігу електрона дорівнює безмежності, а електроопір – нулю. Розсіювання електронів і електроопір з'являються за наявності в ґратці дефектів. Ефективне розсіювання хвиль відбувається, коли розмір дефектів перевищує четвертину довжини хвилі. У металах енергія електронів провідності перебуває в межах 3 - 15 еВ і їй відповідає довжина хвилі 0,3 - 0,7 нм. Тому будь-які мікронеоднорідності створюють перешкоди поширенню електронних хвиль і зумовлюють зростання питомого електроопору.

У чистих металах з бездефектною структурою довжина вільного пробігу електронів обмежується лише тепловими коливаннями атомів кристалічної ґратки. Тому з підвищенням температури, яке збільшує амплітуду теплових коливань атомів, зростає розсіювання електронів та відповідно питомий електроопір.

Типова крива зміни питомого опору металічного провідника від температури наведена на рис. 3.4.

В області I за температури $T_{нд}$ в ряді металів виникає надпровідність. У бездефектних чистих металах при наближенні до 0 К питомий електроопір також прямує до нуля (пунктирна лінія), а довжина вільного пробігу електрона прямує до безмежності. Близька до лінійної ділянка II простягається до температури плавлення $T_{пл}$, за якої для більшості металів спостерігається різке зростання питомого електроопору. Виняток становлять вісмут і галій, які мають складну кристалічну структуру і при їх плавленні питомий електроопір зменшується.

Відносне зменшення (збільшення) питомого опору за зміни температури на один градус називається температурним коефіцієнтом питомого опору:

Величина α_p є функцією температури і в області лінійної залежності $\rho(T)$ визначається згідно з рівнянням:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha_p(T - T_0)]$$

де ρ_0 і α_p – відповідно питомий опір і температурний коефіцієнт питомого опору, які відповідають початку температурного діапазону, тобто температурі T_0 ; ρ – питомий опір при температурі T .

4. Лаки, емалі і клеї.

Розсіювання електронних хвиль у металі зумовлюється тепловими коливаннями ґратки і дефектами структури.

Розсіювання на статичних дефектах не залежить від температури і при наближенні до абсолютного нуля опір реальних матеріалів прямує до певного сталого значення, названого залишковим опором.

Тому залежність електроопору від температури можна виразити рівнянням

$$\rho = \rho_t + \rho_{\text{зал}}$$

де ρ_t - питомий опір, зумовлений розсіюванням електронів провідності на теплових коливаннях ґратки; $\rho_{\text{зал}}$ - залишковий опір, викликаний наявними в металі хімічними домішками та фізичними дефектами структури (дислокаціями, вакансіями та ін.).

Вказана закономірність встановлена в 1864 р. Л. Маттісеном і називається правилом Маттісена. Згідно з цим правилом, залишковий опір фізично досконалого металу за дуже незначної концентрації дефектів і домішок не залежить від температури і зростає із збільшенням їх концентрації. За низької температури ($\approx 4\text{K}$) загальний опір технічно чистих металів визначається в основному залишковим опором.

Правило Маттісена задовільно виконується лише в області низьких і високих температур, за винятком деяких металів (Аі, Сі, Аg, Мg, Мо), в яких із зниженням температури до $T = T_{\text{мін}}$ опір зменшується і після досягнення мінімального значення починає зростати.

Мінімум опору зумовлюється незначною кількістю домішок заліза, марганцю та ін. у металі і спостерігається як в полікристалічних тілах, так і монокристалах. У дуже чистих металах мінімуму опору не виявлено.

За допомогою правила Маттісена проводять якісну оцінку сумарної кількості дефектів та домішок у металах за зміною їх електроопору із зниженням температури. Чим чистіший і досконаліший метал, тим сильніша ця зміна.

Тверді неорганічні діелектрики

План

1. Скло і його властивості.
2. Класифікація скла за технічним призначенням.
3. Склоемалі. Ситали. Кераміка.
4. Слюда і матеріали на її основі.

1. Скло і його властивості.

Надпровідність. У 1911 р. Х. Камерлінг-Оннес в Лейдені встановив, що за певного зниження температури електричний опір ртуті раптово зникає. Він застосував оригінальний метод - виготовив ртутне кільце, розмістив його між полюсами електромагніта, охолодив нижче 4,15 К і створив магнітне поле. За законом електромагнітної індукції Фарадея в кільці почав циркулювати електричний струм. Електрони проходили по металу без найменшого опору з його боку. Якщо б ртуть проявляла електроопір, то струм зник би за частки секунди. Протягом 2000 годин, а потім і кількох років не вдалось зафіксувати найменшого зменшення струму. Струм створив магнітне поле. Магнітний потік, що пронизував кільце, ще до того як був виключений електромагніт, також з часом не зменшувався.

Надпровідність виявлена у кількох десятків чистих металів і більше тисячі сплавів. На рис. 3.5 наведено залежність питомого опору ρ від температури двох надпровідних металів - свинцю і талію і, для порівняння, кадмію, який не переходить в надпровідний стан. У той же час найкращі провідники - мідь, золото і срібло - взагалі не переходять у надпровідний стан. Не стають надпровідниками магнітні (залізо, кобальт, нікель) і лужні (літій, натрій, калій та ін.) метали.

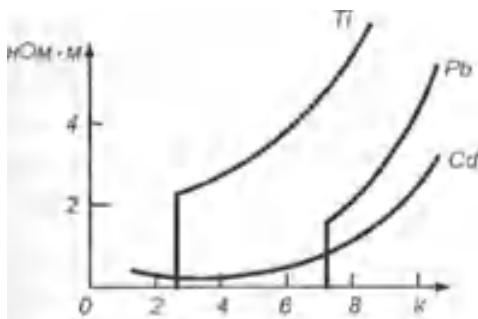


Рис. 4.5. Залежність питомого опору ρ талію, свинцю і кадмію від температури (в області наднизьких температур)

Ефект Мейснера. У надпровідниках спостерігаються явно виражені аномалії теплових, оптичних і особливо магнітних властивостей. У 1933 р. німецькі фізики В. Мейснер та Р. Оксенфельд виявили, що в надпровідному стані, тобто за $T < T_c$, матеріали стають ідеальними діамagnetиками і в них не проникає магнітне поле (рис. 4.6).

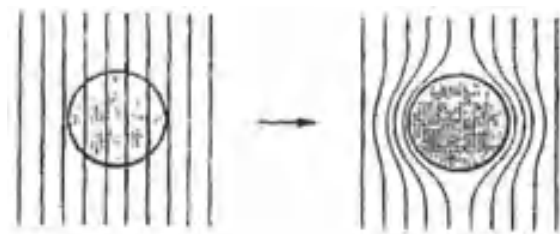


Рис. 4.6. Ілюстрація до ефекту Мейснера: у надпровіднику (праворуч) лінії магнітної індукції виштовхуються

Силкові лінії магнітного поля огинають надпровідник. Діамagnetик відштовхує магнітне поле незалежно від того, який полюс магніту наближати до нього. Це пояснюється тим, що в надпровіднику за дії слабкого магнітного поля ($H < H_c$) у приповерхневому шарі певної товщини виникають такі наведені кільцеві незгасаючі струми (їх часто називають екранувальними струмами), які компенсують зовнішнє прикладене поле. Глибина проникнення магнітного поля є в межах 10^{-7} - 10^{-8} м. Якщо розмістити над надпровідником магніт, то внаслідок магнітного відштовхування він зависає в повітрі (стан левітації). Дослід умовно названо «труною Магомета», яка походить з відомої легенди про те, що в Аравійській пустелі мусульмани бачили в печері труну з тілом пророка Магомета, яка висіла в повітрі без будь-якої опори.

2. Класифікація скла за технічним призначенням.

Стан надпровідності легко руйнується, якщо напруженість магнітного поля перевищить критичне значення $H_{кр}$. При переході матеріалу під дією магнітного поля з надпровідного стану до стану нормальної провідності, розрізняють надпровідники I і II роду. У надпровідників I роду цей перехід відбувається стрибкоподібно, а у надпровідників II роду - поступово (рис. 4.7). В інтервалі напружень $H_{нд1}$ - $H_{нд2}$ у матеріалі одночасно наявні нормальна і надпровідна фази, співвідношення об'ємів цих фаз залежить від H . Магнітне поле поступово проникає в надпровідник II роду.

Критична напруженість магнітного поля для надпровідників I роду становить 10^5 А/м, а для надпровідників II роду 10^7 А/м. Залежність надпровідного стану матеріалу від температури і напруженості магнітного поля показана на рис. 4.8. Область між графіком і осями координат (заштрихована) відповідає надпровідному стану, а незаштрихована область – нормальному стану.

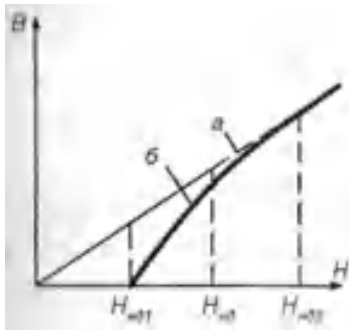


Рис. 4.7. Залежність зміни магнітної індукції в середині Надпровідника від напруженості зовнішнього магнітного поля: а - надпровідник I роду; б - надпровідник II роду.

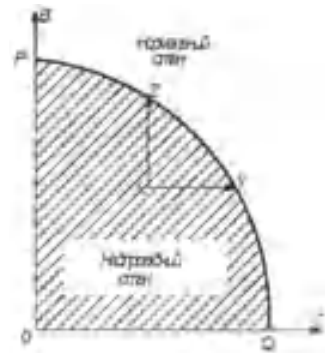


Рис. 4.8. Діаграма стану надпровідника (схематично)

Руйнування надпровідності, тобто перехід з надпровідного стану в нормальний, відбувається як при підвищенні температури (перехід з точки X у точку Y), так і за зростання магнітної індукції (перехід з точки X у точку Z).

Фізична природа надпровідності. В ансамблі квантових частинок з цілочисельним спіном (бозонів) за абсолютного нуля температури частинки займають один найнижчий за енергією дозволений рівень. Жодного обмеження на число бозе-частинок, які можуть розміститись на одному й тому ж енергетичному рівні, немає. Тому при $T = 0$ К усі воші сконденсовані на одному рівні.

Частинки з напівцілим спіном, тобто ферміони (до них належать електрони або дірки, що мають спін $\pm 1/2$), підпорядковуються принципу Паулі: на кожному з енергетичних рівнів можуть перебувати одночасно лише два електрони з протилежними спінами. Тому всі електрони, навіть за $T = 0$ К, не можуть зайняти один і той самий най-нижчий енергетичний рівень, а змушені поступово заселяти все вищі і вищі за шкалою енергетичні рівні, тобто заповнювати енергетичну зону. Тому з електронами чогось подібного до бозе-конденсації на найнижчому рівні при $T = 0$ К не відбувається і електронна рідина ніколи (навіть за $T = 0$ К) не може бути надплинною. Це багато років не давало змоги збагнути зв'язок поміж такими схожими явищами, як надплинність та надпровідність.

3. Скломалі. Ситали. Кераміка.

Явище надплинності дало початок досліджень у новій галузі - фізиці квантових рідин. Властивості надплинності притаманні лише частинкам з цілим спіном, тобто бозонам. Рідкий гелій складається з атомів ізотопу ^4He , які належать до бозонів. Це перша квантова рідина, вивчена фізиками.

Надплинність дозволила зрозуміти явище надпровідності і в 1957 р. сформулювати теорію надпровідності. Виглядало природно, що надпровідність зумовлена надплинністю електронів. Тільки в одному випадку (надплинність) без тертя "течуть" атоми, а в іншому (надпровідність) - без опору "течуть" електрони.

Але відомо, що властивість надплинності притаманна тільки частинкам з цілим спіном, а в електронів спін "напівцілий" і дорівнює $1/2$. Вихід знайшов американський теоретик Л. Купер, який у 1956 р. запропонував модель спарювання, коли носії зарядів можуть об'єднуватися в пари з нульовим спіном. Такі комплекси з двох електронів або двох дірок уже можуть створювати конденсат і викликати надпровідність.

За спарювання ефективними носіями струму є пари електронів або дірок. Тоді подвоєний заряд електрона відіграє роль одиничного заряду в надпровідності. При вимірюванні різних електричних властивостей нових надпровідників заряд $2e$ дійсно з'являється в усіх результатах. Магнітний потік через надпровідне кільце квантований і може дорівнювати лише цілому числу квантів магнітного потоку. Величина цього кванта

$$\phi_0 = hc/2e$$

де $2e$ - подвоєний заряд електрона, тобто заряд електронної пари.

Струм підлаштовується так, щоб потік магнітного поля був кратний ϕ_0 . Цей струм не затухає тільки тому, що усе величезне число електронних пар рухається як єдине ціле, в одному ритмі. Але як відбувається спарювання, яким чином один електрон впливає на інший, до кінця не з'ясовано. Запропоновано низку механізмів спарювання - фононний, екситонний та ін. Та який саме реалізується в досліджуваних матеріалах поки що не відомо. Можливо, спрацьовують поєднання різних механізмів. Розглянемо фононний механізм.

Мікроскопічна теорія надпровідності Бардіна-Купера-Шріффера (БКШ). Іони кристалічної ґратки за $T \neq 0\text{K}$ коливаються навколо положень рівноваги.

Кванти цих пружних коливань називаються фононами. Електрон-фононна взаємодія - це взаємодія електронів з динамічною (рухливою) ґраткою.

Завдячуючи електрон-фононній взаємодії, два електрони можуть утворювати куперівську пару із зарядом $2e$. Якщо n_s - концентрація надпровідних електронів, то концентрація куперівських пар буде $n_s/2$.

Система спарених електронів утворює єдиний квантовий стан, що охоплює весь надпровідник. За $T \ll T_c$ сила спарювання (притягання) з надлишком компенсує кулонівське відштовхування і утримує електрони в їх узгодженому русі. Надпровідні (спарені) електрони дрейфують когерентно (узгоджено) без витрат енергії. Згідно з теорією БКШ, в утворенні пар беруть участь не по два окремих електрони, а всі електрони металу.

Куперівські пари виникають лише тоді, коли електрони притягуються один до одного, що можливо в середовищі позитивно заряджених іонів ґратки, поле яких послаблює кулонівське відштовхування між електронами. Притягуватися можуть тільки електрони з протилежним спрямуванням імпульсу і спіну, розташовані поблизу рівня Фермі. Процес у спрощеному вигляді можна уявити наступним чином. Електрон, переміщуючись у регулярній ґратці кристала, притягує найближчі позитивно заряджені іони, створюючи миттєве збільшення концентрації позитивного заряду (рис. 4.9).

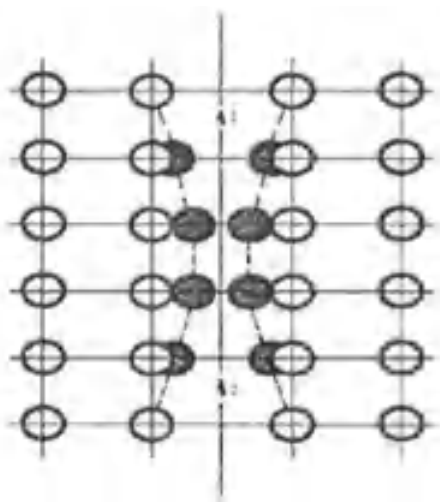


Рис. 4.9. Схема утворення електронних пар в надпровідному матеріалі

Другий електрон, що рухається за першим, притягується областю зі збільшеною концентрацією додатного заряду. У результаті ці обидва електрони через посередництво кристалічної ґратки взаємно притягуються і утворюють куперівські пари. Щоб другий електрон ("партнер") притягувався іонним згущенням, перший повинен віддалитися настільки, щоб кулонівське відштовхування було менше, ніж притягання. Отже, притягуватися і рухатися синхронно будуть електрони лише на значних відстанях за рахунок взаємодії з фононами. Кулонівське відштовхування на відстанях порядку 10^{-7}м - зменшується ще й тому, що між електронами - "партнерами" розміщена велика кількість позитивно заряджених іонів та інших електронів. Парні утворення електронів постійно розпадаються і знову створюються. Назагал всі пари утворюють електронний конденсат, енергія якого менша, ніж у сукупності роз'єднаних нормальних електронів.

Температура переходу матеріалу з надпровідного стану в нормальний визначається міцністю зв'язку між спареними електронами. Чим міцніші ці зв'язки, тим потрібна більша енергія (температура) для їх руйнування. Це значить, що надпровідність зберігатиметься при більш високих температурах.

Високотемпературна надпровідність (ВТНП). У 1986 р. науковці Цюриської (Швейцарія) філії американської транснаціональної компанії ІВМ Алекс Мюллер та Йоганнес Георг Беднорц виявили високотемпературну надпровідність у системі Ва-La-Cu-O за температур 30-35K. У цілому світі почався науковий штурм щодо досягнення надпровідності за азотної температури (77,4 K). Мети досяг фізик К. Чу, який на зразках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ зафіксував надпровідний стан за температури 92 K (рис. 4.10).

Після 1989 р. підвищення T_c вдалось досягти у матеріалах $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ та $Cu_{24}Pb_2Sr_2Ag_2O_{32}$ (рис. 4.11).

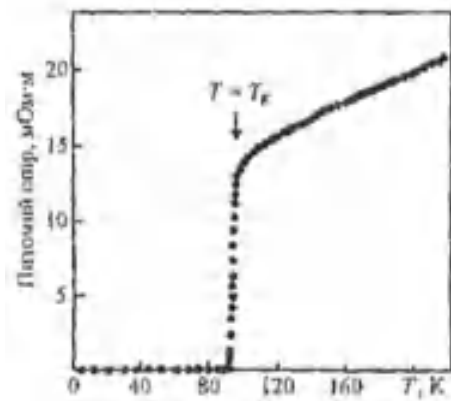


Рис. 4.10. Електроопір зразка $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ як функція температури

Результати К. Чу з метою Вчасного закріплення пріоритету були опубліковані на першій сторінці газети "Нью-Йорк Таймс" 31 грудня 1986 р. Про Важливість проблеми свідчить той факт, що у США в обговоренні задачі з ВТНП брали активну участь президент Рейган, бізнесмени, юристи, держанім діячі.

Вважається, що з усіх винаходів двадцятого століття високотемпературна надпровідність може мати найбільше практичне значення. У першу чергу вона дозволить в багато разів покращити використання енергії. Надпровідниками енергію можна буде передавати з одного місця в інше на будь-якій відстані без теплових втрат, які складають в середньому 20-40%. Застосування ВТНП може з надлишком компенсувати всю енергію АЕС та багатьох теплових електростанцій.

Використання ВТНП кардинально покращить накопичення і зберігання електроенергії. Циркулюючий у

надпровіднику струм можна вводити в мережу саме тоді, коли в цьому виникає необхідність, а на сьогодні процеси виробництва і використання електроенергії не можна достатньо рознести в часі. Застосування високотемпературних надпровідників у різних електричних машинах - двигунах, генераторах тощо зробить їх надкомпактними і потужними.

Струм, що тече в надпровідниковому кільці, створює сильне магнітне поле, а потужні магніти потрібні, наприклад, для утримання плазми в термоядерних установках типу "Токамак". Тепер для цього використовують цілі ріки рідкого гелію, на виробництво якого витрачається надзвичайно багато енергії.

Важливе застосування надпровідників в елементах мікроелектроніки. Вже розроблені надмініатюрні надпровідні перемикачі, "комірки" пам'яті, які охолоджуються в сотні раз дешевшим і більш доступним за гелій рідким азотом. Створені перші обчислювальні машини на "теплих" надпровідниках. На жаль, ще не усунені складні проблеми поєднання технологій виготовлення інтегральних схем з надпровідниками і напівпровідниками. Виникають проблеми з величиною струму, що може протікати через надпровідники. З них витісняється лише достатньо слабке магнітне поле, а сильне руйнує надпровідність, тобто надпровідний стан сам себе знищує. Ця проблема вирішується застосуванням надпровідних плівок, які пропускають без втрати надпровідності струми до 106 A/cm^2 , що дозволяє виготовляти перемикачі, магнетометри, трансформатори та інші пристрої, які працюють на рідкому азоті.

Уже сьогодні впроваджуються надпровідники, в структурі яких важливу роль відіграє кисень, а зміна вмісту кисню і впорядкування його іонів по певних вузлах кристалічної ґратки породжує або нищить надпровідність. Для запобігання проникнення чи витікання кисню розроблені відповідні технологічні засоби. Наприклад, багатожильні системи, в яких розміщено джерело атомів кисню, виготовляють із зовнішніми покриттями для запобігання його витіканню в навколишнє середовище.

Силова надпровідна електротехніка та кріоелектроніка. Розроблені до сьогоднішнього дня ВТНМ дуже крихітні. Виготовлення з них дроселів для котушок надпровідних електромагнітів, кабелів надпровідних ліній електропередач та ін. пов'язане з подоланням певних труднощів. Один з варіантів вирішення проблеми - надпровідник виготовляють у вигляді тонких дроселів, які поміщають у мідну оболонку. Роль цієї оболонки двояка: підведення холоду до надпровідного осердя та "перехоплення" струму за переходу надпровідника в нормальний стан. Такі композитні електротехнічні надпровідні вироби з критичним струмом $I_k = 10^5\text{-}10^6 \text{ A/cm}^2$ і критичним магнітним полем $10\text{-}10^2 \text{ Тл}$ використовують у потужних електротехнічних системах для термоядерних і магнітогідродинамічних генераторів, накопичувачів енергії, електромоторів та експериментальних ліній електропередач.

В Інституті монокристалів НАН України розроблена технологія виготовлення надпровідників нанесенням на них лакових ізоляційних покриттів при протягуванні дроселів.

Перспективними для практичного застосування є тонкі плівки ВТНП, які найчастіше отримують методами електропроменевого випаровування, лазерного розпилювання та ін. При цьому забезпечується кероване розпилювання окремих металів (Y, Ba, Si) на підкладку, на якій ці метали вступають в реакцію з киснем. Дуже важливим є раціональний вибір матеріалу підкладки, тому що параметри ґратки плівки і підкладки та температурні коефіцієнти розширення у них повинні бути близькі між собою.

4. Слюда і матеріали на її основі.

Надпровідні електромагніти. У надпровідних соленоїдах магнітні поля досягають 200000 ерстедів, а енерговитрати в них в 1000 разів менші, ніж у звичайних електромагнітах. Після зняття напруги струм, а значить і магнітне поле, не зникають і магніт працює практично без енерговитрат. Як напівпровідникові матеріали для промислових електромагнітів використовують жорсткі напівпровідникові сплави та інтерметаліди, що характеризуються високими критичними струмами і критичними полями. Зокрема, найтехнологічнішим вважається сплав на основі ніобію і титану з параметрами: $I_k = 10^5 \text{ A/cm}^2$ і $H_k = 105$ ерстедів. Надпровідні електромагніти застосовуються в установках керованого термоядерного синтезу "Токамак", МГД-перетворювачах теплової енергії в електричну, у потягах, що рухаються без тертя над рейками на магнітних подушках та ін. Магнітне поле, створене вмонтованими під долівкою вагона надпровідними електромагнітами, відштовхує їх від металевої колії спеціальної конструкції, в якій наводиться керована комп'ютером "струмова хвиля". Остання рухається перед вагоном і попід ним і забезпечує одночасно тягу та підвіс вагона.

В Японії на експериментальному полігоні в Яманаші на захід від Токіо у 2003 р. пройшло успішне випробування нового тривагонного надшвидкісного потяга. Його швидкість досягла 581 км/год, тобто швидкості кращих винищувачів часів Другої світової війни.

Матеріали високої провідності. До цих матеріалів належать провідники з питомим електричним опором у нормальних умовах не більше 0,1 мкОмм. Цемідь, срібло, алюміній, золото, вольфрам та ін. Найважливіші усереднені фізичні характеристики цих та інших металів наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Головні усереднені властивості металів при 20°C

Метал	Темпера- тура плав- лення, С	Густина Мг/м ³	Коефіцієнт теплопровід- ності, Вт/(м К)	Питомий опір, мк Ом чи	T°K питомого опору, 10 ⁴ , К ⁻¹
Ртуть Hg	-38,9	13,60	10	0,958	9
Цезій Cs	28,5	1,87	-	0,210	48
Галій Ga	29,7	5,91	-	0,560	-
Калій К	63,7	0,87	92	0,069	58
Натрій Na	97,8	0,97	125	0,046	50
Індій In	156,0	7,28	25	0,090	47
Літій Li	186,0	0,53	71	-	-
Олово Sn	232,0	7,31	65	0,120	41
Кадмій Cd	321,0	8,65	93	0,076	42
Свинець Pb	327,0	11,40	35	0,210	37
Цинк Zn	420,0	7,14	111	0,059	-
Магній Mg	651,0	1,74	167	0,045	42
Алюміній Al	657,0	2,70	209	0,028	42
Срібло Ag	961,0	10,50	415	0,016	40
Золото Au	1063,0	19,30	293	0,024	38
Мідь Cu	1083,0	8,94	390	0,017	43
Берилій Be	1284,0	1,85	167	0,040	60
Нікель Ni	1455,0	8,90	95	0,073	65
Кобальт Co	1492,0	8,71	79	0,062	60
Залізо Fe	1539,0	7,87	73	0,098	60
Паладій <i>Pd</i>	1554,0	12,10	72	0,110	-
Титан Ti	1725,0	4,50	15	0,480	33
Хром Cr	1850,0	7,10	-	0,210	-
Платина Pt	1770,0	21,40	71	0,105	-
Торій Th	1850,0	11,50	-	0,186	23
Цирконій Zr	1860,0	6,50	17	0,410	45
Іридій Ir	2410,0	22,50	-	-	-

Ніобій Nb	2500,0	8,57	50	0,140	30
Молибден Mo	2620,0	10,20	151	0,057	46
Тантал Ta	2996,0	16,70	54	0,135	38
Реній Re	3180,0	20,50	71	0,210	32
Вольфрам W	3410,0	19,30	168	0,055	46

Мідь - метал червонувато-оранжевого кольору (густина $8,9 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}} = 1083^\circ\text{C}$). Її отримують металургійною переробкою сульфідних мідних руд. Вміст міді в рудах не перевищує 12%. Тому руду попередньо збагачують до 20-40% міді. Збагачену руду плавлять у печах і отримують так звану чорну мідь, яка вміщує 97-98% міді. Для електротехнічних виробів застосовують мідь після її додаткового електролітичного очищення (рафінування).

Мідь має низку пінних властивостей, які забезпечують її широке використання як провідникового матеріалу, а саме:

- малий питомий опір;
- відносно високу механічну міцність;
- задовільну в більшості випадків стійкість до корозії;
- високу пластичність і здатність прокатуватись у листи, стрічки, протягуватись у дріт діаметром до тисячних часток міліметра;
- добру здатність до паяння і зварювання.

Питома провідність міді та її механічні характеристики дуже чутливі до наявності домішкових атомів (рис. 3.12). 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.

Вісмут і свинець майже не розчинні в міді і утворюють з нею легкоплавкі евтектики відповідно Cu-Bi з 99,8% Bi і Cu-Pb з 99,94 % Pb ($t_{\text{пл}}$ цих металів відповідно 270 і 327°C). Структура сплавів складається з раніше виділених кристалів міді, навколо яких розміщені оболонки вісмуту чи свинцю. Нагрів сплаву вище температури плавлення цих металів спричинює руйнування зв'язку між кристалами міді (червонолам-кість), що унеможливорює прокатування вказаних сплавів. Червоноламкість міді викликає також кисень. За низьких температур мідь окрихчується сіркою.

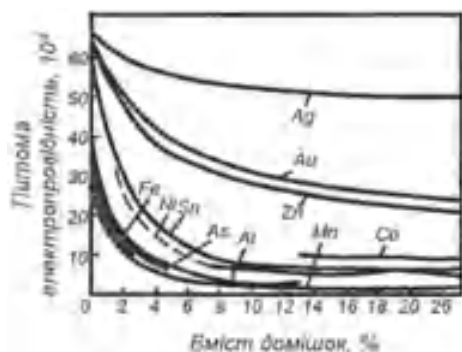
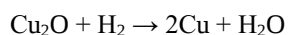


Рис. 4.12. Вплив домішок на електропровідність міді

Відпал міді в атмосфері водню зменшує в кілька разів її твердість. Проникаючи в глибину металу за підвищених температур водень вступає в реакцію з киснем, який знаходиться в технічній міді у вигляді закису Cu_2O за реакцією



Тиск утвореної водяної пари може досягати кількох тисяч атмосфер і ініціювати виникнення мікротріщин, які знижують вакуумну щільність міді і її окрихчують. Таке окрихчення названо "водневою хворобою". Для запобігання водневій хворобі вміст кисню в міді не повинен перевищувати 0,001%.

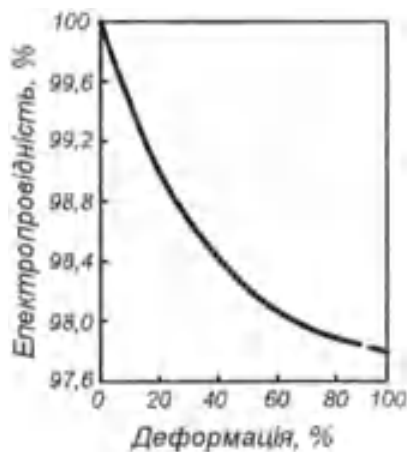


Рис. 4.13. Вплив наклепу (деформації) на електропровідність міді

Промисловість випускає провідникову мідь шести марок з різною кількістю домішок. У найбільш чистій міді (марка М 000) сума всіх домішок не перевищує 0,01%. Для виготовлення провідникових виробів застосовують мідь з вмістом домішок не більше як 0,1-0,5%. Це наступні марки: М0 (99,95% чистої міді), М1 (99,90%), М2 (99,70%), М3 (99,50%), М4 (99%). Мідний дріт виготовляють круглого (діаметром від 0,02 до 10 мм) і прямокутного перерізу (шини) з меншою стороною в межах 0,8 до 4мм, з більшою стороною - від 2 до 30мм.

Механічні властивості міді значною мірою визначаються технологією виробництва. За холодної протяжки отримують тверду (Марки МТ) мідь з великою міцністю (до 400 МПа), твердістю і малою пластичністю (видовження при розриві 1-2%). Якщо тверду мідь відпалити, то отримується м'яка мідь (марки ММ), яка має значно меншу міцність (до 200 МПа), але високу пластичність (видовження за розриву 30-40%).

Тверду мідь використовують за необхідності забезпечення високої механічної міцності, твердості і зносостійкості: для і контактних провідів, ножів рубильників, колекторів тощо. М'яку мідь застосовують у вигляді прямокутного і круглого дроту для струмоведучих жил кабелів і обмоткових провідів.

Алюміній - метал сріблясто-білого кольору, є другим за застосуванням після міді провідниковим матеріалом (густина 2,7 г/см³, $t_{пл} = 660^{\circ}\text{C}$). Його отримують електролізом глинозему Al_2O_3 в розплаві кріоліту Na_3AlF_6 . Питомий опір алюмінію в 1,6 раза більший, ніж у міді, але алюміній в 3,5 раза легший від неї. Тому провідник з алюмінію рівної електропровідності легший. Він характеризується високою пластичністю і малою міцністю. Відпалений алюміній високої чистоти має $\sigma_p = 58 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 20 \text{ МПа}$; Пердість 25 НВ, $\psi = 85 \%$, $\delta = 40\%$.

Алюміній кристалізується в гранцепетрований ґратці, не має алотропічних модифікацій. Він хімічно активний метал, але початкове окиснення спричинює утворення оксидної плівки товщиною до 10 нм, яка ізолює метал від навколишнього середовища і захищає його від подальшої корозії. Однак вона створює великий перехідний опір в місцях контакту алюмінієвих провідників і унеможлиблює паяння алюмінію звичайними методами. Тому з цією метою застосовують спеціальні пасти - припої, або ультразвукові паяльники.

Для створення надійної електричної ізоляції на поверхню алюмінію електрохімічною обробкою наносять оксидні плівки товщиною 0,03 - 0,04 мм. Недоліком оксидної ізоляції провідників є її низька гнучкість і значна гігроскопічність. З оксидованого алюмінію виготовляють різні котушки без додаткової ізоляції. Найбільш широко оксидна ізоляція використовується в електролітичних конденсаторах та в деяких типах випрямлювачів і розрядників.

Важливе практичне значення має захист від гальванічної корозії контактів алюмінію з міддю, якщо область контакту зазнає впливу вологи. Тому для захисту від зволоження місця з'єднання алюмінієвих і мідних провідників покривають лаками. Алюміній стійкий в органічних кислотах, а в неорганічних тільки за їх низької концентрації.

Найбільш чистий алюміній вміщає 99,999% Al і використовується переважно для наукових цілей. У промисловості в електротехніці використовують алюміній технічної чистоти АЕ з вмістом домішок не більше 0,5 %. Алюміній високої чистоти А97 застосовують для виготовлення фольги і корпусів електролітичних конденсаторів.

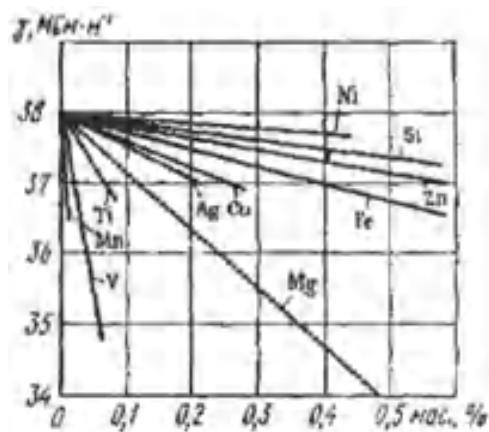


Рис. 4.14. Залежність питомої провідності відпаленого алюмінію від вмісту домішок

Домішки зменшують питому провідність цього металу (рис. 3.14). Найбільше зниження викликають домішки ванадію, титану і марганцю. Домішки, які не утворюють з алюмінієм твердих розчинів, мало впливають на його електропровідність.

Сплави високого опору - це провідникові матеріали з питомим опором в нормальних умовах не меншим 0,3 мкОм·м. Вони застосовуються для електровимірювальних приладів (шунти, компенсаційні, додаткові та зразкові опори), для реостатів і електронагрівальних елементів. В електровимірювальних приладах ці сплави повинні мати якнайменше значення температурного коефіцієнта електроопору та малу термоелектрорушійну силу відносно міді. Найбільш поширені сплави на мідній основі: манганін і константан та сплави на хромонікелевій основі і залізохромоалюмінієвій, які використовуються в електронагрівальних приладах та повинні довготривало працювати на повітрі за температур до 800-1100°C.

Манганін - сплав на мідній основі (86% Cu, 12% Mn, 2% Ni), жовтуватого відтінку, питомий опір 0,42-0,48 мкОм·м, максимальна робоча температура 100-200°C, добре витягується в тонкий дріт до діаметра 0,02 мм. З манганіну виготовляють також стрічку товщиною 0,01-1 мм і шириною 10-300 мм. Високий питомий опір манганіну слабо залежить від температури (в межах 15-35°C). Використовується для виготовлення еталонних опорів і елементів електровимірювальних приладів. До манганінів відносять також деякі сплави на основі срібла з добавками Mn (до 17%), Sn (до 7%) та інших елементів. Для отримання високої стабільності опору і малого α_c манганін відпалюють за 350-550°C у вакуумі з наступним повільним охолодженням і витримкою при кімнатній температурі.

Константан (від латинського constans - постійний, незмінний) – сплав міді і нікелю (60% Cu, 40% Ni), має високий питомий електричний опір, який мало залежить від температури. Значення α_p константану близьке до нуля і, звичайно, має від'ємний знак. Вміст нікелю в сплаві відповідає максимуму ρ і мінімуму α_p (рис. 3.15). Константан добре протягується в дріт і прокатується в стрічку.

Константан застосовується для виготовлення реостатів і електро-нагрівальних елементів з робочими температурами не вище 400-450°C. Для отримання на поверхні константану достатньо гнучкої і міцної електроізоляційної плівки константан швидко і короткочасово (не більше 3с) нагрівають до температури 900°C і охолоджують на повітрі. Покритий такою плівкою константановий дріт можна щільно намотувати, без додаткової ізоляції між німками, якщо напруга між сусідніми витками не перевищує 1В.

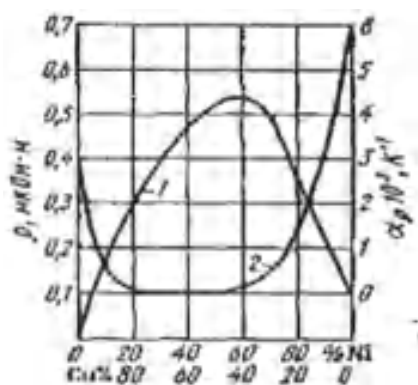


Рис. 4.15. Залежність питомого опору (1) і температурного коефіцієнта питомого опору (2) міднонікелевих сплавів від відсоткового вмісту компонентів

У місцях контакту константових провідників з мідними виникає термо-е.р.с, яка може викликати похибки при нульових вимірюваннях в мостових і потенціометричних схемах. Це є недоліком за використання константових резисторів у вимірювальних схемах. У той же час велике значення термо-е.р.с. дозволяє успішно використовувати константан для виготовлення мідь-константових термопар.

Хромонікелеві сплави (ніхром) та хромоалюмінієві сплави (фехраль) використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток і тощо. Їх склад та електротехнічні властивості наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Склад і властивості сплавів високого електроопору

Марка сплаву	Назва	Склад*			Питомий електроопір при 20°C, Ом мм ² /м	Темпер. коеф. електроопору (10 ⁻⁵), °K	Гранична температура °C
		Cr	Ni	Al			
X13Ю4	Фехраль	12-15	0,6	3,5-5,5	1,26	5	1000
1X17Ю5	Сплав №1	16-19	0,6	4,6-6,0	1,30	1	1000
1X25Ю5	Сплав №2	23-27	0,6	4,5-6,5	1,40	-	1150
X20Н80	Ніхром	20-23	75-80	0,2	1,11	1	1100
X15Н60	Ніхром	15-18	55-61	0,2	1,13	1,7	1050

* решта залізо

З них виготовляють дріт діаметром до 0,02мм, стрічку перерізом 0,1-1мм і більше. Згадані сплави стійкі проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах за температур 550°C і вище в навантаженому і слабонавантаженому станах. У результаті легування сталі хромом, алюмінієм чи кремнієм в процесі окиснення на поверхні сталі утворюються щільні оксиди Cr₂O₃, Al₂O₃, або SiO₂ дифузія крізь які утруднена. Тому тонка оксидна плівка гальмує процес подальшого окиснення. Чим вищий вміст легуючих елементів, тим вища окислостійкість сплаву і тим вищою може бути робоча температура.

Виникнення терморушійної сили. В області контакту двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, зумовлена різними рівнями в них енергії Фермі E_F. За контакту має місце більш інтенсивний перехід електронів з металу з більшим значенням рівня енергії Фермі у метал з нижчим рівнем. У результаті такого переходу перший метал заряджається позитивно, а другий - негативно. Між ними виникає різниця потенціалів, яка унеможливує подальший перехід електронів. Енергія Фермі в металах може сягати декількох електронвольт, тому й контактна різниця потенціалів між двома металами перебуває в межах від десятих часток до кількох вольт.

Сплави для термопар. Переважна більшість термопар виготовляється з д्रोцинок різних металічних сплавів. Якщо дві такі дротини зварити з одного кінця розмістити цей кінець (гарячий спай) в нагріту зону, температуру якої вимірюють (рис. 3.16), а два інші холодні кінці приєднати до чутливого вольтметра (гальванометра), то внаслідок різниці температур між нагрітим спаєм і холодними кінцями термопар виникає різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів фіксується гальванометром. Якщо термопару проградувати, тобто встановити точну залежність термо-е.р.с. від температури, то можна визначити температуру зони, в якій розміщений гарячий спай. Покази шкали гальванометра переводять в градуси.

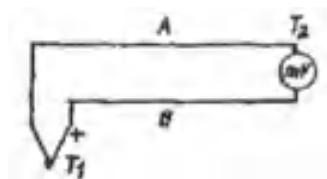


Рис. 4.16. Схема температури

Матеріали для термопар повинні бути жаротривкими і проявляти прямолінійну залежність електрорушійної сили від температури. Точність вимірювання температури підвищується із зростанням величини термо-е.р.с.

Для вимірювання температур найширше використовують наступні сплави: 1) копель (56% Cu і 44% Ni); 2) алюмель (95% Ni, решта – Al, Si і Mn); 3) хромель (90% Ni і 10% Cr) 4) платинородій (90% Pt і 10% Rh) і чисті метали мідь, платина і залізо. З них виготовляють термопари для вимірювальних термоапаратів: платинородій-платина до 1600°C; мідь-константан і мідь-копель до 350°C; залізо-константан, залізо-копель і хромель-копель до 600°C; хромель-алюмель до 1000°C.

Лекція 5

Тема: Рідкі і газоподібні діелектрики

План

1. Діелектрична проникність газів
2. Діелектрична проникність рідин
3. Електропровідності газів
4. Пробій у діелектриках
5. Пробій газу
6. Пробій рідких діелектриків

Газоподібні і рідкі діелектрики

Основні характеристики газів та рідин, як діелектриків, це діелектрична проникність, електропровідність, електрична міцність. Розглянемо ретельніше ці властивості.

Діелектрична проникність газів

Газоподібні речовини характеризуються досить малими щільностями внаслідок великих відстаней між молекулами. Тому діелектрична проникність всіх газів незначна і близька до одиниці. З табл. 1-1 видно, що діелектрична проникність газу тим вище, чим більше радіус молекули.

Зміна числа молекул в одиниці об'єму газу n_0 при зміні температури і тиску викликає зміну діелектричної проникності газу (табл. 1-2, 1-3). Число молекул N пропорційне тиску і обернено пропорційне абсолютній температурі.

Діелектрична проникність рідин

Рідкі діелектрики можуть бути побудовані з неполярних молекул або з полярних (дипольних). Значення діелектричної проникності неполярних рідин невеликі і близькі до значення квадрата показника заломлення світла.

Електропровідності газів

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

Зовнішніми факторами, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильне нагрівання газу). Електропровідність газу, обумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається несамостійною.

З іншого боку, особливо в розріджених газах, можливе створення електропровідності за рахунок іонів, що утворюються в результаті зіткнення заряджених частинок з молекулами газу. Ударна іонізація виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених частинок, яку отримують під дією електричного поля, досягає досить великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, носить назву самостійної.

У слабких полях ударна іонізація відсутня і самостійної електропровідності не існує. При іонізації газу, обумовленій зовнішніми факторами, відбувається розщеплення молекул на позитивні і негативні іони. Одночасно частина позитивних іонів, з'єднуючись з негативними частками, утворює нейтральні молекули. Цей процес називається рекомбінацією.

Наявність рекомбінації перешкоджає безмежного росту числа іонів у газі і пояснює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора

Припустимо, що іонізований газ знаходиться між двома плоскими паралельними електродами, до яких докладено електричну напругу. Іони під впливом напруги будуть переміщатися, і в ланцюзі виникає струм. Частина іонів буде нейтралізована на електродах, частина – рекомбінує.

Повітря можна розглядати як досить досконалий діелектрик до тих пір, поки не створяться умови для появи ударної іонізації. При виникненні ударної іонізації з'являється самостійна електропровідність.

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з будовою молекул рідини. В неполярних рідинах електропровідність залежить від наявності дисоційованих домішок, у тому числі води; в полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але іноді і дисоціацією молекул самої рідини. Струм в рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням щодо великих заряджених колоїдних частинок. Неможливість повного видалення здатних до дисоціації домішок з рідкого діелектрика ускладнює отримання електроізоляційних рідин з малими значеннями питомої провідності.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність у порівнянні з неполярними, причому зростання діелектричної проникності призводить до зростання провідності. Сильно полярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Очищення рідких діелектриків від домішок помітно підвищує їх питомий опір. При тривалому пропусканні електричного струму через неполярний рідкий діелектрик також можна спостерігати зростання опору за рахунок перенесення вільних іонів до електродів (електрична очищення). Питома провідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Зі збільшенням температури зростає рухливість іонів у зв'язку зі зменшенням в'язкості і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Обидва ці фактори підвищують провідність

Пробій у діелектриках

Діелектрик, перебуваючи в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище носить назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якому відбувається пробій діелектрика, називається пробивним напругою, а відповідне значення напруженості поля – електричної міцністю діелектрика. Пробій газу обумовлюється явищем ударної і фотонної іонізації. Пробій рідких діелектриків відбувається в результаті іонізаційних і теплових процесів. Одним з найголовніших чинників, що сприяють пробою рідин, є наявність в них сторонніх домішок

Пробій газу

Електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а привести її в збуджений стан. У наступний момент ця збуджена молекула віддає свою надлишкову енергію у формі випромінювання – випускає фотон. Фотон поглинається будь-якою іншою молекулою, яка при цьому може іонізуватися. Така внутрішня фотонна іонізація газу завдяки великій швидкості поширення випромінювання призводить до особливо швидкому розвитку в розрядному проміжку каналів з підвищеною провідністю газу.

Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються більш високою електричної міцністю, ніж гази в нормальних умовах. Гранично чисті рідини.

Активні діелектрики

У той час як до пасивних діелектриків ставляться вимоги збереження стабільності властивостей при різних зовнішніх впливах, до діелектриків, які виконують активні функції управління енергією або перетворення інформації, що надходить, пред'являються вимоги абсолютно протилежні. Чим сильніше змінюються властивості матеріалу при зовнішніх збурень, тим краще такий елемент виконує свої функції.

Діелектрики, властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх енергетичних впливів і використовувати ці дії для створення функціональних елементів електроніки, відносяться до групи активних діелектриків: сегнето-, пьезо- і піроелектрики; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями і ін.

Розглянемо активні діелектрики, що знайшли найбільш широке застосування.

Сегнетоелектрики - Речовини, що володіють спонтанною поляризацією,напрямок якої може бути змінено за допомогою зовнішнього електричного поля. Сегнетоелектрики мають ряд специфічних властивостей, які проявляються лише в певному діапазоні температур. температура T_k (Сегнетоелектричної точка Кюрі) є температурою фазового переходу, нижче цієї температури сегнетоелектрик володіє доменною структурою і характерними сегнетоелектричними властивостями; вище цієї температури відбувається розпад доменної структури і сегнетоелектрик переходить в параелектрической стан. Наслідком доменного будови сегнетоелектриків є нелінійна залежність їх електричної індукції від напруженості електричного поля (рис. 8.7), яка носить назву діелектричної петлі гістерезиса і різко виражена температурна залежність діелектричної проникності, в якій максимум діелектричної проникності досягається при температурі, яка відповідає точці Кюрі. На рис. 8.8 приведена залежність діелектричної проникності титаніту барію від температури при різній напруженості електричного поля.

В даний час відомо кілька сотень сегнетоелектриків. які за типом хімічного зв'язку і фізичним властивостям прийнято поділяти на дві групи: 1) іонні кристали, до яких відносяться титанат барію $BaTiO_3$, Титанат свинцю $PbTiO_3$, Ніобат калію $KNbO_3$, Барій -натрієвий ніобат $BaNb_5O_{15}$, Або скорочено БАНАН і ін .; 2) дипольні кристали, до яких відносяться сегнетова сіль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, трігліцинсульфата $(NH_2CH_2COOH)_3H_2SO_4$, Дигідрофосфат калію $KHPO_4$ та ін.

Всі з'єднання першої групи нерозчинні у воді, володіють значною механічною міцністю, легко виходять з керамічної технології. Дипольні з'єднання, навпаки, мають малу механічну міцність і розчинність в воді, завдяки чому можна виростити великі монокристали цих сполук з водних розчинів.

Сегнетоелектрики знаходять застосування: для виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю; для виготовлення матеріалів з великою нелінійністю поляризації для діелектричних підсилювачів, модуляторів та інших керованих пристроїв; в обчислювальній техніці - для елементів пам'яті; для модуляції і перетворення лазерного випромінювання; в пьезо- і піроелектричних перетворювачах. Серед конденсаторної сегнетокераміки можна виділити ряд матеріалів. Наприклад, Т-900, кристалічна фаза якого є твердий розчин титанатів стронцію $SrTiO_3$ і вісмуту $Bi_4Ti_3O_{12}$ з температурою Кюрі $T_k = 140^\circ C$. Цей матеріал має згладжену залежність діелектричної проникності від температури. Для виробництва малогабаритних конденсаторів на низькі напруги використовують також матеріал СМ-1. виготовлений на основі титанатабарія з добавкою оксидів цирконію і вісмуту. Для виготовлення конденсаторів, що працюють при кімнатній температурі, в тому числі і високовольтних, використовується матеріал Т-8000 (≈ 8000), що має кристалічну фазу на основі $BaTiO_3$, $BaZrO_3$. Точка Кюрі цього матеріалу знаходиться поблизу кімнатної температури.

Для виготовлення нелінійних конденсаторів застосовуються інші сегнетоелектрические матеріали, що володіють різко вираженими нелінійними властивостями сильною залежністю діелектричної проникності від напруженості електричного поля. Такі матеріали називаються варікондами. Варіконди призначені для управління параметрами електричних ланцюгів за рахунок зміни їх ємності. Сегнетоелектрики, петля гістерезису яких за формою близька до прямокутної, наприклад, такі, як трігліцинсульфата (ТГС), можна застосовувати в запам'ятовуючих пристроях ЕОМ.

Кристали деяких сегнетоелектриків і антисегнетоелектриків мають сильно виражений електрооптичний ефект (антисегнетоелектрики, як і сегнетоелектрики, також мають доменне будова, проте спонтанна поляризованість кожного домена у них дорівнює нулю, так як дипольні моменти всередині кожного домена зорієнтовані антипаралельно). Електрооптичний ефект полягає в зміні показника заломлення середовища, який викликаний зовнішнім постійним електричним полем. Він називається лінійним (ефект Поккельса), якщо показник заломлення змінюється пропорційно першого ступеня напруженості, і квадратичним, якщо

спостерігається квадратична залежність від напруженості поля (ефект Керра). Електрооптичні властивості сегнетоелектричних кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання, здійснюваного електричним полем, прикладеним до кристалу. Для електрооптичних модулаторів світла використовують кристали ніобата літію LiNbO_3 , Дигідрофосфата калію $\text{KH}_2\text{P}_2\text{O}_4$, Прозору сегнетокераміки системи ЦТСЛ, що представляє собою тверді розчини цирконата-титанату свинцю з оксидом лантану.

П'єзоелектрики - Діелектрики з сильно вираженим п'єзоелектричним ефектом. Прямим п'єзоелектричним ефектом називають явище поляризації діелектрика під дією механічної напруги. При зворотному п'єзоєфекті відбувається зміна розмірів діелектрика під дією прикладеного електричного поля. Хоча в даний час відомо більше тисячі речовин, що володіють п'єзоелектричними властивостями, в П'єзотехніці застосовується обмежена кількість матеріалів. Важливе місце серед них займає монокристалічний кварц, з якого вирізають пластини з потрібною для отримання високих характеристик кристаллографічної орієнтацією. Кварцові резонатори, що представляють собою поліровані кварцові пластинки з електродами і власником, мають дуже малий $\text{tg}\delta$ і високу механічну добротність (т. Е. Малі механічні втрати). Механічна добротність (величина, зворотна $\text{tg}\delta$) в кварцових резонаторах може досягати 106-107. Крім кварцу в різних п'єзопреобразователях використовують кристали сульфату літію, сегнетової солі, ніобата і танталата літію. Широко застосовується для виготовлення п'єзоперетворювачів п'єзоелектричний кераміка, яку виготовляють в основному з твердих розчинів цирконата-титанату свинцю $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (ЦТС). Перевага п'єзокераміки перед монокристалами - можливість виготовлення активних елементів складної форми і будь-якого розміру. П'єзокераміка застосовується для виготовлення малогабаритних мікрофонів, телефонів, детонаторів, датчиків тиску, деформацій, прискорень, вібрацій, п'єзореzonансних фільтрів, ліній затримки, п'єзотрансформатор і ін.

До активних діелектриків відносяться піроелектрики, т. Е. Діелектрики, що володіють піроелектричним ефектом. Піроелектричний ефект полягає в зміні спонтанної поляризованості діелектриків при зміні температури. До типових лінійних Піроелектриків відносяться турмалін і сульфід літію. Піроелектрики спонтанно поляризовані, але на відміну від сегнетоелектриків напрямок їх поляризації не може бути змінено зовнішнім електричним полем. При незмінній температурі спонтанна поляризованість піроелектрика скомпенсована вільними зарядами протилежного знака за рахунок процесів електропровідності і адсорбції заряджених частинок з навколишньої атмосфери. При зміні температури спонтанна поляризованість змінюється, що призводить до звільнення деякого заряду на поверхні піроелектрика, завдяки чому в замкнутому ланцюзі виникає електричний струм.

Піроефект використовується для створення теплових датчиків і приймачів променевої енергії, призначених, зокрема, для реєстрації інфрачервоного і СВЧ-випромінювання.

Значним піроефект володіють деякі сегнетоелектричні кристали, до числа яких відносяться ніобат барію і стронцію, трігліцинсульфат - ТГС, ніобат і танталат літію. Піроелектричний ефект проявляється також у поляризованій, т. Е. Підданій дії постійного електричного поля, сегнетокераміки, а також у деяких полімерів, наприклад у поляризованих полівинилденфториди і полівініліденхлориди.

К Електрети відносяться діелектрики, здатні тривалий час зберігати поляризоване стан і створювати в оточуючому просторі електричне поле. Залишкова поляризація в Електрети на відміну від піроелектриків і поляризованих сегнетоелектриків компенсована в повному обсязі, що призводить у них до відмінної від нуля зовнішньої напруженості поля, яка може бути дуже високою. Існують різні способи отримання Електрети. Так, термоелектрети отримують шляхом охолодження в сильному електричному полі розплаву полярних діелектриків; фотоелектрети виготовляють з матеріалів, що володіють фотоелектропровідністю - сірки, сульфіді кадмію - при одночасному впливі світла і електричного поля; короноелектрети отримують при зниженому тиску газу в коронному розряді і ін. Якщо заряд в Електрети створюється за рахунок різних релаксаційних механізмів поляризації, то такі заряди називають гетерозаряд. Ці заряди мають знак, протилежний знаку заряду електродів. Якщо заряди переходять на поверхню твердого діелектрика з поляризуючого електрода або повітряного зазору і мають той же знак, що і електроди, то такі заряди називають Гомозаряд.

Гомозаряд переважають у неорганічних (керамічних) матеріалів і органічних неполярних діелектриків, гетерозаряд - у органічних полярних діелектриків. Час життя Електрети може досягати в нормальних умовах декількох років, але швидко зменшується з підвищенням температури і вологості за рахунок звільнення і нейтралізації носіїв заряду, захоплених пастками.

Найбільше практичне застосування знаходять електрети з плівок поліетилентерефталату (лавсану), фтопласта-4, полікарбонату і ін. Електрети застосовуються для виготовлення мікрофонів, телефонів, дозиметрів радіації, вологості, електрометрів в електрофотографії і в багатьох інших випадках.

Фізичні процеси в провідниках і їх характеристики.

План

1. Загальні відомості про провідники.
2. Природа електропровідності металів.
3. Температурна залежність питомого опору металевих провідників.
4. Вплив домішок та інших структурних дефектів на питомий опір металів.

1. Загальні відомості про провідники.
Загальні положення. Велика група речовин за електричною провідністю займає проміжне місце між призначено добрим діелектриками як, наприклад, янтар (бурштин), кварц чи фарфор (порцеляна), та металевими провідниками (табл. 5.1). Цю групу речовин назвали напівпровідниками.

Таблиця 5.1

Питомий опір електротехнічних матеріалів різних класів за 20 °С і постійної напруги

Клас матеріалів	Ом м	Число порядків за значенням	Знак у широкому інтервалі температур	Тип електропровідності
Провідники	$10^{-8} - 10^{-4}$	4	додатний	електронна
Напівпровідники	$10^{-6} - 10^{+10}$	16	від'ємний	електронна іонна,
Діелектрики	$10^{+7} - 10^{+18}$	11	від'ємний	електронна

Проходження електричного струму через напівпровідники, як і метали, не спричинює в них хімічних змін. Це значить, що вільними носіями зарядів в обох випадках є електрони, а не іони. Однак суттєва кількісна відмінність між питомими провідностями вказує на існування глибоких якісних відмінностей в умовах проходження струму через метали і напівпровідники.

Різниця в провідності напівпровідників і металів за нормальних температур зумовлена величезною різницею в концентрації електронів провідності. В 1 м^3 металів знаходиться $10^{28} - 10^{29}$ вільних електронів, тобто на кожний атом металу припадає по од його вільному електрону, тоді як у напівпровідниках концентрація вільних електронів у сотні тисяч і навіть мільйони разів нижча.

За підвищення температури швидкість впорядкованого переміщення електронів провідності під дією поля як у металах, так і напівпровідниках зменшується. Тому в металах електропровідність із зростанням температури знижується. У напівпровідниках, незважаючи на подібне зниження швидкості впорядкованого переміщення електронів, провідність різко зростає. Це однозначно свідчить про те, що з підвищенням температури в напівпровідниках має місце надшвидке зростання числа вільних електронів, тоді як у металах кількість електронів провідності практично не залежить від температури.

За температур, близьких до абсолютного нуля, питомий опір провідників різко знижується, а провідність зростає і може переходити в надпровідність. У напівпровідниках спостерігається протилежна картина. Внаслідок різкого зменшення числа електронів провідності за наднизьких температур питомий опір напівпровідників близький до опору діелектриків. За високих температур кількість вільних електронів зростає настільки, що провідність напівпровідників співмірна з провідністю металів.

2. Природа електропровідності металів.

Механізм провідності напівпровідників. Напівпровідники з власною провідністю, або напівпровідники типу і. Розглянемо власну провідність ідеально чистого напівпровідника з ідеально впорядкованим розміщенням атомів у вузлах кристалічної ґратки на прикладі германію або кремнію - елементів IV групи періодичної системи елементів. Атоми у вузлах ґратки зв'язані між собою чотирма валентними електронами (рис. 4.1,а). Такий зв'язок називають ковалентним, або парноелектронним. За температури, близької до абсолютного нуля, усі валентні електрони беруть участь у створенні міжатомних зв'язків і заповнюють всі енергетичні рівні валентної зони, а в зоні провідності електрони відсутні (рис. 4.1,б). Зона провідності відмежована від валентної забороненою зоною $\Delta W = W_c - W_v$, де W_c - нижня межа зони провідності; W_v - верхня межа валентної зони.

Ширина забороненої зони ΔW для германію і кремнію дорівнює відповідно 0,72 і 1,12 еВ. Для переходу електрона з валентної зони в зону провідності необхідна додаткова енергія, яка дорівнює енергії забороненої зони або більша від неї.



Рис. 5.1. Кристалічні ґратки чистого германію (а), енергетична діаграма напівпровідника при $T_k = 0$ і відсутність вільних зарядів (б), поява носіїв вільних зарядів (електронів і дірок) при $T_k > 0$ (в).

Цю енергію електрон може отримати за нагрівання кристала напівпровідника, опромінення його світлом або з інших додаткових джерел енергії.

Чим температура вища за абсолютний нуль, тим більша частина валентних електронів переходить у зону провідності, звільняючи енергетичні рівні у валентній зоні. Вакантний енергетичний рівень у валентній зоні названо діркою провідності, яка поводить себе як додатний заряд, що дорівнює заряду електрона. Кількість дірок у валентній зоні дорівнює кількості вільних електронів у зоні провідності (див. рис. 4.1, в). Утворення пар електрон-дірка називають генерацією пар носіїв зарядів.

Електрони в зоні провідності і дірки у валентній зоні перебувають у хаотичному тепловому русі, і дірки можуть захоплювати електрони. Це призводить до зникнення пар електрон-дірка, тобто відбувається їх рекомбінація (див. рис. 4.1, в).

За температури, вищої від абсолютного нуля, коли в кристалі існує певна концентрація пар електрон-дірка, під дією зовнішнього електричного поля відбувається напрямлене переміщення електронів у зоні провідності проти напрямку поля і переміщення дірок у валентній зоні у напрямку поля. Таким чином, провідність кристала визначається переміщенням як електронів, так і дірок, тому густина струму

$$J = J_e + J_d$$

де J_e і J_d - відповідно густина електронного і діркового струмів.

У напівпровідниках з власною електричною провідністю кількість електронів N_e і N_d дірок однакова. Оскільки рухливості електронів дещо більша, ніж рухливість дірок, то електронний струм I_e трохи більший, ніж I_d . Рухливість визначається шляхом, який проходить електрон або дірка за одну секунду за напруженості $E = 1 \text{ В/см}$. Оскільки рухливість є відношення швидкості переміщення електрона V_e , чи дірки V_d , до напруженості електричного поля в напівпровіднику, то рухливість електрона $\mu_e = V_e/E$, а рухливість дірки $\mu_d = V_d/E$. Тоді електронний і дірковий струми визначаються за формулами:

$$I_e = N_e e V_e = N_e e \mu_e E;$$

$$I_d = N_d e V_d = N_d e \mu_d E.$$

де e - заряд електрона чи дірки, - напруженість електричного поля, N_e і N_d відповіло число електронів і дірок.

Сумарний струм у напівпровіднику:

$$I = I_e + I_d, \text{ або } I = N_e e \mu_e E + N_d e \mu_d E \quad (4.1)$$

При власній електропровідності напівпровідника число електронів і дірок однакове, тобто

$$N_e = N_d = N.$$

Тоді вираз (4.1) набуває такого вигляду:

$$I = N e (\mu_e + \mu_d) E \quad (4.2)$$

Необхідно підкреслити, що як електронна, так і діркова провідність зумовлені переміщенням лише електронів відповідно у зонах провідності і валентній. Рух електронів у валентній зоні створює враження, що в напрямку електричного поля переміщуються позитивно заряджені іони, чого насправді немає. Сказане наглядно можна

проілюструвати на ланцюжку атомів напівпровідника, в одному місці якого утворився позитивно заряджений іон (рис. 4.2) внаслідок переходу електрона з валентної в зону провідності. Під дією сил поля електрон послідовно переноситься від атома 2 до іона 1. Атом 2 стає при цьому позитивно зарядженим іоном і до нього переходить електрон від атома 3, який перетворюється в позитивно заряджений іон і т.д.

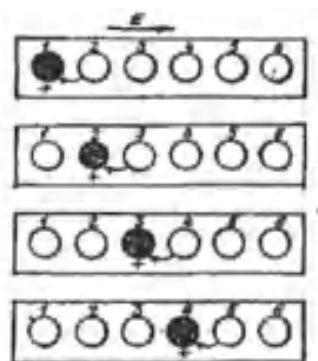


Рис. 5.2. Модель "діркової" провідності в напівпровідниках: світлі кружечки - нейтральні атоми, темний кружечок - додатний іон. Стрілками вказано напрямки послідовних переходів електронів від нейтральних атомів до іонів. Місце додатного заряду переміщується у зворотному напрямі - по полю

Таким чином, у валентній зоні напівпровідника відбувається переміщення електронів від нейтральних атомів проти зовнішнього поля, рівнозначне переміщенню дірок у напрямку поля.

За кімнатної температури концентрація електронів і дірок становить: для германію – $2 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$, для кремнію $1,4 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$. З підвищенням температури ці концентрації різко зростають (при 800°C - у сотні мільйонів разів). Тому провідність напівпровідників з підвищенням температури різко зростає, незважаючи на протидіюче цьому зростанню зниження швидкості впорядкованого переміщення вільних електронів.

3. Температурна залежність питомого опору металевих провідників.

Напівпровідники n-типу. Ідеально чистих напівпровідників у природі не існує, а найменші сліди домішок докорінно змінюють їх властивості. Розглянемо вплив домішок на прикладі дуже важливих для техніки напівпровідників германію чи кремнію.

Якщо невелику частину атомів чотиривалентного германію чи кремнію в їх кристалічних ґратках замінити п'ятивалентними атомами миш'яку A_s (арсену) або сурми S_b (стибію), то чотири з п'яти валентних електронів атомів домішки утворюють міцні ковалентні зв'язки із сусідніми атомами германію (кремнію), а п'ятий електрон атома домішки зв'язаний з атомами германію (кремнію) дуже слабо і навіть за кімнатної температури за рахунок теплового руху переходить у зону провідності, тобто стає вільним (рис. 4.3,а). При цьому домішковий атом стає позитивно зарядженим іоном, а його енергетичний рівень розташований у забороненій зоні і ближче нижньої межі зони провідності (рис. 4.3,б).

Ми рисунку схематично зображено чотири таких позитивних іоні її у вигляді кружечків з хрестиками в середині. Оскільки вплив п'ятивалентних домішкових атомів миш'яку або сурми на чотиривалентні атоми германію або кремнію якісно однаковий, то в подальшому розглядатимемо тільки напівпровідник германій з домішками миш'яку.

Майже кожен атом домішки миш'яку спричинює утворення одного вільного електрона. Дірка при цьому не створюється, тому що іон миш'яку міцно зв'язаний з чотирма сусідніми атомами германію подвійними зв'язками і перехід електронів від сусідніх нейтральних атомів германію до іонів миш'яку унеможливується.

Кількість електронів, яка переходить під дією теплової чи іншої енергії з домішкового рівня в зону провідності в багато разів перевищує ту кількість електронів, що переходить в зону провідності з валентної зони, тому що енергія зв'язку ΔW_d домішкового електрона дорівнює $0,01 \text{eV}$, а ΔW власного - $0,7 \text{eV}$, тобто $\Delta W_d < W$. Отже, кількість електронів у кристалі чотиривалентного матеріалу за внесення п'ятивалентної домішки в багато разів перевищує кількість дірок. Тому такий напівпровідник має, головним чином, електронну провідність, яку названо провідністю n-типу (від слова *negativ*) і є n-напівпровідником, а домішка, що віддає електрони, називається донорною. Хоча кількість атомів домішки дуже незначна - приблизно 1 атом на 10^7 - 10^8 атомів германію провідність германію за рахунок домішки за кімнатної температури зростає в багато разів.

4. Вплив домішок та інших структурних дефектів на питомий опір металів.

Напівпровідники p-типу. При введенні у чотиривалентний кристал германію домішки тривалентного індію (In) чи галію (Ga), частина домішкових атомів заміщує у вузлах ґратки атоми основного кристала (рис. 4.4,а). Для утворення ковалентних зв'язків між атомом домішки і германію не вистачає одного електрона, тому що атоми домішки мають лише три валентні електрони і атом домішки утворює міцні зв'язки тільки з трьома сусідніми атомами германію, а четвертий зв'язок є незаповнений. У цих умовах будь-який електрон сусіднього атома германію може легко відірватись і заповнити цей зв'язок, при цьому атом індію виявиться зарядженим негативно, а атом германію, що віддав свій валентний електрон, перетвориться в іон (дірку), який зв'язаний із сусідніми атомами тільки трьома зв'язками.

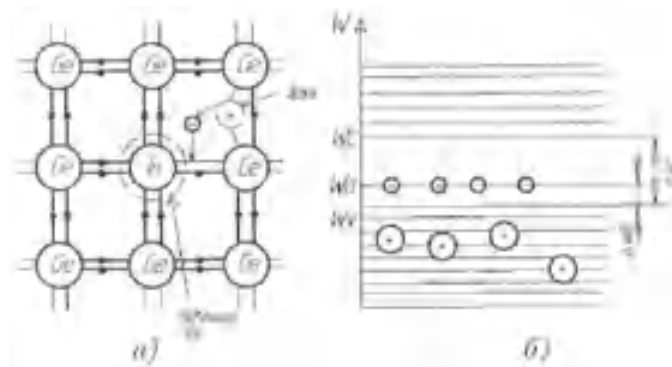


Рис. 5.4. Виникнення дірки в кристалі напівпровідника р-типу (а) і відображення цього прогресу на енергетичній діаграмі (б)

Ці дірки можуть бути заповнені електронами за рахунок розриву будь-яких зв'язків сусідніх атомів германію, у результаті чого дірки переміщуються, а атоми домішок перетворюються в нерухомі негативно заряджені іони. Енергетичний рівень домішки W_a розміщений у забороненій зоні біля валентної зони, тому домішки, невеликої енергії $\Delta W_a = W_a - W_v < \Delta W$, щоб електрони з верхніх рівнів валентної зони перескочили на рівні атомів домішок і заповнили відсутні зв'язки (див. рис. 4.4,б). Внаслідок цього у валентній зоні виникають вакантні енергетичні рівні (дірки), а атоми домішок стають негативно зарядженими іонами. Отже, кількість дірок у напівпровіднику з тривалентними домішками збільшується, а кількість електронів провідності не зростає.

Напівпровідники з надлишком дірок мають діркову провідність і називаються напівпровідниками р-типу (positive), або р-напівпровідниками. Домішка з меншою валентністю спричинює виникнення дірок у валентній зоні і називається акцепторною. У напівпровіднику р-типу (з акцепторною домішкою) основними носіями електричного струму є дірки, а неосновними - електрони. У напівпровіднику n-типу з донорними домішками, навпаки, основними носіями струму є електрони, а неосновними - дірки.

Таким чином, у напівпровідниках з власною провідністю попи, і провідність є сумою приблизно однакових електронної і діркової провідності. У напівпровідниках з домішками повна провідність є сумою домішкової і власної провідності. Домішкова провідність перевищує власну провідність при низьких температурах високих температур, коли значно зростає кількість електронів у зоні провідності внаслідок їх переходу з валентної зони, а всі атоми домішок іонізовані, власна провідність напівпровідника може бути більшою, ніж домішкова.

Провідникові матеріали і вироби із них.

План

1. Класифікація провідникових матеріалів.
2. Матеріали високої провідності.
3. Надпровідники і кріопровідники.
4. Матеріали з високим питомим опором: провідникові резистивні матеріали, плівкові резистивні матеріали.
5. Напівпровідникові матеріали.

1. Класифікація провідникових матеріалів.

Діелектричні (електроізоляційні) матеріали. Діелектрики - речовини, які погано проводять електричний струм.

Їх питомий електроопір у межах 10^7 - 10^{18} Ом. Існують тверді, рідкі і газоподібні діелектрики. Зовнішнє електричне поле викликає поляризацію діелектриків. У деяких з них поляризація існує і за відсутності зовнішнього поля (п'єзоелектрики, піроелектрики, сегнетоелектрики, електрети).

Електроізоляційні матеріали - діелектрики з великим питомим опором, які застосовуються для ізоляції (від французького слова *isoler* - роз'єднувати) частіш електричних пристроїв, як наприклад, обмоток електричних машин і апаратів, ліній електропередач тощо.

Електроізоляційні матеріали забезпечують протікання електричного струму по наперед визначених в електричних пристроях шляхах, запобігають небажаним електричним контактам і витіканню струму. Якість ізоляції забезпечує надійність роботи електричних установок.

Електроізоляційні матеріали в основному характеризуються: електроопором ізоляції, електричною міцністю і діелектричними втратами. Чим вищий електроопір ізоляції, тим менші струми витікання і краща якість ізоляції.

Полярні і неполярні діелектрики. Діелектрики поділяються на два класи: полярні (дипольні); неполярні (нейтральні).

Електричні заряди можуть бути нерівномірно розподілені між атомами в молекулі. В одній частині молекули переважають додатні заряди, а в іншій - від'ємні. Такі молекули можна розглядати як систему з двох електричних зарядів $+q$ і $-q$, рівних за величиною, але протилежних за знаком, розміщених на деякій відстані l один від одного, тобто як диполь (рис. 5.1). Добуток величини заряду q на відстань між зарядами l називається дипольним моментом. Величина дипольного моменту молекули складає:

$$\mu = q \cdot l$$

де q - сумарний позитивний (або чисельно рівний йому сумарний негативний) електричний заряд молекули, а l - плече диполя.

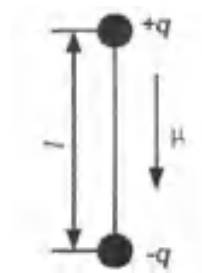


Рис. 6.1. Схема полярної молекули (диполя)

Дипольний момент необхідно розглядати як вектор, додатний напрям якого спрямований від додатного заряду до від'ємного.

Молекули, в яких має місце несиметричне розміщення електричних зарядів, називаються полярними.

Вони мають дипольний момент, відмінний від нуля. Прикладами полярних молекул можуть бути вода, йодистий калій КІ та інші. Молекула води має вигляд рівнобедреного трикутника (рис. 5.2, в). У молекулі води сумарний позитивний і негативний заряди не співпадають у просторі, і молекула має значний дипольний момент. До полярних речовин належить багато спиртів, кислот, ефірів та ін. У молекулі КІ електричний момент рівний $\mu = 23 \cdot 10^{-30}$ Клм і спрямований від позитивно зарядженого іона калію до негативно зарядженого іона йоду.

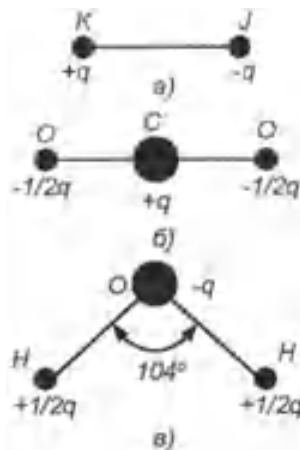


Рис. 6.2. Схеми просторової будови молекул: йодистого калію KJ (а), вуглекислого газу CO₂ (б) і води H₂O (в)

Молекули, які побудовані симетрично, тобто такі, в яких центри ваги як позитивних, так і негативних зарядів співпадають з центром симетрії молекули, а значить і іонів, є неполярними (рис. 5.2,6). У молекулах неполярних речовин (наприклад CO₂) $l = 0$, тому і $\mu = 0$.

2. Матеріали високої провідності.

Поляризація діелектриків. Поляризація діелектриків - це зміщення електричних зарядів у діелектрику під дією прикладеного електричного поля.

За поляризації відбувається переміщення зв'язаних з певними молекулами речовини зарядів, які не можуть покинути дану молекулу, на відміну від електропровідності, зумовленої рухом вільних носіїв зарядів на великі відстані.

Поляризація відбувається у всіх молекулах діелектрика і супроводжується переміщенням у просторі великої кількості зарядів на дуже малу відстань (у межах молекули). Зміщення зарядів за поляризації можна в багатьох випадках розглядати як "пружне". Після припинення дії прикладеного до діелектрика електричного поля зміщені заряди повертають у вихідне положення.

Існує кілька видів поляризації з різними механізмами. Найбільш типові - електронна, іонна і дипольна.

Електронна поляризація - зміщення електронів відносно ядра атома, в усіх атомах, молекулах чи іонах будь-якого діелектрика.

За накладення зовнішнього електричного поля воно здійснюється за надзвичайно короткий час (порядку 10^{-14} – 10^{-15} с), близький до періоду світлових коливань, завдячуючи тому, що електрони мають дуже малу масу.

Навіть у найпростішому атомі водню під дією зовнішнього електричного поля електрон зміщується на певну відстань від ядра. Це зміщення тим більше, чим вища напруженість електричного поля і чим слабше електрони зв'язані з ядром атома.

Іонна поляризація - зміщення одного відносно іншого іонів гетерополярної (іонної) молекули.

Протікає іонна поляризація також швидко (10^{-12} – 10^{-13} с).

Процеси електронної та іонної поляризації схожі між собою. Їх можна розглядати як різновидності деформаційної поляризації, за якої відбувається зміщення (а не поворот) зарядів один відносно одного в напрямку електричного поля (рис. 5.3, рис. 5.4).

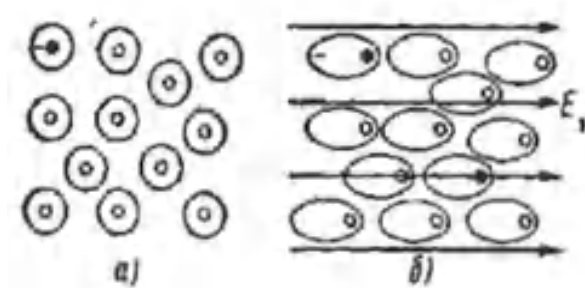


Рис. 6.3. Спрощена схема моделей атомів водню: а) до поляризації; б) після поляризації

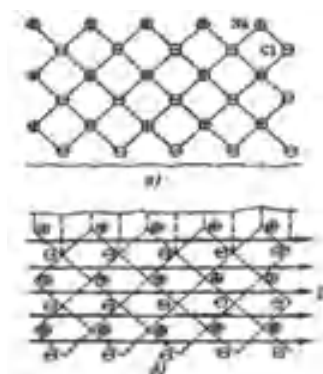


Рис. 6.4. Ідеалізована схема розміщення іонів кам'яної солі: а) у вузлах ґратки за відсутності електричного поля; б) зміщених з вузлів на невеликі відстані під впливом поля

На процес деформаційної поляризації не впливає температура діелектрика і тому відсутні незворотні втрати енергії. Після зняття напруження, електрична енергія, яка витрачається на поляризацію атома (молекули), повністю повертається джерелу електричної енергії, і тому при деформаційній поляризації відсутні діелектричні втрати.

3. Надпровідники і кріопровідники.

Дипольна, або орієнтаційна, поляризація притаманна лише полярним діелектрикам і зводиться до повороту в напрямку електричного поля постійних дипольних моментів молекул (рис. 5.5), які безперервно перебувають у хаотичному тепловому русі.

Тому на дипольну поляризацію суттєво впливає температура, з підвищенням якої хаотичний рух молекул зростає і поляризація зменшується. В ідеальному випадку дипольна поляризація повинна проявлятися лише в газах, рідинах і аморфних, не дуже в'язких, діелектриках. У кристалічних діелектриках за температур, нижчих їх температури плавлення, диполі закріплені на своїх місцях настільки міцно, що не можуть орієнтуватися в напрямку поля, тому дипольна поляризація, як правило, не відбувається (за винятком деяких кристалів з нещільним упакуванням молекул).

Процеси встановлення і зникнення (після зняття з діелектрика напруги) дипольної поляризації вимагають відносно значного (порівняно з безінерційною деформаційною поляризацією) часу і тим більшого, чим більші розміри молекул та в'язкість (коефіцієнт внутрішнього тертя) речовини. Він може бути того ж порядку, що й час півперіоду змінних напружень у радіо- та електротехніці. Тому, на відміну від деформаційної, дипольна поляризація викликає розсіювання електричної енергії і діелектричні втрати (нагрів діелектрика). Орієнтація молекул за дипольної поляризації буде тим узгодженішою, чим більші зовнішнє поле, полярність молекули і менша динамічна в'язкість речовини.

Діелектрична проникність. Діелектрична проникність - величина, яка показує у скільки разів зростає ємність конденсатора, якщо вакуум між його обкладками заповнити діелектриком.

Як показує дослід, ємність конденсатора залежить не лише від його розмірів, форми і взаємного розміщення обкладок, а й від властивостей діелектрика, що заповнює простір між його обкладками.

Якщо C_0 - ємність конденсатора, між обкладками якого є вакуум, а C - ємність того ж конденсатора, простір між обкладками якого заповнений будь-яким діелектриком, то ємність C виявляється в ϵ разів більшою від ємності C_0 , тобто

$$C = \epsilon C_0.$$

Величина ϵ показує також, у скільки разів сила взаємодії електричних зарядів у середовищі менша, ніж у вакуумі.

Якість конденсатора залежить не лише від ϵ , але й від ізолюючих властивостей діелектрика. Чим кращі ці властивості, тим менше витікання зарядів через діелектрик.

Діелектрична проникність має особливо велике значення у виробництві електричних конденсаторів. Чим вона вища, тим менші розміри конденсатора за заданої його ємності. Значну роль діелектрична проникність відіграє при виготовленні багатошарової ізоляції з різних електроізоляційних матеріалів. У шарі з меншою діелектричною проникністю виникає найбільша електрична напруга. Оскільки діелектрична проникність повітря значно менша порівняно з поширеними електроізоляційними матеріалами, то дуже важливо видаляти повітряні проміжки. Застосування електроізоляційних матеріалів з високою електричною міцністю дозволяє зменшити товщину ізоляції. Діелектричні втрати, які виникають в ізоляції за змінного електричного поля, спричиняють нагрівання електроізоляційного матеріалу, що може призвести до його руйнування. Чим менші діелектричні втрати, тим надійніша ізоляція. Важливе значення має її механічна міцність.

В полярному діелектрику позитивні і від'ємні заряди в кожній молекулі однакові, але зміщені в просторі. За відсутності зовнішнього поля молекули діелектрика розташовані хаотично (рис. 5.6, а), а результуюча дія їх зарядів дорівнює нулю. Під дією електричного поля молекули повертаються так, що їх електричні осі встановлюються по можливості за лініями поля (рис. 5.6, б). Ця орієнтація зростає із зростанням напруженості поля. Тепловий рух молекул інтенсифікується за підвищення температури і сприяє хаотичній орієнтації молекул. Внаслідок дії цих конкуруючих чинників лише частина молекул орієнтується своїми осями близько до напрямку поля.

Розглянемо плоский конденсатор в якому ліва обкладка заряджена позитивно, а права від'ємно (рис. 5.7).



Рис. 6.6. Розміщення дипольних молекул а) до поляризації; б) після поляризації

Зростання ємності конденсатора з підвищенням ϵ діелектрика вказує на те, що електричне поле всередині діелектрика змінюється, а саме: напруженість поля в діелектрику зменшується в ϵ разів порівняно з вакуумом. Оскільки різноіменні заряди притягуються, а однойменні відштовхуються, то біля лівої (позитивно зарядженої обкладки) на поверхні діелектрика виникає від'ємний заряд, а біля правої - додатний. Внаслідок цього поле E_p , створене поляризаційними зарядами, спрямоване протилежно до поля E_0 , створеного на обкладках, і ослабляє його. Тому результуюче поле в діелектрику виявляється слабшим, ніж за відсутності діелектрика.

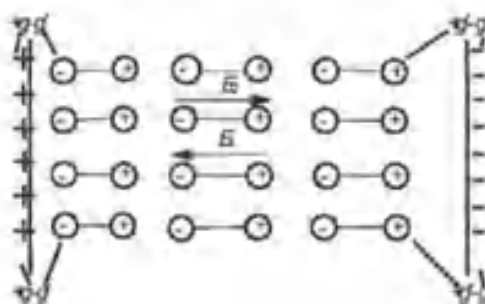


Рис. 6.7. Поле E_p , створене поляризаційними зарядами $+q'$ і $-q'$ спрямоване протилежно полю E_0 , яке створене зарядами $+q$ і $-q$ на обкладках конденсатора

Якщо, крім розглянутої впорядкованої орієнтації полярних молекул, під дією поля відбувається також зміщення зарядів у межах кожної окремої молекули (рис. 5.3, 5.4), то поляризаційні заряди на поверхні діелектрика додатково зростають і ще більше ослаблюють результуюче поле.

Залежність діелектричної проникності від різних чинників. Діелектрична проникність ϵ залежить від частоти прикладеної до діелектрика напруги, температури, вологи, тиску і т. д.

Залежність ϵ від частоти. Час для встановлення електронної чи іонної поляризації дуже малий порівняно з півперіодом змінної напруги для вживаних в електро- і радіотехніці частот. Тому поляризація діелектриків, в яких проявляється лише деформаційний механізм поляризації, повністю встигає відбутись за значно менший час, ніж час півперіоду змінної напруги, і частота зміни напруги не впливає на діелектричну проникність ϵ (рис. 5.8). Електрична енергія, затрачена на поляризацію молекули, повністю повертається до джерела енергії, внаслідок чого деформаційна поляризація не викликає в матеріалі діелектричних втрат.

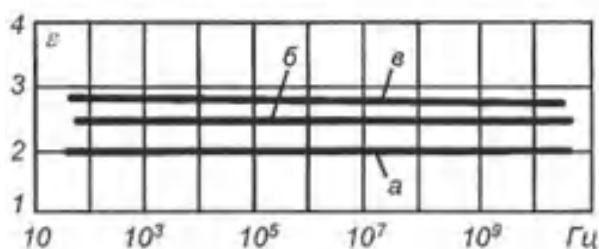


Рис. 6.8. Залежність діелектричної проникності ϵ від частоти для твердих неполярних діелектриків: а - політетрафторетилен; б - полістирол; в - полідихлор-стирол

4. Матеріали з високим питомим опором: провідникові резистивні матеріали, плівкові резистивні матеріали.

У випадку дипольної поляризації, за підвищення частоти змінної напруги значення ϵ полярного діелектрика спочатку залишається незмінним (рис. 5.9, кр. б), а починаючи з деякої критичної частоти, за якої поляризація не встигає повністю встановитися (протягом одного півперіоду), ϵ починає знижуватися і наближається за достатньо високих частот до значень, характерних для неполярних діелектриків.

Залежність ϵ від температури. Температура не впливає на процес електронної поляризації неполярних діелектриків, тому остання від неї не залежить. Але з підвищенням температури внаслідок розширення діелектрика в одиниці його об'єму зменшується кількість молекул, що може призвести до деякого зменшення ϵ (рис. 5.10).

За іонного механізму поляризації в більшості випадків спостерігається зростання ϵ з підвищенням температури.

У полярних діелектриках у низькотемпературній області орієнтація молекул практично не відбувається. З температурою внаслідок зменшення в'язкості речовини можливість орієнтації диполів полегшується, що супроводжується зростанням діелектричної проникності (рис. 5.11).

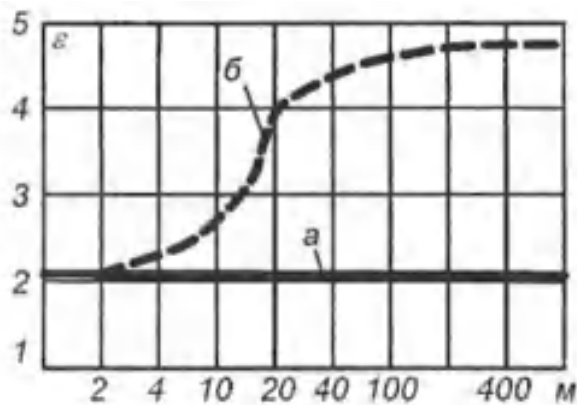


Рис. 6.9. Залежність діелектричної проникності ϵ від довжини хвилі для неполярного діелектрика - трансформаторної оливи (а) і тої ж оливи, але з добавкою 20% сильно полярної рідини нітробензолу $C_6H_5NO_2$ (б)

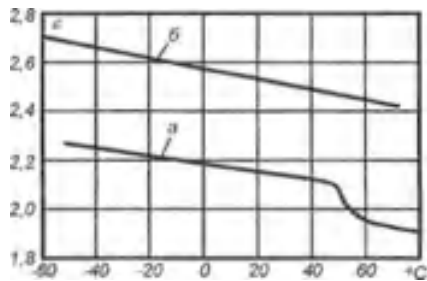


Рис. 6.10. Залежність діелектричної проникності ϵ від температури для неполярної діелектриків: а - совола від температури (частота 50 Гц) парафін; б – полістирол

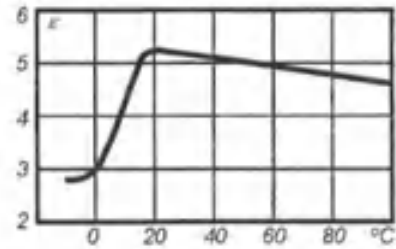


Рис. 5.11. Залежність діелектричної проникності ϵ

Але при значному підвищенні температури збільшуються теплові коливання молекул і, як наслідок, зменшується ступінь їх орієнтації. Через це крива залежності $\epsilon(T)$ після проходження максимуму спадає.

Залежність ϵ від вологості. Якщо ϵ діелектрика менша ϵ води, то зволоження діелектрика зумовлює значне зростання ϵ . Однак, практично використати цей ефект не вдається, оскільки зволоження супроводжується погіршенням інших важливих характеристик: зменшенням питомого електроопору, зростанням кута діелектричних втрат і електричної міцності діелектрика.

Вплив напруги на ϵ . Для лінійних діелектриків у більшості випадків ϵ практично не залежить від напруги. Сильно виражена залежність діелектричної проникності ϵ від прикладеної до діелектрика електричної напруги характерна для сегнетоелектриків.

5. Напівпровідникові матеріали.

5. Загальні відомості і класифікація.
6. Основні параметри, що характеризують властивості напівпровідникових матеріалів (тип провідності, ширина забороненої зони, рухливість носіїв заряду та ін.).
7. Залежність параметрів від температури матеріалу, частоти струму тощо.
8. Оптичні, фотоелектричні і термоелектричні явища в напівпровідниках, ефект Холла.

1. Загальні відомості і класифікація.

Діелектричні втрати - це втрати енергії, які виникають у товщі електроізоляційного матеріалу при дії на нього змінного електричного поля і перетворюються в тепло.

Максимум поляризації діелектрика тією чи іншою мірою відстає в часі від максимуму напруженості поля, тобто виникає деякий зсув фаз поляризації порівняно з фазами напруженості поля. За відсутності такого зсуву відсутні й відповідні діелектричні втрати. Діелектричні втрати не виникають і тоді, коли час релаксації настільки великий, що поляризація не встигає завершитись.

Поряд з вказаними діелектричними втратами мають місце втрати, зумовлені невеликою провідністю матеріалу. Вона викликається наявністю у всіх реальних діелектриків деякої кількості домішок. Діелектричні втрати, спричинені домішковою провідністю, за абсолютною величиною в більшості випадків дуже малі.

Діелектричні втрати можуть привести до перегріву електроізоляційного матеріалу, погіршення його ізоляційних властивостей і передчасного зношення та руйнування діелектрика. Як правило, втрати потужності в матеріалі чи виробі з цього матеріалу, за інших рівних умов, прямо пропорційні квадрату прикладеної до цього матеріалу електричної напруги.

Відомо, що як за дії постійної напруги, так і змінної, діюче значення якої рівне за величиною постійній напрузі, втрати потужності P в металічних провідниках однакові, не залежать від частоти напруги та визначаються як

$$P = U^2/R,$$

де U - напруга, В; R - опір провідника, Ом.

Діелектричні втрати спостерігаються в обох випадках. В першому зумовлюються наскрізним струмом. У цьому випадку якість матеріалу характеризується значеннями питомого об'ємного і поверхневого опорів.

При змінній напрузі, крім втрат, зумовлених наскрізним струмом, з'являються втрати від сповільненої поляризації діелектрика.

У діелектриках розсіювання потужності залежить від частоти і значення напруги. Чим вище частота і значення напруги, тим більші втрати. Вони також зростають із збільшенням ємності і залежать від матеріалу діелектрика. При розгляді діелектричних втрат звичайно мають на увазі втрати за змінної напруги, тому що вони в багато разів більші, ніж за постійної.

Кут діелектричних втрат. Найчастіше втрати потужності в діелектрику оцінюють кутом діелектричних втрат, а також тангенсом цього кута.

На (рис. 5.12) зображена векторна діаграма струмів і напруг у конденсаторі при дії змінної напруги. Якщо б у діелектрику конденсатора потужність не розсіювалась (ідеальний діелектрик), то вектор I випереджував би вектор напруги U на 90° і струм був би чисто реактивним.

Насправді ж зсув фаз φ для реального діелектрика дещо менший 90° . Повний струм через конденсатор можна розкласти на дві компоненти - активний I_a і реактивний I_p . Оскільки в конденсаторі з високоякісним діелектриком кут зсуву фаз близький до 90° , то для більшої наглядності використовують кут δ , який доповнює кут φ до 90° :

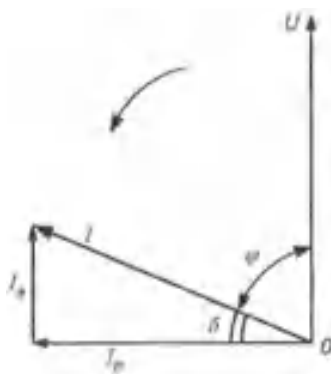


Рис. 7.12. Спрощена діаграма струмів у діелектрику з втратами

$$\delta = 90 - \varphi.$$

Кут δ називається кутом діелектричних втрат, а тангенс цього кута дорівнює відношенню активного і реактивного струмів:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p.$$

$\operatorname{tg} \delta$ не залежить від форми поля, розмірів та форми зразка і широко застосовується для оцінки діелектричних втрат. Ця величина набагато чутливіша до змін властивостей речовини ніж величина ϵ .

Діелектричні втрати P ділянки ізоляції з ємністю C , як бачимо на рис. 5.12, дорівнюють

$$P = UI_a = UI_p \operatorname{tg} \delta. \quad (5.1)$$

Підставивши в (5.1) значення сили струму, що проходить через ділянку ізоляції з ємністю C .

$$I_p = U\omega C,$$

де $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, отримаємо:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (5.2)$$

Вираз (5.2) справедливий для будь-яких розмірів і конфігурації ділянки ізоляції. За високих частот ω діелектричні втрати великі і в потужних короткохвильових радіоустановках навіть за значень $\operatorname{tg} \delta$ порядку 0,01 кількість виділеного тепла настільки велика, що може спричинити руйнування і розтоплення скла чи фарфору.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ найкращих електроізоляційних матеріалів для високочастотної техніки та високих напруг $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ і навіть менше. До таких матеріалів, зокрема, можна віднести неполярні полімери, для яких $\operatorname{tg} S$ не перевищує $\sim 0,0006$.

Вплив різних чинників на $\operatorname{tg} \delta$. Вплив частоти. Якщо втрати в діелектрику зумовлені лише наскрізною провідністю, то вони не залежать від частоти. І навпаки, якщо втрати в конденсаторі спричиняються головним

чином опором монтажних чи інших провідників та самих електродів, то розсіювання енергії зростає пропорційно квадрату частоти. Тому конденсатори, призначені для роботи на високих частотах, повинні мати мінімальний опір провідників, пластин і перехідних контактів.

Вплив частоти поля на значення $\operatorname{tg} \delta$ показано на рис. 5.13. У випадку чисто дипольного механізму втрат частота $\operatorname{tg} \delta$ відповідає такому співвідношенню між частотою зовнішнього електричного поля і часом τ релаксації диполів, за якого втрата енергії на подолання диполями опору в'язкого середовища найбільша.



Рис. 7.13. Теоретична залежність тангенса кута втрат від частоти прикладеної до діелектрика напруги

Діелектричні втрати мають суттєве значення для матеріалів установок високої напруги, високочастотної апаратури, оскільки вони пропорційні квадрату прикладеної до діелектрика напруги і частоти поля. Матеріал для роботи в таких умовах характеризується низькими значеннями кута втрат і діелектричної проникності.

Вплив температури. Як правило, $\operatorname{tg} \delta$ суттєво зростає з підвищенням температури. Збільшення $\operatorname{tg} \delta$ у неполярному діелектрику зумовлено зростанням у ньому струму провідності. У полярного діелектрика діелектричні втрати за певної температури T_1 досягають максимального значення (рис. 5.14).

Це пояснюється двояким впливом підвищення температури: з одного боку, зростає ступінь орієнтації диполів, а значить і $\operatorname{tg} \delta$; з іншого зменшуються втрати енергії на подолання опору в'язкого середовища і зменшення $\operatorname{tg} \delta$. Зростання $\operatorname{tg} \delta$ до температури T_1 зумовлене втратами енергії на поворот все більшої кількості полярних молекул.

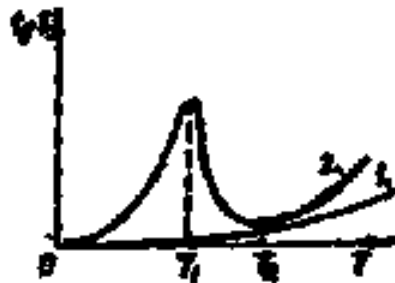


Рис. 7.14. Залежність тангенса кута діелектричних втрат від температури діелектрика: 1 - неполярний діелектрик; 2 - полярний діелектрик

Зменшення втрат в інтервалі температур T_1 - T_2 пояснюється тим, що сильне нагрівання діелектрика утруднює орієнтаційну поляризацію дипольних молекул внаслідок зростання хаотичних теплових коливань молекул, які зменшують ступінь впорядкованості їх орієнтації. Зростання $\operatorname{tg} \delta$, починаючи з температури T_2 і вище, викликане збільшенням струму провідності внаслідок зменшення в'язкості і збільшення швидкості переміщення носіїв струму (вільних іонів).

2. Основні

параметри, що характеризують властивості напівпровідникових матеріалів (тип провідності, ширина забороненої зони, рухливість носіїв заряду та ін.).

Вплив напруги. В багатьох випадках напруга практично не впливає на значення $\tan \delta$. В окремих же випадках до певних значень напруги U величина $\tan \delta$ не змінюється (рис. 5.15, точка А), але при подальшому зростанні напруги U крива $\tan \delta(U)$ різко піднімається внаслідок процесу іонізації повітря чи інших газів у включеннях, вкраплених у матеріал ізоляції. Після досягнення максимуму в точці Б крива починає знижуватись, тому що зменшується спад напруги на газових включеннях внаслідок зростання їх провідності. Робоча напруга ізоляції повинна бути нижчою від напруги іонізації $U_{\text{іон}}$ (точка А).

Пробій діелектриків. Електричний пробій - це руйнування матеріалу діелектрика (ізолятора) під дією електричної напруги, при якій матеріал втрачає свої електроізоляційні властивості і пропускає через себе електричний струм.

Настає пробій (точка П, рис. 5.16), якщо прикладена до діелектрика напруга перевищує критичне для даного діелектрика значення (пробивну напругу $U_{\text{пр}}$) і викликає розряд через діелектрик.

Практично відбувається коротке замикання між електродами. Після розряду в рідкому й газоподібному діелектриках зруйновані частинки внаслідок їх рухомості замінюються іншими і електрична міцність відновлюється. За пробою твердого діелектрика відбувається зміна його твердості, змінюються склад і структура самого матеріалу (сплавляється, обуглюється тощо) і електрична міцність невідновлюється.

Електрична міцність ($E_{\text{міц}}$) - здатність електроізоляційного матеріалу протидіяти руйнуючій дії електричної напруги.

Вона визначається найменшою граничною напругою ($U_{\text{пр}}$), що припадає на одиницю товщини матеріалу, за якої матеріал руйнується. Вимірюється у вольтах, кіловольтах, мегавольтах на міліметр, сантиметр або метр товщини h (В/мм, кВ/мм, МВ/м та ін.):

$$E_{\text{міц}} = U_{\text{пр}}/h.$$

Визначаючи $U_{\text{пр}}$ у вольтах, а h в метрах, отримуємо основну одиницю для $E_{\text{міц}}$ - вольт на метр (В/м). Електрична міцність діелектрика змінюється в широкому діапазоні значень. Це пояснюється тим, що вона залежить від багатьох чинників напруги (постійна, змінна, імпульсна), швидкості її наростання та ін.

Діелектрики характеризуються коефіцієнтом міцності (запасом міцності) - відношенням пробивної напруги діелектрика до робочої за нормальних умов його роботи.

Пробивна напруга ($U_{\text{пр}}$) - критична напруга для матеріалу діелектрика, з досягненням якої настає електричний пробій.

Вона залежить від якості матеріалу і товщини діелектрика h . Із збільшенням товщини пробивна напруга зростає, однак не строго пропорційно товщині:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{міц}} \cdot h$$

3. Залежність параметрів від температури матеріалу, частоти струму тощо..

Значення пробивної напруги залежить також від тривалості дії (із зменшенням тривалості вона зростає), від температури, тепло відведення, циклічності дії, розмірів і форми електродів, частоти змінного струму та ін. причин.

Пробивна напруга діелектриків, які застосовуються в електричних машинах, трансформаторах, оливних вимикачах та ін. височастотній апаратурі, визначає їх електричну міцність. Пробивна напруга для найпоширеніших в практиці діелектриків складає в кВмм: для повітря - 3, мармуру - 7, фарфору - 25, скла - 10 - 40, бакеліту - 25, трансформаторної оливи - 16, непросоченого паперу - 7- 9, фібри - 2-5, слюди - 100 - 200, міканіту - 25, ебоніту - 8 - 10.

У більшості випадків електрична міцність високоякісних твердих діелектриків вища, ніж рідких і газоподібних. Цим пояснюється "поверхневий розряд" або "перекриття" твердої ізоляції значної товщини за не великої відстані між найближчими точками електродів (рис. 5.17).

Розряд проходить не по товщині твердої ізоляції, а в прилеглому до неї рідкому, чи газоподібному (повітряному) діелектрику (показано стрілкою б). Тому пористі діелектрики із значною кількістю газових включень мають набагато меншу електричну міцність, ніж монолітні діелектрики з того ж матеріалу.

Просочування пористих діелектриків високоякісними електроізоляційними речовинами суттєво збільшує їх електричну міцність. Наприклад, просочення кабельного паперу оливоканіфольним компаундом підвищує його міцність з 3-5 до 40-80 МВ/м.

Електропровідність і пробій газоподібних діелектриків. Електропровідність газів. У природному стані гази майже не проводять електричний струм, тобто є діелектриками. Ізолюючі властивості газів пояснюються тим, що атоми і молекули в них є нейтральними, незарядженими частинками. Тільки дуже мала частина атомів у цих умовах дисоціює на електрони та іони, рух яких під дією поля спричинює електричний струм. Наприклад, для повітря степінь дисоціації становить близько 10^{-12} . Заряджені частинки в газах можуть виникати під впливом дії зовнішніх чинників: космічних, рентгенівських, ультрафіолетових променів, сильного нагріву газу тощо. Електропровідність газу, зумовлена дією таких зовнішніх чинників, називається несамостійною.

Зовнішні іонізатори надають атомам (молекулам) газу додаткової енергії, під дією якої електрони відокремлюються від молекул, перетворюючи їх у позитивні іони. Вивільнені електрони стають вільними носіями негативного заряду, а позитивні іони - носіями позитивного заряду. Вільні електрони можуть "приліпитись" до нейтральних молекул і перетворити їх у негативно заряджені іони. Таким чином, у газі під дією зовнішніх іонізаторів виникає невелика кількість електронів, позитивно та негативно заряджених іонів, які перебувають у безладному тепловому русі. Певна частина електронів і позитивно заряджених іонів рекомбінують, утворюючи нейтральні атоми і молекули.

Під дією напруженості електричного поля між електродами, розділеними шаром газу, електрони та іони переміщаються від одного електрода до іншого і створюють у газі електричний струм. У процесі спрямованого руху заряджені частинки на своєму шляху співударяються з нейтральними молекулами газу, які перебувають у хаотичному тепловому русі. За відносно невеликих значень напруженості поля після зіткнення частинки розлітаються, як пружні кульки, не викликаючи іонізації нейтральних молекул. Отже, нових заряджених частинок не створюється. Сила струму між електродами визначається тільки кількістю утворених у газі під впливом зовнішніх чинників заряджених частинок та швидкістю їх переміщення, яка зростає пропорційно напруженості електричного поля. У цих умовах дотримується закон Ома (область ОА, рис. 5.18.). За подальшого зростання напруги на вольт-амперній характеристиці з'являється горизонтальна ділянка (область АВ, рис. 5.18), тобто закон Ома не виконується. Зростання напруги ще не викликає збільшення кількості в газі заряджених частинок і струм не зростає. Це постійне, не залежне від напруги значення сили струму називається струмом насичення. За нього усі заряджені частинки досягають електродів, а нові ще не утворюються.

Якщо після досягнення в газі струму насичення продовжувати підвищувати напругу, то хід вольт-амперної характеристики раптово порушується і струм різко зростає. Стрибок струму вказує на зростання в газі числа заряджених частинок під впливом самого електричного поля. Інше значить, що поле надає окремим іонам (електронам) настільки великої швидкості (енергії), що за співударів цих заряджених частинок з нейтральними молекулами останні розбиваються на іони та електрони. Число заряджених частинок тепер визначається не зовнішніми іонізуючими чинниками, а дією самого поля.

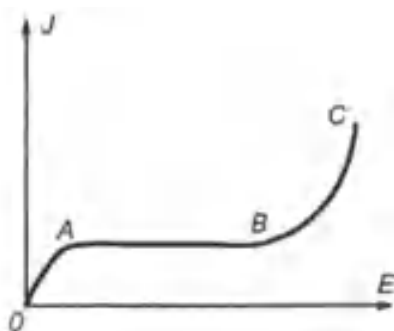


Рис. 7.18. Вольт-амперна характеристика газоподібного діелектрика

Чим сильніше поле, тим більша частина нейтральних молекул іонізується і струм зростає. Вказаний процес називається ударною іонізацією газу (область ВС, рис. 5.18). За неї струм у газі швидко збільшується навіть за незначного підвищення напруги.

Утворені за ударної іонізації електрони та іони збільшують у газі кількість рухомих зарядів, а останні у свою чергу набувають під дією поля швидкостей, достатніх для ударної іонізації нових молекул. Процес іонізації

самопідсилюється, іонізація газу досягає великого значення і виникає "лавина" заряджених частинок (рис. 5.19). Мінімальна напруга, за якої виникає ця лавина, є напругою пробиву газу ($E = E_{пр}$).

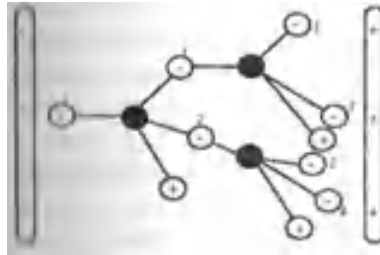


Рис. 7.19. Вільний електрон 1 за співудару з нейтральною молекулою розщиплює її на електрон 2 і вільний позитивно заряджений іон. Електрони 1 і 2 за подальших співударів з нейтральними молекулами знову розщиплюють їх на електрони 3 і 4 та вільні позитивно заряджені іони і т. д.

У багатьох видах електротехнічних конструкцій (лінії електропередач, трансформатори та ін.) зовнішньою ізоляцією є повітря. Пробивна напруга між двома розміщеними в газі електродами залежить як від хімічного складу газу, його тиску, температури, відстані між електродами, так і форми та розмірів електродів.

Пробій газоподібних діелектриків. У однорідному електричному полі, наприклад, у проміжку між двома кульковими електродами (рис. 5.20), якщо відстань між ними h набагато менша від діаметра d кульок, за зростання напруги відразу виникає пробій всього проміжку між електродами у вигляді іскри, яка за достатньої потужності джерела струму переходить в електричну дугу.

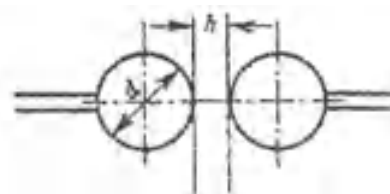


Рис. 7.20. Газовий проміжок між кульковими електродами

4. Оптичні, фотоелектричні і термоелектричні явища в напівпровідниках, ефект Холла..

У випадках неоднорідного поля, розряд у газі спочатку виникає в місцях з високою напруженістю електричного поля (біля електродів з найбільшою кривизною поверхні, загострень і т. д.). Розряд спостерігається у вигляді світло-фіолетового світіння в шарі повітря біля електрода з меншим радіусом, супроводжується характерним шипінням (потріскуванням) і утворенням озону O_3 та оксиду азоту NO . У газі виникає коронуючий розряд (корона). За подальшого підвищення напруги розміри корони зростають і відбувається іскровий або дуговий розряд між електродами, тобто повний пробій газового проміжку між ними.

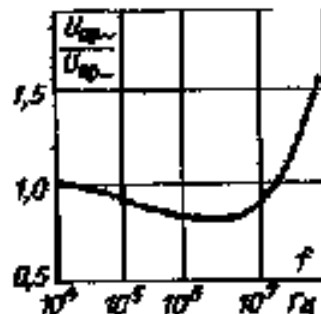


Рис. 7.21. Відношення величини пробивної напруги газового проміжку за змінної напруги до пробивної напруги цього ж проміжку за постійної напруги

Пробивна напруга залежить від частоти електричного струму (рис. 5.21) та тиску газу (рис. 5.22). Пробій газу настає за дуже короткий час (мікросекунди), тому амплітудне значення пробивної напруги змінного струму з частотою менше тисячі герц практично дорівнює значенню пробивної напруги за постійного струму (див. рис. 5.21). Із зростанням частоти пробивна напруга спочатку дещо знижується, але потім зростає.

Зменшення тиску газу знижує значення пробивної напруги до мінімуму (рис. 5.22), після якого пробивна напруга зростає в міру збільшення розрідженості газу. Така залежність пояснюється двома чинниками:

- значенням енергії, якої досягають заряджені частинки під дією поля на момент зіткнення з нейтральними молекулами;

ймовірністю зіткнення заряджених частинок з нейтральними.

У полі напруженістю E кінетична енергія зарядженої частинки W в момент зіткнення з нейтральною молекулою становить:

$$W = E g \lambda, \quad (5.3)$$

де g - заряд частинки, λ - середня відстань, яку проходить заряджена частинка до зіткнення. Якщо енергія W досягає значення "порогу іонізації" W_i , тобто стає достатньою для розділення зустрічної молекули на електрон та іон, то за $W \gg W_i$ може виникнути пробій газу, тому що новоутворені внаслідок іонізації заряджені частинки також будуть розганятись полем до значень W_i й іонізувати інші молекули. Процес розвиватиметься до повного пробію газового проміжку між електродами.

Із зростанням тиску газу зменшується середня відстань між молекулами, а значить і λ . Через це виконання умови пробію (5.3) настає при значному збільшенні E . У високому вакуумі, навпаки, і збільшується, але одночасно зменшується ймовірність зіткнення заряджених частинок з нейтральними молекулами розрідженого газу. Вплив останнього чинника переважає і пробій газу відбувається за більших значень E . Очевидно, що за певного значення тиску газу співвідношення вказаних чинників таке, що пробій газу настає за мінімальних значень E (мінімум на кривій, рис. 5.22).

Експериментально встановлено, що в однорідному полі значення пробивної напруги газового проміжку визначається законом Пашена:

$$U_{пр} = A \cdot p \cdot h,$$

де A - величина, залежна від тиску газу p і товщини шару газу h .

Таким чином, пробивна напруга будь-якого газу зростає із збільшенням тиску газу p і товщини шару газу h між електродами (рис. 5.23). При зменшенні p і h пробивна напруга зменшується до мінімального значення, після чого починає зростати (ліва частина U-подібної кривої).

Лекція 9

Тема: напівпровідникові матеріали

Основні особливості напівпровідників

Показник провідності становить близько $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при температурі 180 градусів). Якщо порівнювати з металами, то у напівпровідників відбувається зменшення питомої провідності при зростанні температури. Така ж властивість є у діелектриків. У напівпровідникових матеріалів є досить сильна залежність показника питомої провідності від кількості і типу домішок.

Припустимо, якщо ввести в чистий германій всього тисячну частку миш'яка, відбудеться збільшення провідності приблизно в 10 разів. Всі без винятку напівпровідники чутливі до впливів ззовні - ядерного опромінення, світла, електромагнітних полів, тиску тощо. Можна навести приклади напівпровідникових матеріалів - це сурьма, кремній, німеччин, телур, фосфор, вуглець, миш'як, йод, бор, а також різні сполуки цих речовин.

Особливості застосування напівпровідників

Завдяки тому, що у напівпровідникових матеріалів такі специфічні властивості, вони отримали досить широке поширення. На їх основі виготовляють діоди, транзистори, симістори, лазери, тиристори, датчики тиску, магнітного поля, температури тощо. Після освоєння напівпровідників відбулося докорінне перетворення в автоматиці, радіотехніці, кібернетиці та електротехніці. Саме за допомогою використання напівпровідників вдалося досягти таких маленьких габаритів техніки - немає потреби використовувати масивні блоки живлення і радіолампи розміром з півторалітрову банку.

Струм у напівпровідниках

У провідниках струм визначається тим, куди рухаються вільні електрони. У напівпровідникових матеріалах вільних електронів дуже багато, на це є причини. Всі валентні електрони, які є в напівпровіднику, не вільні, так як вони зв'язуються зі своїми атомами.

У напівпровідниках струм може з'являтися і змінюватися в досить широких межах, але тільки при наявності впливу ззовні. Струм змінюється при нагріванні, опроміненні, введенні домішок. Всі впливи здатні значно збільшити у валентних електронів енергію, що сприяє їх відриву від атомів. А докладена напруга змушує ці електрони переміщатися в певному напрямку. Іншими словами, ці електрони стають носіями струму.

Дірки в напівпровідниках

При підвищенні температури або інтенсивності зовнішнього опромінення відбувається збільшення кількості вільних електронів. Отже, збільшується струм. Ті атоми в речовині, які втратили електрони, стають позитивними іонами, вони не переміщуються. Із зовнішнього боку атома, з якого пішов електрон, залишається дірка. У неї може стати інший електрон, який покинув своє місце в атомі поблизу. У результаті цього на зовнішній частині у сусіднього атома утворюється дірка - він перетворюється на іон (позитивний).

Якщо до напівпровідника докласти напругу, то електрони почнуть рухатися від одних атомів до сусідніх у певному напрямку. Дірки ж почнуть переміщатися в зустрічному напрямку. Дірка - це позитивно заряджена частинка. Причому заряд у неї по модулю такий же, як у електрона. За допомогою такого визначення можна суттєво спростити аналіз усіх процесів, які протікають у напівпровідниковому кристалі. Струм дірок (позначається I_D) - це переміщення частинок у напрямку, зворотному руху електронів.

Електронно-дірочний перехід

У напівпровідника є два типи електропровідності - електронна і дірочна. У чистих напівпровідниках (без домішок) у дірок та електронів концентрація (N_D і N_E відповідно) однакова. З цієї причини така електропровідність називається власною. Сумарне значення струму дорівнюватиме:

$$I = I_E + I_D.$$

Але якщо врахувати той факт, що в електронів значення рухливості більше, ніж у дірок, можна прийти до такої нерівності:

$$I_E > I_D.$$

Рухливість заряду позначається буквою M , це одна з головних властивостей напівпровідників. Рухливість - це відношення двох параметрів. Перший - швидкість переміщення носія заряду (позначається буквою V з індексом "Е" або "Д", залежно від типу носія), другий - це напруженість електричного поля (позначається буквою E). Можна висловити у вигляді формул:

$$M_E = (V_E / E).$$

$$M_D = (V_D / E).$$

Рухливість дозволяє визначити шлях, який проходить дірка або електрон за одну секунду при значенні напруженості 1 В/см. можна тепер обчислити власний струм напівпровідникового матеріалу:

$$I = N * e * (M_E + M_D) * E.$$

Але потрібно відзначити, що у нас є рівності:

$$V_E = M_E.$$

$$N = N_E = N_D.$$

Напівпровідникові прилади

Відразу можна навести приклади напівпровідникових приладів - це транзистори, тиристори, діоди, і навіть мікросхеми. Звичайно, це далеко не повний список. Щоб виготовити напівпровідниковий прилад, потрібно використовувати матеріали, у яких провідність дирошна або електронна. Щоб отримати такий матеріал, необхідно в ідеально чистий напівпровідник з концентрацією домішок менше 10-11% ввести добавку (її називають легуючою домішкою).

Ті домішки, у яких валентність виявляється більшою, ніж у напівпровідника, віддають вільні електрони. Ці домішки називаються донорами. А ось ті, у яких валентність менша, ніж у напівпровідника, мають властивість хапати і утримувати електрони. Їх називають акцепторами. Для того щоб вийшов напівпровідник, який буде володіти лише провідністю електронного типу, у вихідний матеріал достатньо ввести речовину, у якій валентність буде всього на одиницю більше. Для прикладу напівпровідників у фізиці шкільного курсу розглядається німеччина - його валентність дорівнює 4. До нього додається донор - фосфор або сурьма, у них валентність дорівнює п'яти. Металів-напівпровідників небагато, вони практично не використовуються в техніці.

При цьому 4 електрони в кожному атомі здійснюють установку чотирьох парних (ковалентних) зв'язків з німеччиною. П'ятий електрон не має такого зв'язку, а значить, він у вільному стані. І якщо докласти до нього напругу, він буде утворювати електронний струм.

Струми в напівпровідниках

Коли струм електронів більший, ніж дірок, напівпровідник називають n-типу (від 'ємного'). Розглянемо приклад - в ідеально чистий германій вводять трохи домішки акцептора (припустимо, бір). При цьому кожен атом акцептора почне встановлювати ковалентні зв'язки з німеччиною. Але ось четвертий атом німеччина не має зв'язку з бором. Отже, у певної кількості атомів німеччина буде мати тільки один електрон без зв'язку ковалентного типу.

Але досить незначного впливу ззовні, щоб електрони почали залишати свої місця. При цьому у німеччині утворюються дірки.

За малюнком видно, що на 2, 4 і 6 атомах вільні електрони починають приєднуватися до бору. З цієї причини не створюється струм у напівпровіднику. На поверхні атомів німеччина утворюються дірки з номерами 1, 3 і 5 - з їх допомогою відбувається перехід на них електронів від розташованих поруч атомів. На останніх же починають з'являтися дірки, оскільки електрони з них відлітають.

Кожна дірка, яка виникає, почне переходити між атомами німеччина. При впливі напруги дірки починають рухатися впорядковано. Іншими словами, в речовині з'являється струм дірок. Такий тип напівпровідників називається дірочним або р-типу. При впливі напруги рухаються не тільки електрони, а й дірки - вони зустрічають на своєму шляху різноманітні перешкоди. При цьому відбувається втрата енергії, відхилення від початкової траєкторії. Іншими словами, заряд носіїв розсіюється. Все це відбувається через те, що в напівпровіднику містяться забруднюючі домішки.

Вольт-амперна характеристика

Трохи вище були розглянуті приклади речовин-напівпровідників, які використовуються в сучасній техніці. У всіх матеріалів є свої особливості. Зокрема, одна з ключових властивостей - це нелінійність вольт-амперної характеристики.

Іншими словами, коли відбувається збільшення напруги, яке прикладається до напівпровідника, відбувається швидке зростання струму. Опір при цьому різко зменшується. Така властивість знайшла застосування в різноманітних вентилях розрядниках. Приклади неупорядкованих напівпровідників можна більш детально розглянути в спеціалізованій літературі, їх застосування суворо обмежене.

Хороший приклад: при робочому значенні напруги у розрядника опір високий, тому від ЛЕП струм не йде в землю. Але як тільки провід або опору вдаряє блискавка, опір дуже швидко зменшується практично до нуля, весь струм йде в землю. І напруга знижується до нормального значення.

Симетрична ВАХ

Коли відбувається зміна полярності напруги, в напівпровіднику струм починає протікати в зворотному напрямку. І змінюється він за тим же законом. Це говорить про те, що напівпровідниковий елемент має симетричну вольт-амперну характеристику. У тому випадку, якщо одна частина елемента має дірочний тип, а друга - електронний, то на кордоні їх зіткнення з'являється р-п-перехід (електронно-дірочний). Саме такі переходи є у всіх елементах - транзисторах, діодах, мікросхемах. Але тільки в мікросхемах на одному кристалі збирається відразу кілька транзисторів - іноді їх кількість більше десятка.

Як відбувається освіта переходу

А тепер давайте розглянемо, як відбувається освіта р-п-переходу. Якщо контакт дірочного та електронного напівпровідників не дуже якісний, то відбувається освіта системи, що складається з двох областей. Одна матиме дірочну провідність, а друга - електронну.

І електрони, які знаходяться в п-області, почнуть дифундувати туди, де їх концентрація менше - тобто, в р-область. Одночасно з електронами дірки рухаються, але напрямом у них зворотний. При взаємній дифузії відбувається зменшення концентрації в п-області електронів і в р-області дірок.

Основна властивість р-п-переходу

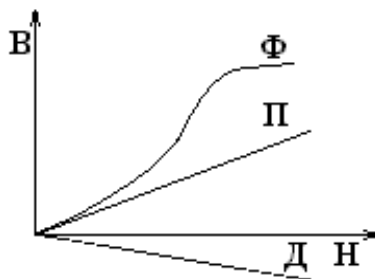
Розглянувши приклади провідників, напівпровідників і діелектриків, можна зрозуміти, що властивості у них різні. Наприклад, основна якість напівпровідників - це можливість пропускання струму тільки в одному напрямку. З цієї причини прилади, виготовлені з використанням напівпровідників, набули широкого поширення у випрямниках. На практиці, використовуючи кілька вимірювальних приладів, можна побачити роботу напівпровідників і оцінити масу параметрів - як в режимі спокою, так і при впливі зовнішніх "подрозників".

Лекція 10

Тема: матеріали для електронної техніки

Магнітні характеристики матеріалів

По відношенню до магнітного поля, розрізняють: 1.слабомагнітні (парамагнетики, діамагнетики); 2.сильномагнітні (феромагнетики)



де **H** – напруженість магнітного поля;
B – магнітна індукція

По відношенню до електричного поля матеріали поділяються на провідники, н/п, д/е.

За основу класифікації беруть питомий електричний опір

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

де для провідників: R – опір, S – площа поперечного перерізу, l – довжина провідника; для н/п і діелектриків: R – об'ємний опір, S – площа провідникового покриття, l – відстань між діелектриками.

Матеріал	ρ [Ом× м]	α [град ⁻²]	тип електропровідності
Провідники	$10^{-8} \div 10^{-5}$	> 0	електронний
Напівпровідники	$10^{-6} \div 10^8$	< 0	електронний дірковий
Діелектрики	$> 10^7$	< 0	електронний іонний

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{\rho_T - \rho_0}{(T - T_0) \rho_0} = \left[\frac{1}{\text{градус}} \right]$$

Механічні властивості

Твердість – це здатність матеріала протистояти проникненню іншого більш твердого тіла.

Пластичність – відносне видовження перед розривом

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

Характеристика міцності – випробування на розтяг

$$\sigma_p = \frac{F}{S_0} \left[Pa, \frac{H}{m^2} \right] \frac{\text{сила при якій утворилася шийка розриву}}{\text{площа поперечного перерізу}}$$

Випробування на в'язкість – проводиться на маятникові Копра.

Матеріали високої провідності

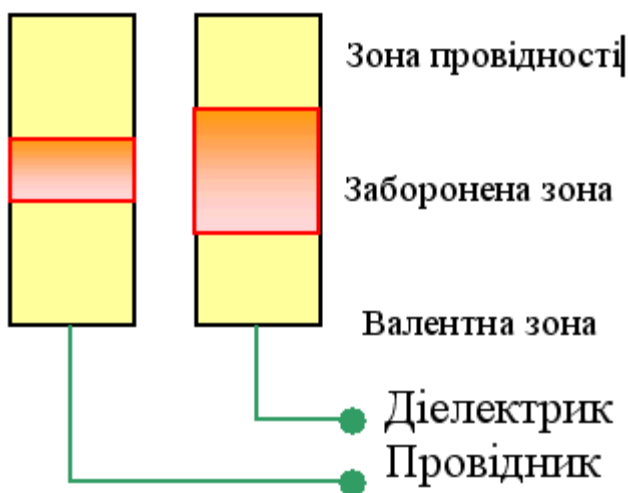
Назва	Питомий опір ρ 10^{-6}
Ag	0,016
Cu	0,0172
Au	0,024
Al	0,028

Напівпровідники

Домішкова провідність – служить для підвищення електропровідності напівпровідника.

Донорні домішки. Якщо в кристалічну решітку германію (4х валентний) ввести атом миш'яку (5ти валентний), то для 1го електронна нехватає пари і він стає вільним. При цьому концентрація вільних електронів зростає. "**n** – **провідність**."

Акцепторні домішки. Якщо в кристалічну решітку германію (4х валентний) ввести індій (3х валентний), то для одного електрона германію не вистачає 1го електрона і в кристалічній решітці напівпровідника утворюється дірка. "**p** – **провідність**."



Провідність металу залежить від розмірів забороненої зони.

Заборонена зона:

» 0 еВ – провідник

< 2 еВ – н/провідник

> 2 еВ – діелектрик

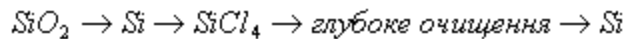
Методи отримання напівпровідників

Схема технологічного процесу

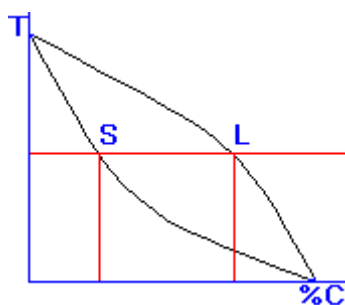
1. Добування н/п матеріала з природної сировини
2. Хімічне та металургічне очищення
3. Вирощування монокристала та легування

Хімічний метод очищення

- Це синтез таких сполук, що можна легко очистити від домішок (голоїдні сполуки {Cl, Br, I}), глибоке очищення і подальше відновлення вихідного продукту.



Металургічний метод



- Полягає в багаторазовій перекристалізації злитка основної речовини хляхом послідовного розплавлення його ділянок, при цьому внаслідок нерівномірного розподілу домішок в твердій і рідкій частині злитка, відбувається відтіснення (дифузія) домішок в кінець злитка.

Cs – Концентрація домішок в твердій фазі

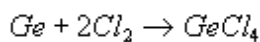
CL – Концентрація домішок в рідкій фазі

K – коефіцієнт сегригації.

$$K = \frac{C_s}{C_L}$$

Технологія отримання германію

Хлорування германієвого концентрату з метою отримання тетра хлориду германія

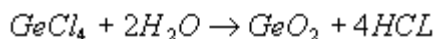


Глибоке очищення методами:

а) екстракція – це розчинення в HCl; відокремлення хлоридів домішок від .

б) ректифікація – це випаровування і багаторазове промивання парів проти течії, заснованих на різниці температур кипіння та хлоридів домішок.

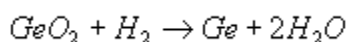
в) гідроліз з метою отримання товарної двоокисі $\text{Ge} - \text{GeO}_2$



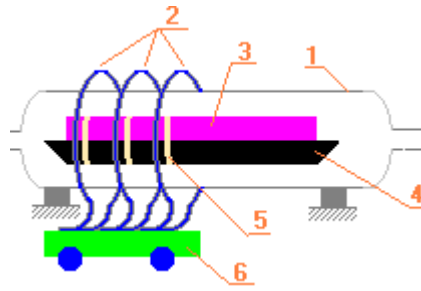
GeO_2 - це порошок.

Потім визначають його питомий отвір і косвено визначають ступінь чистоти.

Водневе відновлення GeO_2 з метою отримання полікристалічного злитку



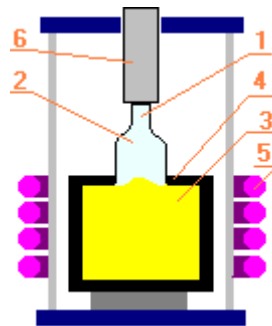
Металургічне очищення методом зонної плавки.



1. Кварцева труба;
2. Витки ВЧ індуктора;
3. Зликок очищеного германію;
4. Графітовий човник;
5. Зони плавки в площині витків;
6. Пересувна каретка, на якій закріплено витки;

Вирощування монокристалів та легування

Метод Чохральського



1. Затравка
2. Монокристал
3. Розплав
4. Тігель з графіту
5. ВЧ індуктор
6. Шток

Основи сучасної теорії феро- і феримагнетизму.

План

1. Класифікація матеріалів за магнітними властивостями.
2. Природа феромагнітного стану.
3. Процеси у разі намагнічування феромагнетиків.
4. Магнітний гістерезис.
5. Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків.

1. Класифікація матеріалів за магнітними властивостями.

Полімери. Високомолекулярні діелектрики за звичайних різниць потенціалів практично неелектропровідні і тільки за дуже високих напруг у них може виникнути пробій. Завдяки доброму поєднанню високих електроізоляційних і механічних властивостей, підвищеній стійкості до дії агресивних середовищ, технологічності, високомолекулярні полімерні матеріали широко застосовують як електроізоляційні матеріали в електротехніці.

Полімери складаються з великих макромолекул, в які входять від декількох тисяч до мільйонів молекул (мономерів) простих речовин. Процес з'єднання між собою мономерів однієї чи кількох речовин названо полімеризацією.

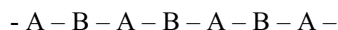
За полімеризації елементний склад полімерів такий самий як у мономерів, лише подвійні зв'язки мономерів зникають повністю або їх число різко зменшується.

Полімери, макромолекули яких утворилися з'єднанням між собою однакових мономерів речовини "А" у вигляді витягнутих ланцюжків або ниток (молекули мають лінійну структуру), названо лінійними.

Їх схематично зображають у вигляді



Лінійні полімери, синтезовані з мономерів різних речовин "А" і "В", названо співполімерами:

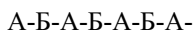


У макромолекулах полімерів молекули (мономери) міцно з'єднані між собою силами хімічного (ковалентного) зв'язку, а поперечні зв'язки між макромолекулами здійснюються набагато слабшими дисперсійними силами.

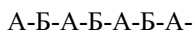
Лінійні полімери за відсутності поперечних хімічних зв'язків (тіиивань) за нагріву розм'якають, а при охолодженні знову тверднуть. У них поперечні зв'язки між лінійними макромолекулами (ланцюжками) слабкі. Зростання теплового руху за відповідного підвищення температури стає достатнім для розриву цих слабких зв'язків і для переміщення одного ланцюжка відносно сусіднього. До цього типу полімерів відносять поліетилен, полістирол, полівінілхлорид та ін. Це термопластичні полімери (термопласти).

Існує група полімерів, які за достатнього підвищення температури також розм'якають, але одночасно в них починають виникати додатково міцні поперечні хімічні зв'язки між ланцюжками (поперечне зшивання), внаслідок чого утворюються міцні простороні каркаси і відбувається незворотна зміна властивостей полімерів. За охолодження ці полімери тверднуть і вже не розм'якають при повторному нагріві. Достатньо висока температура спричинює деструкцію полімерів, вони розкладаються і обезвуглечуються. Це термореактивні полімери (реактопласти).

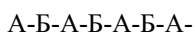
Число поперечних зшивань може бути незначне



вулканізований каучук



Пбо повне



I I I I I I I

Г- В-Г-В-Г-В-Г (наприклад бакаліт)

I I I I I I I

А-Б-А-Б-А-Б-А-

2. Природа феромагнітного стану.

Належність матеріалу до термопластичних, чи термореактивних полімерів легко визначити: якщо полімер за нагріву розм'якає, значить це термопласт, якщо ні - реактопласт.

Тверді термопластичні полімери (термопласти). Полімеризуватись можуть тільки такі речовини (мономери), в молекулах яких наявні кратні зв'язки, або циклічні групи. За рахунок цих зв'язків (або за рахунок розкриття циклу) у молекулах вихідної речовини (речовин) утворюються вільні валентності, якими молекули з'єднуються між собою у макромолекули.

Поліетилен. Найпростішим прикладом процесу полімеризації може служити синтез із газоподібного етилену $H_2C = CH_2$ (з одним подвійним зв'язком $C = C$ у молекулі) твердого полімеру поліетилену. Внаслідок розриву в молекулі етилену одного з двох зв'язків утворюється бірадикал з двома ненасиченими валентностями. Цими валентностями бірадикали зв'язуються між собою у великі макромолекули

H H H H

I I I I

...-C-C-C-C-...

I I I I

H H H H

які мають вигляд ланцюжків. Ланцюжок складається з однакових молекул етилену $(-H_2C-CH_2-)_n$, але зі змінним характером зв'язку між атомами С (замість подвійного зв'язку $C = C$ є простий зв'язок $C - C$). Зображена схема будови молекули дещо спрощена, тому що в ланцюжку наявне також незначне число бокових відгалужень $(-CH_3, -C_2H_5$ та ін.).

Поліетилен - твердий непрозорий матеріал світло-сірого або білого кольору.

Залежно від технології виробництва отримують поліетилен високого (ПЕВТ), середнього (ПЕСТ) і низького (ПЕНТ) тиску.

ПЕВТ виготовляють за високих тисків (до 300 МПа) і температур 180-200°C в присутності незначної кількості кисню (0,005%). Має відносно невисоку густину (920-930 кг/м³) і температуру плавлення (105-110°C), теплостійкість (за Мартенсом) 55-60°C, міцність при розриві 7-14 МПа.

ПЕСТ отримують за тиску 3-7 МПа і температури до 200°C, каталізатори полімеризації - оксиди хрому CrO_3 , молібдену MoO_3 . Густина 940 кг/м³, теплостійкість 85°C, температура плавлення 130°C, міцність 20-23 МПа.

ПЕНТ отримують за тиску 0,3-0,6 МПа і температури 60°C в присутності каталізаторів. Температура його плавлення 125°C, теплостійкість 70°C, густина 960 кг/м³, міцність 27-33 МПа.

3. Процеси у разі намагнічування феромагнетиків.

У поліетиленах міститься 55-90% кристалічної фази. Вони дуже пластичні. Видовження за розриву в межах 150-600%, холодостійкість мінус 60°C, при ударах не ламаються.

За кімнатної температури поліетилени не розчиняються в органічних розчинниках, стійкі до дії кислот, лугів, води, спиртів, ацетону. При 70°C починають набухати і розчинятися у ксилолі, бензолі, чотирихлористому вуглеці і мінеральних оливах. Поліетилени малопроникні для води та інших полярних рідин, їх водопоглинання менше 0,004% за 30 діб перебування у воді.

Поліетилен різних типів широко використовуються в ізоляції кабелів, а з ПЕВТ виготовляють електроізоляційні напівпрозорі плівки товщиною 30-200мкм і шириною від 1 до 1,5м, стрічки їм інші вироби. Технологія переробки ПЕВТ у вироби простіша, ніж технологія переробки поліетилену інших типів.

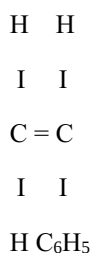
Поліетилен випускають у гранулах, вироби з яких дістають методом лиття під тиском, гарячим пресуванням та екструзією. Методом екструзії виготовляють різні ізоляційні шланги, трубки, наносять поліетиленову ізоляцію на провід. З більш твердих ПХТ і ПЕНТ виготовляють плати, каркаси котушок та ін.

Поліетилен мають низьку нагріву стійкість і при тривалому нагріві та доступі повітря окислюються, особливо за одночасного освітлення. Теплове старіння поліетиленів сповільнюється введенням в їх склад ароматичних речовин - антиокислювачів. Старіння під дією світла зменшується за добавки до 2% сажі. Однак сажа знижує електроізоляційні властивості поліетиленів, вони стають непридатними для електричної ізоляції, проте можуть застосовуватись для захисних оболонок кабельних виробів.

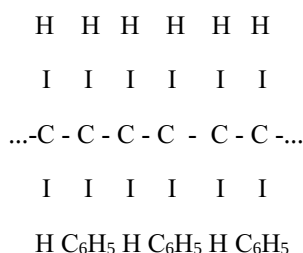
Нагрівостійкість поліетилену суттєво зростає під впливом іонізуючого опромінення, яке спричинює часткове зшивання ланцюжків макромолекул і утворення просторових структур. Опромінений у деформованому стані поліетилен внаслідок осідання за відповідного нагріву відновлює форму і розміри виробу до вихідних значень (існуючих до опромінення). Таке термоосідання використовують в електроізоляційних трубках, муфтах, герметичних покриттях навілок. Вироби після монтажу і нагріву осідають, внаслідок чого ізоляція щільно обтискує провідники. Навивка опроміненою поліетиленовою плівкою в кілька шарів після термоосідання стає майже монолітною внаслідок щільного з'єднання між собою окремих шарів.

Для отримання пористого поліетилену з малою об'ємною масою і низькою діелектричною проникністю (1,4-1,5), придатного і для радіочастотної електричної ізоляції, у поліетилен вводять порофори, які за нагрівання розкладаються з виділенням газів та утворенням рівномірно розподілених по всій товщі матеріалу пор. Подібним способом можна виготовляти пористі матеріали з інших полімерів.

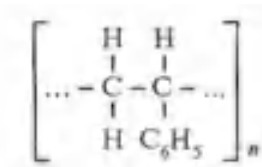
Полістирол. За полімеризації стирулу-рідкого насиченого вуглеводню C_8H_8 з будовою молекули



один зв'язок між сусідніми атомами вуглецю в молекулі стирулу розривається, виникають вільні зв'язки і відбувається з'єднання між собою багатьох молекул стирулу й утворення полістиролу



Макромолекулу полістиролу можна розглядати як ланцюжок однакових молекул (мономерів) стирулу зі зміненим зв'язком між атомами вуглецю - замість подвійного зв'язку $C = C$ в молекулі стирулу залишається простий зв'язок $C - C$.



де n - ступінь полімеризації, тобто число молекул стирулу, об'єднаних в одну макромолекулу полістиролу.

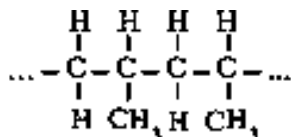
Густий прозорий полістирол розливають у підігріті скляні форми, в яких завершується процес полімеризації. У такий спосіб дістають твердий прозорий матеріал у вигляді пластин і стрижині. Полістирол отримують також у гранулах або у вигляді порошку (емульсійний полістирол).

Полістирол розм'якає за 110-120°C. Розчиняється в неполярних рідинах: бензолі, ксилолі, чотирихлористому вуглеці та деяких інших. Його основні характеристики: густина 1050кг/м³; $\sigma_p = (30-50)$ МПа, теплостійкість 75-80°C; $\alpha = 12-18$ кДж/м², поглинання 0,03% маси; холодостійкість - 60°C, $\rho_v = 10^{13}-10^{14}$ мм; $\epsilon = 2,4$; $\text{tg}\delta = (2-4)10^{-4}$; $E_{\text{міц}} = 25-30$ МВ/м.

Витягуванням полістиролу отримують гнучкі плівки товщиною 20-100мкм і шириною 10-300мм. Електрична міцність полістирольних плівок висока: $E_{\text{міц}} = 80-100$ МВ/м. Їх застосовують для ізоляції жил височастотних кабелів і у виробництві конденсаторів.

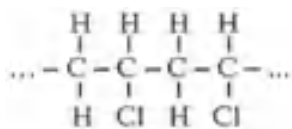
Висока крихкість виробів з полістиролу усувається в сумішах полістиролу із синтетичними каучуками, з яких отримують удароміцні полістироли. З полістиролу виготовляють ізоляційні панелі, каркаси котушок, ізолятори для електровимірювальних приладів.

Поліпропілен отримують полімеризацією пропілену $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-]$. Структура поліпропілену характеризується відносно правильним розміщенням у просторі бокових груп - CH_3 і атомів - H:



Густина поліпропілену 900кг/м³, відносне видовження за розтягу у досягає 500-600%, температура плавлення 160-170°C. За тривалої дії бензину і бензолу набухає, а при 100°C розчиняється в ароматичних вуглеводнях, бензолі, толуолі. Електроізоляційні властивості поліпропілену близькі до властивостей поліетилену.

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) отримують у вигляді порошку білого кольору полімеризацією мономеру вінілхлориду $\text{H}_2\text{C} = \text{CHCl}$. Його структурна формула



Гарячим пресуванням порошку полівінілхлориду дістають твердий, жорсткий матеріал - вініпласт у вигляді листів, пластин, стрижнів, труб або готових виробів (плати, баки для акумуляторів та ін.). Вироби з вініпласту легко формуються в металевих формах при 150-160°C, добре зварюються, склеюються, обробляються механічно (обточуються, свердяться, фрезеруються тощо), мають високу механічну міцність та ударну в'язкість.

Основні характеристики: $\rho_v = 10^{10}-10^{12}$ Омм; $\epsilon = 4$; $\text{tg}\delta = 0,01-0,02$; $E_{\text{міц}} = 20-22$ МВ/м; теплостійкість (за Мартенсом) 60-70°C; холодостійкість мінус 15-25°C; водопоглинання 0,4-0,6%. Розкладання вініпласту настає за температури 180-200°C.

Поліхлорвініл - полярний діелектрик, стійкий до дії води, лугів, розбавлених кислот, олив, бензину і спиртів.

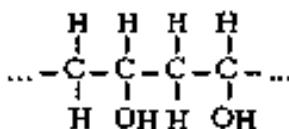
Використовується для виготовлення пластичних мас, гумоподібних виробів та ін.

Полівінілхлоридний пластикат отримують у вигляді гнучкого, еластичного рулонного матеріалу - стрічок товщиною 0,8-2,5мм і шириною до 400мм, а також листів товщиною 1-5мм кількаретивним пропусканням між нагрітими вальцями суміші порошкоподібного поліхлорвінілу з пластифікаторами, наповнювачами, термостабілізаторами і барвниками.

Барвники (червоний, синій, жовтий та ін.) вводять для розпізнавання проводів при монтажі і для захисту матеріалу від світлового старіння. Основні характеристики: $\rho_v = 10^8-10^{12}$ Омм; $\epsilon = 4-6$; $\text{tg}\delta = 0,05-0,08$; $E_{\text{міц}} = 15-25$ МВ/м; холодостійкість мінус 40-50°C; температура розкладання 200-250°C, водопоглинання 0,2-0,5%.

Полівінілхлоридний пластикат застосовують як основну ізоляцію монтажних проводів, для виготовлення гнучких ізоляційних трубок, захисних оболонок шлангів кабелів і липких ізоляційних стрічок. Пластикат припиняє горіти після винесення його з полум'я.

Полівініловий спирт. Синтетичний полімер білого кольору з будовою молекули



Стійкий в розбавлених кислотах і лугах. Широко застосовується для виготовлення емаль-лаків, які мають високу механічну міцність. Внаслідок сильно вираженої полярності, високого $\text{tg}\delta$ і розчинності у воді полівініловий спирт майже не застосовується як електрична ізоляція.

Поліізобутилен - полімер ізобутилену $\text{H}_2\text{C} = \text{C}(\text{CH}_3)_2$

Це липка каучукоподібна високомолекулярна речовина (молекулярна маса до 400000), холодостійка (до -80°C) і маловологопроникна. Для підвищення твердості поліізобутилен змішують з поліетиленом, вводять у нього наповнювачі.

Капрон належить до групи синтетичних матеріалів - поліаміни, в молекулу яких входять амідні групи - CO - NH -. Це тверді синтетичний матеріал білого або світло-жовтого кольору, який добувають полімеризацією капролактаму. Розплавлений Капрон витискають з автоклава у вигляді вузької стрічки у воду, промивають, подрібнюють, просушують і зберігають у гумових мішках для захисту від водопоглинання. Температура плавлення капрону близько 215°C ; водопоглинання 3% маси; $\rho_v = 10^{11}\text{-}10^{12}\text{Омм}$; $\epsilon = 4$; $\text{tg}\delta = 0,04$; $E_{\text{міц}} = 18\text{-}20\text{ МВ/м}$.

Капрон широко застосовується у виробництві електромонтажних і конструкційних деталей, а капронове волокно - як ізоляція обмоткових проводів і як основа електроізоляційних лакованих тканин.

Органічне скло (поліметилметакрилат) - термопластичний прозорий матеріал (пропускає до 92% променів видимої області спектра), легко забарвлюється.

Отримують з рідкої речовини метилметакрилату з добавками перекису бензолу (0,1%) і пластифікуючих речовин, які зменшують його крихкість. Суміш вихідних компонентів перемішують, підігрівають і розливають у нагріті до 120°C металічні або із силікатного скла форми. Випускають у вигляді листів. Порошок органічного скла отримують полімеризацією метилметакрилату у водному розчині лужних речовин.

Основні характеристики органічного скла: теплостійкість (за Мартенсом) $60\text{-}80^\circ\text{C}$; холодостійкість мінус $50\text{-}60^\circ\text{C}$; $\rho_v = 10^{10}\text{-}10^{11}\text{Омм}$; $\epsilon = 3,6$; $\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-2}$; $E_{\text{міц}} = 15\text{-}18\text{ МВ/м}$. Органічне скло стійке проти розбавлених кислот, лугів, бензину і мінеральних олів. Розчиняється в ароматичних вуглеводнях (бензолі, толуолі, ксилолі), хлорбензолі, ацетоні та в деяких інших розчинниках.

Органічне скло підлягає усім видам механічної обробки, легко склеюється дихлоретановим клеєм, зварюється при температурі $140\text{-}150^\circ\text{C}$ і стисканні поверхонь які зварюють. Із нагрітого ($115\text{-}135^\circ\text{C}$) скла легко формують у пресформах або під вакуумом різні вироби.

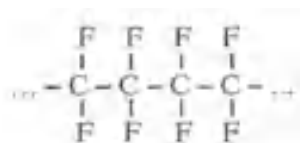
Поліформальдегід отримують у вигляді порошку білого кольору полімеризацією газоподібного формальдегіду. З порошку литтям під тиском або екструзією виготовляють вироби. Завдячуючи високому вмісту кристалічної фази (75%) матеріал має підвищені механічні характеристики і чітко виражену температуру плавлення (180°C). Характеризується підвищеною твердістю, стійкістю проти стирання і низьким коефіцієнтом тертя. З поліформальдегіду виготовляють безшумні шестерні, черв'ячні передачі й підшипники.

Вироби з поліформальдегіду можуть експлуатуватись за температур до 100°C , є волого та хімічно стійкі, стійкі проти іскрових розрядів, мають добрі електричні характеристики і піддаються усім видам механічної обробки. З нього виготовляють ізоляційні основи, каркаси котушок та ін.

Фторорганічні полімери. Фторопласт-4 (фторлоп-4) отримують полімеризацією тетрафтор-етилену $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$

Внаслідок симетричності будови молекули фторопласт неполярний. Випускається у вигляді пухкого порошку білого або сіруватого кольору, пресуванням якого у сталених пресформах за кімнатної температури отримують вироби, які для надання їм щільності і монолітності спікають нагріванням у печах. Фторопласт-4 в зарубіжних країнах зустрічається під назвою "тефлон" або «дайфлон».

Характеристики фторопласту-4: $\rho_v = 10^{15}\text{-}10^{17}\text{Омм}$; $\epsilon = 2$; $\text{tg}\delta = (2\text{-}4)\cdot 10^{-4}$; $E_{\text{міц}} = 30\text{ МВ/м}$; (у плівок $E_{\text{міц}} = 100\text{-}180\text{ МВ/м}$; густина $2100\text{-}2300\text{ кг/м}^3$; холодостійкий (-269°C).



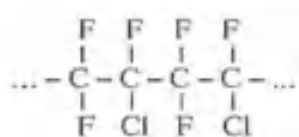
Будова молекули фторопласту-4

Фторопласт-4 надзвичайно хімічно стійкий, не піддається впливу сірчаної, соляної, азотної і плавикової кислот, лугів і за хімічною стійкістю перевищує золото і платину. Матеріал абсолютно негорючий, негігроскопічний та не змочується водою, смолами і лаками. Для покращення адгезійних властивостей поверхню фторопласту-4 активують:

- обробкою розчином металічного натрію у безводному аміаку або в тетрагідрофурані;
- тліючим розрядом у вакуумі. Активацією створюють на поверхні губчасту структуру, в пори якої проникає клеюча речовина.

За температури близько 330°C матеріал набуває прозорості, и за 415°C починає термічно розкладатись з відщепленням токсичного газоподібного фтору. Фторопласт-4 - дорогий матеріал і іастосовується у відповідальних випадках: за одночасної дії на ізоляцію високих або низьких температур, хімічно агресивних середовищ тощо.

Політрифтор хлор етилен - полімер трифторхлоретилену $F_2C = CFC1$, випускається під назвою фторлон-3 (фторопласт-3). Має несиметричну структуру молекули, оскільки атоми хлору більші від атомів фтору і є полярним діелектриком. Формула політрифторхлоретилену:



За нагрівостійкістю (близько 130°C), температурою розкладання (~300°C) і хімічною стійкістю фторлон-3 поступається фторопласту-4, а за радіаційною стійкістю переважає фторопласт-4. Технологія переробки фторлону-3 відносно проста.

Полііміди отримують поліконденсацією ангідриду піромеліто-вої кислоти та діамінів. Полііміди є хімічно стійкими діелектриками, не розчиняються у більшості органічних розчинників, стійкі в розведених кислотах, мінеральних оливах і воді.

Термопластичні полііміди використовують для виготовлення різних пластмасових виробів електроізоляційного та конструкційного призначення. Вироби мають високу нагрівостійкість (220 -250 °C) добрі електричні, механічні властивості та радіаційну стійкість. На основі поліімідів виготовляють емаль-лаки для емалювання обмоткових проводів, гнучкі напівпрозорі електроізоляційні плівки тощо.

Поліаміди - синтетичні полімери, в молекулах яких містяться амідні групи - CO - NH -; тверді роговидні чи прозорі склоподібні речовини, з розплавів, або розчинів яких методами екструзії отримують прозорі зносостійкі, стійкі в лугах і розчинниках прозорі поліамідні плівки. Їх використовують як електроізоляційний матеріал. З поліамідного волокна виготовляють тканини.

Гнучкі прозорі плівки товщиною до 0,02мм виготовляють з органічних полімерів і випускають в сувоях (рулонах). Завдяки високій електричній і механічній міцності їх широко застосовують для ізоляції електричних машин, кабелів, обмоткових проводів і як діелектрики конденсаторів.

Для електроізоляційної техніки важливі плівки з триацетату целюлози, які виготовляють як з різним вмістом пластифікаторів, так і без них. Плівки пластичні, їх відносне видовження в межах 15-20%. Значення є цих плівок ~3,6; $\text{tg}\delta = 0,007$; гігроскопічність 2-3%. Застосовуються для ізоляції секцій обмоток електричних машин і апаратів, а також деяких типів обмоткових проводів. Допустима довготривала робоча температура 90-100°C.

Триацетатні плівки дуже чутливі до тріщин на краях, які легко поширюються і руйнують їх. Тому плівки наклеюють на картон. Отриманий композиційний матеріал характеризується високою електричною та механічною міцністю і широко використовується в ізоляції електричних машин.

Високі електроізоляційні та механічні властивості мають полярні поліетилентерефталатні плівки (майлар, мелінекс та ін.). Ці плівки хімічно стійкі і нагрівостійкі. їх параметри: границя міцності 120-180 МПа, відносне видовження 50-100%; $p = 10_{14}\text{Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon = 3,0$; $\text{tg}\delta = 0,007$ (при 50 Гц); робоча температура від -60°C до + 150 °C.

Полікарбонатні плівки (макрофоль) мають кращі параметри: міцність 100-200 МПа, відносне видовження 300-40 %; $p = 10^{14}\text{-}10^{15}\text{Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon = 2,9$; $\text{tg}\delta = 0,006$ (при 50 Гц); $E_{\text{міц}} = 60\text{-}90 \text{ МВ/м}$ (за товщин плівки 0,1 мм).

Високою нагрівостійкістю (до 240 °C), низькою гігроскопічністю та високими електроізоляційними властивостями характеризуються поліімідні та плівки з політетрафторетилену. Широко застосовуються неполярні плівки з поліетилену, поліпропілену і полістиролу.

Пластичні маси (пластмаси, пластини). Це матеріали на основі природних або синтетичних полімерів, які здатні отримувати задану форму за нагріву під тиском і зберігати її після охолодження. Крім полімеру, що служить зв'язуючою

речовиною, пластмаси можуть містити наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, мастильні речовини, потверджувані, барвники та інші компоненти. Окремі види пластмас (поліетилен, полівінілхлорид та ін.) є чистими полімерами і називаються не заповненими пластмасами.

Пластмаси розрізняють за експлуатаційними властивостями (наприклад, електроізоляційні, вогнетривкі тощо), природою наповнювача (наприклад, склопласти, графітопласти) і способом його розміщення в матеріалі (наприклад, шаруваті пластики), а також за типом полімеру (амінопласти).

Залежно від характеру перетворень, що відбуваються з полімерами при формуванні, пластмаси підрозділяють на термопласти (найважливіші з них - на основі поліетилену, полівінілхлориду, полістиролу) і реактопласти (на основі резольних, кремнійорганічних, фенольних та інших смол). Основні методи переробки термопластів: У литво під тиском, екструзія, а реакторпластів: пресування і литво під тиском. З пластмас виготовляють різні вироби - корпуси електровимірювальних приладів, електричних апаратів, кнопки, ручки та ін.

Пластмаси широко застосовують в електротехніці як електроізоляційні і конструкційні матеріали. Вихідним матеріалом для виготовлення більшості виробів слугують преспорошки - подрібнені і старанно перемішані та висушені складові частини пластмас.

Пресування фасонних виробів здійснюють на гідравлічних пресах у виготовлених з твердої сталі прес-формах, робочі поверхні яких хромують. У прес-форму засипають (рис. 6.1) необхідну кількість прес-порошку.

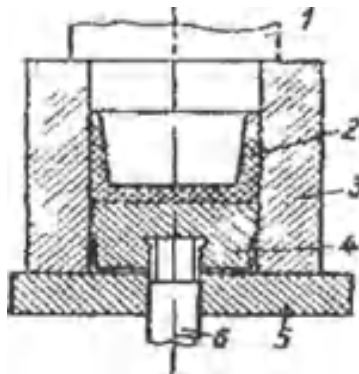


Рис. 6.1. Приклад конструкції прес-форми: 1 - верхній пуансон; 2 - виріб; 3 - матриця; 4 - нижній пуансон; 5 - плита преса; 6 - виштовхувач

Якщо пресування здійснюється за одночасного нагріву і тиску, то прес-форма підігрівається гарячою водою, парою та ін. Для підвищення продуктивності пресування широко застосовують попередній підігрів прес-порошку. Після завершення пресування виробів з термопластичного прес-порошку для запобігання деформації ще м'яких виробів їх охолоджують у пресформі, для чого через канали пресформи пропускають холодну воду. Вироби з термореактивного прес-порошку можна видаляти з прес-форми нагрітими. Видалення здійснюється виштовхуванням.

Литво під тиском використовують для виготовлення деталей з термопластів. Матеріал розм'якшують за межами прес-форми (у підігрітому циліндрі) і втискують у прес-форму поршнем (плунжером). З ходом поршня в один бік здійснюється заповнення порожнини циліндра, а в протилежний - пресування (рис. 6.2). Безперервний процес витискання розігрітої розм'якшеної термопластичної маси здійснюється шнеком (рис. 6.3). Цей спосіб (шприцювання, екструзія) застосовується для виготовлення с гризнів, труб та інших виробів з незмінним по всій довжині поперечним перерізом. Екструзія широко застосовується для накладання ізоляції і захисних оболонок з поліетилену, полівінілхлориду та інших термопластів на кабельні вироби.

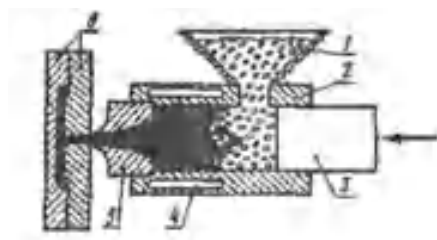


Рис. 6.2. Схема лиття пластмас під тиском: 1 - бункер; 2 - циліндр; 3 - поршень; 4 - нагрівані; 5 - перехідник; 6 - пресформа.

Більшість термопластів добре з'єднуються зварюванням за допомогою струменя гарячого повітря, нагрівом у височастотному полі. Застосовується також склеювання пластмас.

Фенопласти - пластмаси на основі фенол-формальдегідних смол.

Випускаються у вигляді прес-порошків (наповнювачі - дров'яна мука, каолін, графіт та ін.), шаруватих пластиків (наповнювач - папір, тканина), волокнітів (наповнювач - рублене волокно), газонаповнених пластиків - пінофенопластів. Використовуються як корозійно-трьивкі конструкційні матеріали.

Фенопласти та вироби з них завжди забарвлені в чорний або брунатний колір завдяки темному кольору фенол-формальдегідної смоли. Вони термостійкі, дугостійкі, добрі електроізолятори, тому з них виготовляють електротехнічні деталі (розетки, вимикачі) тощо.

Амінопласти (карбамідні пластики) - пластмаси на основі сечовино- або меланіно-формальдегідних смол.

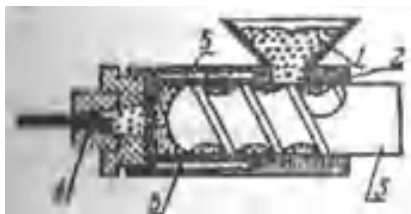


Рис. 6.3. Схема екструдера: 1 - бункер; 2 - циліндр: шнек; 4 - дорн; 5 - нагрівані

З прес-порошків на їх основі виготовляють, наприклад, корпуси телевізорів. Амінопласти термостійкі, завжди забарвлені в яскраві соковиті кольори, оскільки меланіно-сечовиноформальдегідні смоли, які є основою цього матеріалу, добре поєднуються з забарвлюючими добавками.

4. Магнітний гістерезис.

Міпора - пінопласт на основі сечовино-формальдегідної смоли, вогнетривкий тепло і звукоізоляційний матеріал (теплоізоляція холодильних камер, місткостей для перевезення рідкого кисню).

Шаруваті пластмаси складаються з шарів листового наповнювача (папір, бавовняна чи скляна тканина) і зв'язуючої речовини. Найширше застосовуються гетинакс, текстоліт і склотекстоліт.

Гетинакс - листовий шаруватий матеріал, наповнювачем якого є листи просоченого бакелітовими лаками паперу 0,1-0,12 мм завтовшки.

Листи після сушіння збирають у пакети і пресують нагрітими до 160 °С стальними плитами. Розплавлена смола склеює листи і переходить в неплавкий стан. Після охолодження листи і дошки гетинаксу обрізують з країв.

З гетинаксу виготовляють різні плоскі електроізоляційні деталі і основи. Дугостійкість гетинаксу невисока внаслідок утворення за іскрових розрядів на його поверхні науглецьованих слідів з високою провідністю. Нагрівостійкість гетинаксу до 105 °С, холодостійкість -65 °С. Гетинакс добре піддається різним видам механічної обробки (свердлінню, різанню та ін.).

Текстоліт - листовий шаруватий матеріал, в якому наповнювачем є бавовняна тканина.

Його технологія виготовлення така ж, як і гетинаксу. Текстоліт добре обробляється механічно, міцніший від гетинаксу, але дорожчий. Електричні характеристики текстоліту близькі до гетинаксу.

Склотекстоліт - шаруватий матеріал, в якому наповнювачем є безлужна скляна тканина, а зв'язуючим - фенол-формальдегідні, кремній органічні смоли та суміші кремнійепоксидних і кремнійорганічних смол.

Відрізняється склотекстоліт від текстоліту і гетинаксу кращими електричними і механічними характеристиками, але важче обробляється механічно.

Каучуки. Натуральний каучук (НК) добувають з молочного соку (латексу) рослин-каучуконосів.

Синтетичний каучук (СК) отримують зі спирту, нафти та природного газу.

Хімічний склад каучуку (C_5H_8), його будова характеризуються наявністю подвійних зв'язків $C = C$. Чистий каучук розм'якшується за нагріву до 50 °С, окрихчується за низьких температур, нестійкий до розчинників і тому малоприсадабний для електричної ізоляції. Розчин каучуку у бензині (гумовий клей) використовується для міцного склеювання гуми. Захисні оболонки кабелів виготовляються виключно на основі СК.

Кремнійорганічні каучуки відзначаються високою нагрівостійкістю (до 250°C), доброю холодостійкістю (від -70°C до -100°C) і електроізоляційними властивостями, але мають невисокі механічні характеристики та дорогі.

Електроізоляційні гуми. Основним компонентом усіх гум служить натуральний (НК) і синтетичний (СК) каучук. За вулканізації каучуку відбувається розрив подвійних зв'язків $C = C$ і зшивання ланцюжків атомами - S - з утворенням просторових структур. Для цього в каучук вводять сірку (1-3%) або тіурам. У результаті вулканізації отримують водостійкий, малогазопроникний вискоеластичний матеріал - гуму. Для надання гумі необхідних властивостей у вихідну гумову суміш вводять пришвидчувачі процесу вулканізації, наповнювані (крейду, тальк, каолін, вуглецеву сажу та ін.), протистаріючі домішки, іноді барвники.

Гумову суміш (сиру гуму) на екструзійних машинах наносять на жилу проводу або кабелю і вулканізують. Для цього вкриті шаром гуми проводи намотують на металічні барабани і завантажують у вулканізаційні котли, в які впускають насичену водяну пару або нагріте повітря. Для більшості гум вулканізацію проім дають за 140-160°C, а для гум на кремнійорганічному каучуку за 180-200°C. Тривалість процесу вулканізації становить 30-70 хв і більше. У процесі вулканізації гума стає вискоеластичною, міцною з достатньо високими електроізоляційними властивостями. Основні характеристики гум: $\rho_v = 10^{11}-10^{12}$ Ом·м; $\epsilon = 3,5-4,5$; $\tan \delta = 0,008-0,01$; $E_{міц} = 20-45$ МВ/м. Інтервал робочих температур гумової ізоляції на основі натурального і синтетичного каучуку лежить у межах від -70°C до +85 °C, а на основі кремнійорганічного каучуку - від -100° C до +200 °C.

Волокнисті матеріали. Волокнисті матеріали, завдячуючи дешевизні, досить високій механічній міцності і гнучкості, широко застосовують в електротехніці. Їх основу складають органічні бавовняні, паперові та інші матеріали (в основному з целюлози), шовк, штучні волокотримані переробкою головним чином целюлози і синтетичні волокна.

Суттєвим недоліком волокнистих матеріалів є їх висока гігроскопічність, невисока електрична міцність, теплопровідність, і нагрівостійкість. Ці недоліки значною мірою усуваються просоченням матеріалу та застосуванням синтетичних волокнистих матеріалів.

Текстури (картони) і папери виготовляють з технічно чистої целюлози, яку отримують з деревини хвойних порід. Для виготовлення електроізоляційних текстур і паперу використовують переважно сульфатну целюлозу жирного помолу, за якого відбувається лише розщеплювання на тонкі волокна (волокна механічно не руйнуються, а їхні капілярні канали залишаються закритими), і пісного помолу, за якого волокна целюлози розщеплюються переважно впоперек і відкриваються капілярні канали.

З целюлози жирного помолу з довгими і тонкими волокнами виготовляють гнучкий і міцний папір. З целюлози пісного помолу з короткими товстими волокнами отримують пухкий і дуже гігроскопічний папір з низькою механічною міцністю. Вологість паперів перебуває в межах 5-9 %. При її підвищенні погіршуються електроізоляційні властивості та міцність паперів.

Електроізоляційні папери ділять на кабельні, конденсаторні, просочувальні, намотувальні, мікастрічкові і креповані.

Кабельний папір застосовується для ізоляції кабелів високої напруги. Намотування паперу на кабельну жилу здійснюється з натягом, тому папір повинен бути міцний і гнучкий. З метою поліпшення електроізоляційних властивостей після намотування папір просочують електроізоляційною оливою. Електрична міцність непросоченого паперу невисока (6-9 МВ/м), а просоченого трансформаторною оливою 70 - 80 МВ/м. Перед просочуванням паперова ізоляція кабелів старанно просушується.

Кабельні папери маркують літерами К, КМ, КВ, КВУ, КВМУ, які означають: К - кабельний, М - багатошаровий, В - високовольтний, У - ущільнений, і цифрами від 15 до 240, які позначають номінальну товщину паперу в мікронах.

Конденсаторний папір, просочений діелектриком, використовується у паперових конденсаторах. Просочений нафтовою кон-ден-саторною оливою конденсаторний папір має підвищену електричну міцність (в межах 250 - 300 МВ/м), тоді як непросочений папір - 19-65 МВ/м.

Для виготовлення конденсаторного паперу використовується найбільш чиста сульфатна целюлоза. Товщина паперу є в межах 0,004-0,003мм, він випускається в бобінах шириною від 12 до 750 мм.

Просочувальний папір виробляють із сульфатної целюлози товщиною 0,09, 0,11, 0,13 мм і використовують для виготовлення електроізоляційної пластмаси-гетинаксу.

Намотувальний папір виробляють з невибіленої целюлози жирного помолу і застосовують при виготовленні циліндрів та ізоляційних трубок для трансформаторів і електричних апаратів.

Мікастрічковий папір виготовляється з довговолокнистої бавовни з орієнтацією волокна переважно вздовж довжини полотна паперу (для підвищення міцності) і застосовується для виробництва гнучкої слюдяної стрічки. Випускається мікастрічковий папір у рулонах 450 і 900 мм завширшки і товщиною 18-20 мкм.

Крепований папір має на поверхні креп (гофрування), нанесений перпендикулярно до напрямку полотна паперу, завдяки чому має гнучкість і добре розтягується (видовження 60 %) у поздовжньому напрямі. Застосовується для ізолювання відводів і з'єднань в обмотках трансформаторів та інших оливнонаповнених електричних апаратів. Випускається папір у рулонах 500 мм завширшки.

Бітуми - аморфні термопластичні матеріали чорного або темно-брунатного кольору, при низьких температурах крихкі і мають характерний злам у вигляді свища (виразки).

У їх склад входять складні суміші вуглеводнів. Бітуми добре розчиняються у таких вуглеводнях, як бензол, толуол, слабше у бензині. Нерозчинні у воді і спиртах, слабогігроскопічні.

Бітуми бувають штучні (нафтові) - важкі продукти перегонки нафти і природні (випокні), названі асфальтами.

В електроізоляційній техніці застосовують бітуми марок БН-III, БН-IV, БН-V і більш тугоплавкі марок В і Г. Температура розм'якшення від 50°C для БН-III до 125°C для В. Температура розм'якшення асфальтів сягає до 200°C.

Електроізоляційні властивості бітумів зростають з підвищенням їх тугоплавкості, але при цьому зростає твердість і крихкість. Підвищення температури розм'якшення бітумів досягається продуванням розтопленого бітуму повітрям, внаслідок його окиснення і додаткової полімеризації. Зниження температури розм'якшення бітуму та підвищення його холодостійкості відбувається при спавненні бітуму з невеликою кількістю нафтової оливи.

Основні параметри бітумів ($\rho = 10^{13}-10^{14}$ Омм; $\epsilon = 2,5-3,0$; $\tan \delta = 0,01$; $E_{міц} = 10-25$ МВ/м) мало залежать від вологості. Застосовують бітуми для виготовлення лаків і компаундів.

5. Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків.

Воскоподібні діелектрики - тверді легкоплавкі матеріали малої міцності і гігроскопічності.

Їх застосовують для просочення і заливання ізоляції, але внаслідок значної усадки при застиганні (до 15-20 %) виникають шовнені повітрям пори, які знижують електричну міцність проточеної ізоляції.

Парафін - найдешевший неполярний діелектрик, густина якого 0,85 - 0,9 Мг/м³ і температура плавлення 50 - 55 °С. Загальна формула парафіну: C_nH_{2n+2} ($n = 10 - 36$). Значення $\tan \delta$ для парафіну 0,0003 - 0,0007, ар- більше 10^{16} Ом-м. Парафін не змочується водою, не розчиняється у воді і спиртах, але розчиняється в нафтових оливах, бензині, бензолі. Парафін, непридатний для виготовлення лаків, тому що не утворює суцільної міцної плівки при випаровуванні розчинника.

Церезин - це суміш твердих вуглеводнів метанового ряду із загальною формулою C_nH_{2n+2} , але з більшою кількістю атомів вуглецю ($n = 39 - 53$) в молекулах, ніж у парафіні, і розгалуженими ланцюжками атомів вуглецю.

Церезин отримують очищенням мінералу озокериту (гірського воску). Має вищу (65 - 80 °С) температуру плавлення і стійкість до окиснення, ніж парафін. Тому витісняє парафіни, зокрема при просочуванні паперових і слюдяних конденсаторів.

Синтетичний парафін і синтетичний церезин - високомолекулярні вуглеводні, які отримують при виготовленні синтетичних бензину і олив.

Їх електроізоляційні властивості близькі до натурального парафіну і натурального церезину.

Електроізоляційні лаки і компаунди. Електроізоляційні лаки і компаунди в процесі виготовлення ізоляції використовуються у рідкому стані, але після його завершення перебувають у твердому стані, тобто належать до твердіючих матеріалів.

Лаки - колоїдні розчини смол, бітумів, висихаючих олив у летких розчинниках. У процесі сушіння розчинник вивітрюється, а лакова основа твердне і утворює лакову плівку. Електроізоляційні лаки поділяють на три групи: насичувальні, покривні і клеючі.

Насичувальні лаки застосовують для просочення пористої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина та ін.) з метою підвищення їх електричної міцності, нагрівостійкості, теплопровідності, механічної міцності і зменшення гігроскопічності.

Покривні лаки утворюють на поверхні твердої ізоляції міцні, і кидкі, вологостійкі плівки, які підвищують напругу поверхневого розряду і поверхневий опір ізоляції, захищають лаковані вироби під дії вологи. Деякі покривні лаки (емаль-лаки) наносять безпосередньо на метал для створення на його поверхні електроізоляційного шару (ізоляція емальованих провідників та ін.).

Клеючі лаки застосовують для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів або приклеювання їх до металу. При виготовленні текстоліту і гетинаксу клеючі лаки є одночасно і насичувальними. Сушіння лаків проводять як за підвищеної температури (до 70 °С), так і за кімнатної. Перші називають лаками гарячого сушіння, другі - холодного (повітряного) сушіння.

Смоляні лаки - це розчини синтетичних і природних смол.

Бакелітові лаки - розчини бакеліту у спирті. Їх використовують в якості насичувальних і клеючих термореактивних лаків при виготовленні текстоліту і гетинаксу, ізоляції електричних апаратів та ін.

Гліфталеві лаки - розчини гліфталевої смоли в сумішах спиртів рідкими вуглеводнями. Ці лаки термореактивні, їх використовують для склеювання міканітів.

Кремнійорганічні лаки застосовують для створення нагріво- і вологостійких плівок, які утворюються за підвищеної температури сушіння.

Полівінілхлоридні лаки застосовують для захисту ізоляції, яка працює в парах кислот. Лаки стійкі до дії бензину, олив.

Целюлозні лаки - розчини ефірів целюлози. Утворюють термопластичні плівки при холодному сушінні. Найширше застосовують нітроцелюлозні лаки (нітролаки), однак вони погано прилипають до металу, тому перед їх нанесенням попередньо на метал наносять шар ґрунтувального лаку, який висушують за підвищеної температури.

Оливні лаки створюють на основі висихаючих олив, в які для пришвидчення тверднення додають сикативи. Як розчинник застосовують бензин або гас. Застосовують лаки для виробництва лакотканин, лакопаперу і насочування обмоток електричних машин та апаратів. Оливні лаки швидкого сушіння застосовують при емальованні листової електротехнічної сталі.

Чорні лаки виготовляють з бітумів, вони дешевші, ніж оливні, і менш гігроскопічні, мають кращі електроізоляційні властивості, але недостатньо еластичні і практично неоліви о стійкі.

Компаунди містять різні смоли, бітуми, оливи. На відміну від лаків, в їх склад не входять розчинники. Тверді компаунди перед застосуванням нагрівають для досягнення низької в'язкості. Заливні компаунди використовують для заповнення відносно великих порожнин між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для нанесення відносно товстих покриттів.

У кабелевій техніці широко застосовують кабелеві компаунди. Насичувальні компаунди служать для насичування паперової ізоляції силових кабелів, а заливні компаунди - для заповнення з'єднувальних та кінцевих муфт. Усі перераховані компаунди - термопластичні. Перед насичуванням і заливанням їх зріджують нагріванням, а за наступного охолодження компаунди тверднуть.

Широко застосовуються термореактивні епоксидні компаунди, які являють собою епоксидну смолу з добавками наповнювачів і пластифікаторів. Безпосередньо перед використанням у компаунд вводять твердник. Важливе значення мають також термореактивні поліефірні компаунди на основі ненасичених поліефірних смол.

Рослинні оливи отримують з насіння різних рослин у вигляді в'язких рідин. Найбільш важливі висихаючі оливи, які при нагріванні, освітленні і стиканні з киснем повітря тверднуть, утворюючи блискучі, міцно зчіплені з поверхнею електроізоляційні плівки. Процес висихання пришвиджується каталізаторами (сикативами). Найбільш розповсюджені висихаючі оливи - льняна і тунгова.

Льняну оливу отримують з насіння льону. Температура її застигання близько -20 °С.

Тунгову оливу дістають з насіння тунгового дерева. Порівняно з льняною тунгова олива висихає швидше і створює кращу водо непроникну плівку. Висихаючі оливи застосовуються в електропромисловості для виготовлення електроізоляційних лаків, лако-тканин тощо.

Магнітні матеріали різного призначення.

План

1. Класифікація магнітних матеріалів.
2. Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів: залізо і низьковуглецеві сталі, кремениста електротехнічна сталь, низькоерцетивні сплави.
3. Магнітом'які високочастотні матеріали: ферити, магнітодіелектрики.

1. Класифікація магнітних матеріалів.

Фізичні основи. У будь-якій речовині внаслідок руху електронів по орбітах атомів і обертання електронів навколо своїх осей існують елементарні струми і їх елементарні магнітні моменти. Вказані магнітні моменти визначають магнітний момент атома. Деякий (дуже незначний) вклад у магнітний момент атома вносить також магнітний момент ядра.

Електрон, який рухається по круговій орбіті, еквівалентний круговому струму, сила якого дорівнює добутку заряду електрона e на частоту π обертання електрона по орбіті, тобто $i_0 = e \cdot \pi$. Якщо радіус орбіти дорівнює r , швидкість електрона - V , то $\pi = V/2\pi r$, отже, $i_0 = eV/2\pi r$. Елементарний магнітний моментр цього струму дорівнює добутку величини i_0 на площу $S_0 = \pi r^2$, що охоплюється цим струмом. Тому

$$p_m = \frac{eV}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{eVr}{2}$$

Магнітний момент спрямований за нормаллю до контуру в напрямі, який визначається правилом правого гвинта (рис. 7.1). Обертання гвинта з правою нарізкою у напрямі струму в контурі зумовлює поздовжнє переміщення гвинта, яке вказує на напрям вектора p_m .

Орбітальні і спінові магнітні моменти можуть бути спрямовані в один або в різні боки (рис. 7.2). В останньому випадку сума орбітальних і спінових моментів електронів може дорівнювати нулеві і власний магнітний момент атома також становитиме нуль.



Рис. 7.1. Обертання головки гвинта в напрямку струму I зумовлює переміщення гвинта в напрямку вектора p

Речовина з такими атомами не І шорює магнітного поля. Якщо атоми речовини мають власні магнітні моменти, але вони орієнтовані хаотично і взаємно і омпенсуються, то також не гворюють магнітного поля.

Під дією зовнішнього магнітного поля магнітні моменти Молекулярних струмів більшою або меншою мірою орієнтуються в напрямі поля (у випадку феро- і парамагнетиків), або виникають індуковані молекулярні струми, магнітні моменти яких зорієнтовані проти поля (у діамагнетиків). Внаслідок цього І у марний магнітний момент молекулярних струмів стає відмінним від нуля і тіло намагнічується.

Намагніченість речовини J зв'язана з магнітною індукцією B і напруженістю магнітного поля H співвідношенням $J = B/\mu_0 - H$,

де B - середнє результуюче магнітне поле в речовині; H - напруженість магнітного поля, яка не залежить від властивостей речовини, μ_0 - магнітна стала, числове значення якої: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

У випадку поля у вакуумі ($J = 0$) величини B і H пропорційні між собою:

$$B = \mu_0 H. (7.1)$$

За внесення будь-якої речовини в зовнішнє магнітне поле (H) з мріжування намагніченості співвідношення (7.1) матиме вигляд

$$B = \mu_0 (H + J) = \mu_0 H (1 + J/H) = \mu_0 H (1 + \kappa), (7.2)$$

де $\kappa = J/H$ - магнітна сприйнятність речовини.

Магнітна сприйнятність речовини або середовища характерним зв'язок між намагніченістю (магнітним моментом) речовини J і напруженістю магнітного поля H в цій речовині.

Величина $(1 + \kappa)$ у виразі (7.2) є відносною магнітною проникністю по, або просто - магнітною проникністю μ

$$\mu = 1 + \kappa. (7.3)$$

Це величина безрозмірна, вона характеризує зв'язок між магнітною індукцією B і напруженістю магнітного поля H

$$B = \mu_0 \mu H (7.4)$$

Згідно (7.2) $B = \mu_0 \mu_r H = \mu_a H$, де $\mu_a = \mu_r \mu_0$ - абсолютна магнітна проникність речовини. Для вакууму і повітря $\mu_r \sim \mu_0$, а значить $\kappa = 0$.

Власні магнітні моменти атомів деяких речовин дорівнюють нулеві і набувають магнітного моменту тільки у зовнішньому магнітному полі. За розміщення таких речовин у зовнішньому магнітному полі наведені індуковані моменти напрямлені проти поля (1 ІН антипаралельні) і послаблюють його, тобто $\mu_a < \mu_0$, або $\kappa < 0$ (рис. 7.3, лінія 1). Такі речовини називають діамагнетиками, їх μ_r дещо менше за 1 (табл. 7.1). До діамагнетиків належать мідь, срібло, золото, свинець, вуглець, вісмут, Фінертні гази тощо.

2. Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів: залізо і низьковуглецеві сталі, кремніста електротехнічна сталь, низькоерцетивні сплави.

Фізична природа діамагнетизму полягає у виникненні у всьому об'ємі діамагнітного тіла намагніченості, спрямованої на зустріч намагнічуючому полю. Діамагнетики з наближенням до постійного магніту дещо відштовхуються від нього.

Якщо [атом](#)и речовини мають власні магнітні моменти, але за відсутності зовнішнього магнітного поля ці моменти через тепловий рух спрямовані в різних напрямках хаотично, то намагніченість цих речовин $= 0$. Зовнішнє магнітне поле напруженістю H намагається повернути власні магнітні моменти атомів у напрямі цього поля і тим більше, чим більша H .

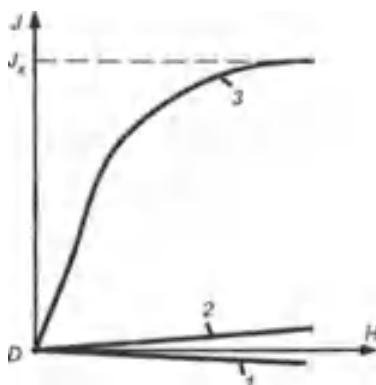


Рис. 7.3. Залежності намагнічуваності речовини від напруженості магнітного поля для: 1 - діамагнетиків; 2 - парамагнетиків; 3 - феромагнетиків

Виникає орієнтація власних магнітних моментів і намагніченість J стає більшою від нуля, речовина намагнічується в напрямі зовнішнього поля (вектори паралельні) і підсилює зовнішнє **мою** (див. рис. 7.3, лінія 2). У місці знаходження речовини **магнітна** проникність зростає, тобто $\mu_a > \mu_0$ і $\kappa > 0$. Такі речовини, Ідносна магнітна проникність яких трохи більша від одиниці, названо *парамагнетиками* (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Магнітна проникність для деяких парамагнітних і діамагнітних речовин

Парамагнітні речовини		Діамагнітні речовини	
Азот (газоподібний)	1,000013	Водень (газоподібний)	0,999937
Повітря (газоподібне)	1,000038	Вода	0,999991
Кисень (газоподібний)	1,000017	Скло	0,999987
Кисень (рідкий)	1,0034	Цинк	0,999991
Ебоніт	1,000014	Срібло	0,999981
Алюміній	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000176	Мідь	0,999912

Крім наведених у таблиці, до парамагнетиків належать Li, Na, K Rb, Cs, Ca, Ba, водні розчини солей, які містять іони перехідних і цементів, вільні радикали, комплексні сполуки перехідних елементи з внутрішніми недобудованими електронними оболонками, метан тощо.

Для парамагнетиків характерна відсутність сильної орієнтуючої взаємодії між магнітними моментами атомів чи молекул речовини. При $H = 0$ макроскопічний момент парамагнітних тіл *Порівнює* нулю.

Необхідно зазначити, що для діамагнітних і парамагнітних матеріалів магнітна проникність не залежить від величини магнітної індукції зовнішнього намагнічувального поля, тобто являє собою сталу величину для кожного матеріалу. Залежність лінійна (див. рис. 7.3, крива 1,2) і незначна, оскільки коефіцієнт мім пітної сприйняти ості малий ($\kappa = 10^{-4} - 10^{-6}$). У парамагнетиків і діамагнетиків відсутній магнітний гістерезис.

В електротехнічних розрахунках електричних машин, трансформаторів, різних апаратів та приладів відносну магнітну проникність діамагнітних і парамагнітних матеріалів приймають рівною одиниці.

Відмінності між діамагнетиками і парамагнетиками наглядно проявляються при поміщенні їх в середину котушки (соленоїда), по якій проходить струм. Відомо, що в соленоїді, навитому на осердя з різних матеріалів, магнітний потік Φ збільшується або зменшується порівняно з магнітним потоком Φ_0 такого ж соленоїда, але без осердя, тобто $\Phi = m\Phi_0$. Таким чином, магнітна проникність її виражається відношенням магнітних потоків у даній речовині чи у вакуумі $m = \Phi/\Phi_0$. Якщо $\Phi = \Phi_0$, то $m = 1$, тобто магнітна проникність вакууму дорівнює одиниці.

Вимірюваннями встановлено, ідо заповнення соленоїда одними речовинами (парамагнетиками) викликає незначне збільшення магнітного потоку соленоїда ($m > 1$), а діамагнетиками - деяке зменшення ($\mu < 1$). Згідно з габл. 7.1, відмінність проникності від одиниці у парамагнетиків і діамагнетиків незначна.

Вплив феромагнітних, парамагнітних і діамагнітних речовин на магнітний потік соленоїда пояснюється тим, що до магнітного потоку, створюваного струмом в обмотці соленоїда додається або віднімається магнітний потік, створений елементарними струмами атомів речовини.

Феромагнітні речовини (наприклад, залізо) суттєво (інколи в тисячі разів) збільшують магнітний потік в соленоїді. Під впливом магнітного поля соленоїда амперові струми у феромагнетикі орієнтуються і стають паралельними струмам обмотки соленоїда (рис. 7.4).

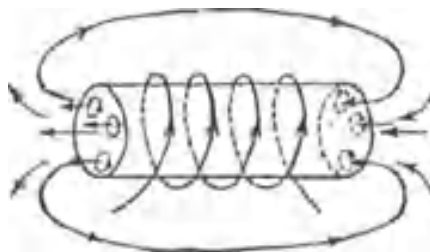


Рис. 7.4. Під впливом магнітного поля соленоїда амперові струми в феромагнітному і парамагнітному сердечниках орієнтуються так, що напрямок їх співпадає із струмами в витках соленоїда

Парамагнітні речовини дещо збільшують магнітний потік соленоїда. Це вказує на те, що в них під дією зовнішнього магнітного поля елементарні струми орієнтовані так, що їх напрям співпадає з напрямом струму в обмотці (див. і ми 7.4). Створений елементарними струмами додатковий потік незначний, юбто відсутня сильна ' 1111 оптуюча взаємодія між м .н пітними моментами атоми (молекул) і напрямом зовнішнього поля. Тому параді пітна речовина намагніються дуже слабо. У діамагнітних речовинах під її ю зовнішнього магнітного поля виникають елементарні струми, спрямовані протилежно до напрямку струмів в обмотці (рис. 7.5) і магнітний потік в соленоїді дещо зменшується. Але додатковий і її пітний потік від елементарних струмів дуже малий і тому ненабагато менше одиниці.

Феромагнетики, антиферомагнетики і ферімагнетики. Феромагнетики. Найширше застосування в різних галузях техніки і науки мають феромагнетики і магнітні сплави. Для них відносна магнітна проникність набагато більша від одиниці ($m \gg 1$), а для деяких досягає десятків і сотень тисяч одиниць. До них належать залізо, нікель, кобальт, гадоліній, диспрозій і сплаті цих елементів.

Феромагнетики - група речовин у твердому кристалічному стані, в яких має місце спонтанна паралельна орієнтація моментів атомних носіїв магнетизму внаслідок позитивної міжелектронної обмінної взаємодії.

Обмінна взаємодія

Поряд з кулонівською електростатичною енергією $E_{\text{екуп}}$ існує додаткова, чисто квантова електростатична енергія силової взаємодії, або обмінна енергія $E_{\text{об}}$, яка залежить від взаємної орієнтації магнітних моментів електронів. Ця енергія не має ніякого аналога в класичній фізиці. За $E_{\text{об}} > 0$ виникає тенденція до паралельної орієнтації сусідніх атомних магнітних моментів речовини і спричинює самовільну (спонтанну), намагніченість тіла. За $E_{\text{об}} < 0$, навпаки, проявляється тенденція до антипаралельної орієнтації сусідніх атомних магнітних моментів. Обмінна взаємодія перешкоджає зближенню частинок з однаковим напрямком спіна і проявляється у взаємному відштовхуванні тотожних частинок на відстанях порядку або менше довжини хвилі де-Бройля. Величина обмінної взаємодії визначається, головним чином, ступенем перекриття хвильових функцій частинок, тобто часткою часу знаходження частинок в спільній частині простору. Обмінна взаємодія збільшує середню відстань між частинками і тому зменшує роль силової взаємодії, тобто роль кулонівського відштовхування електронів в атомі зменшується.

Ефективне зменшення енергії відштовхування електронів з паралельними спінами забезпечує можливість феромагнетизму. Електронам у сусідніх атомах енергетично вигідно мати паралельні спіни, якщо відповідні електронні оболонки незаповнені, що має місце у феромагнетиків. Найбільший вплив обмінна взаємодія має на зовнішні електронні оболонки атома.



Рис. 7.6. Схема орієнтації магнітних моментів атомів різних матеріалів

Феромагнітна структура паралельних магнітних моментів (рис. 7.6) встановлюється у феромагнетиках за відсутності зовнішнього магнітного поля H за температур нижчих критичної (точки Кюрі). У точці Кюрі і вище інтенсивність теплового руху атомів феромагнетика виявляється достатньою для руйнування його спонтанної намагніченості і впорядкованого розташування елементарних струмів. Залежність магнітної проникності феромагнітних матеріалів від температури наведена на рис. 3.18. Вище точки Кюрі феромагнетик набуває властивостей парамагнетика, а його відносна магнітна проникність дещо більша від одиниці. Для чистого заліза точка Кюрі становить 768°C , для нікелю 350°C , а для кобальту 1150°C .

Антиферомагнетики - група речовин у твердому (кристалічному) стані, в яких наявні такі міжатомні сили, що викликають протилежну (антипаралельну) орієнтацію сусідніх елементарних (атомних) магнітників.

За відсутності зовнішнього магнітного поля і невисоких температур в антиферомагнетиках встановлюється впорядкована магнітна структура (рис. 7.6), за якої елементарні магнітики орієнтуються назустріч один одному, тобто антипаралельно.

Тому, на відміну від феромагнетиків, за відсутності зовнішнього магнітного поля $H_{\text{зов}}$, антиферомагнетики не мають результируючої намагніченості. Остання появляється тільки під дією $H_{\text{зов}}$. Намагніченість зростає при підвищенні температури від абсолютного нуля до точки Нееля (антиферомагнітна точка Кюрі).

Антиферомагнетизм, як і феромагнетизм, зумовлений електронним спіновим магнетизмом атомів (іонів) з недобудованими електронними 3d і 4f оболонками і некомпенсованим спіновим Моментом. Магнітна впорядкована структура, тобто впорядкована орієнтація спінів магнітно-активних іонів антиферомагнетика, як і феромагнетика, створюється сильною електростатичною (обмінною) взаємодією електронів у кристалі. За енергії обмінної взаємодії $E_{\text{об}} > 0$ усі спіни в кристалі орієнтуються паралельно і проявляється феромагнетизм; якщо ж $E_{\text{об}} < 0$, то спіни сусідніх вузлів кристалічної ґратки орієнтуються антипаралельно і кристал є антиферомагнетиком. Таким чином, у випадках як антиферомагнетизму, так і феромагнетизму, кристал має не тільки Кристалічну атомну ґратку, але й певну впорядковану атомну магнітну структуру. Це є основною фізичною ознакою двох вказаних магнітних станів.

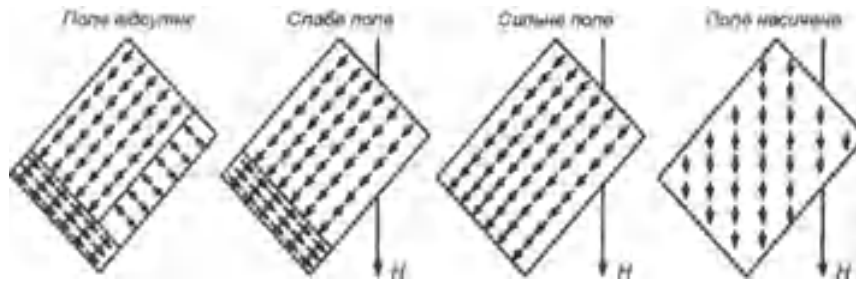


Рис. 7.8. Схема орієнтації спінів при намагнічуванні феромагнетиків

Межі між цими доменами зникають. Процес поглинання наростає із збільшенням напруженості поля H аж до зникнення меж між усіма доменами.

Процес обертання вектора спонтанної намагніченості полягає в повороті векторів в напрямку поля H . За повного співпадати з H досягається технічне магнітне насичення.

Парапроцес - це шиккування вздовж поля елементарних магнітних моментів, які внаслідок дезорієнтуючої дії теплового руху дещо відхилені від напрямку.

У більшості випадків парапроцес спричинює лише незначний приріст намагніченості феромагнетиків. Процеси зміщення меж, як правило, проходять за менших значень H , ніж процеси обертання. Парапроцес відбувається тільки в сильних магнітних полях.

За поступового збільшення напруженості зовнішнього магнітного поля від нуля до деякого найбільшого значення H магнітна індукція (намагніченість) феромагнітного матеріалу зростає (крива 2, рис. 79) і досягає відповідного максимального значення B_s . Якщо після насичення магнетика зменшувати поле H , то й магнітна індукція почне зменшуватись. Крива 1 показує зміну магнітної індукції залежно від напруженості поля при розмагнічуванні і наступному намагнічуванні. Після достатньої кількості повних перемагнічувань встановлюється однозначна симетрична петля гістерезису. Площа, обмежена цією кривою, зображає втрати на гістерезис, тобто енергію, затрачену на намагнічування і перемагнічування (рис. 7.9).

З падінням напруженості H Магнітна індукція також зменшується і коли напруженість Магнітного поля дорівнює Нулю, в магнітному матеріалі іберігається залишкова магнітна індукція B_r Для повного I'') (магнічення матеріалу необхідно змінити напрям напруженості магнітного поля на зворотній $(-H)$. Напруженість поля H , за якої індукція дорівнює її нулю, називається коерцитивною силою.

Всі магнітні матеріали поділяють на дві основні групи: магнітно-м'які і магнітно-тверді. Ці групи різко відрізняються формою (рис. 7.10) гістерезисної кривої і значенням основних магнітних характеристик B_T і H_c .

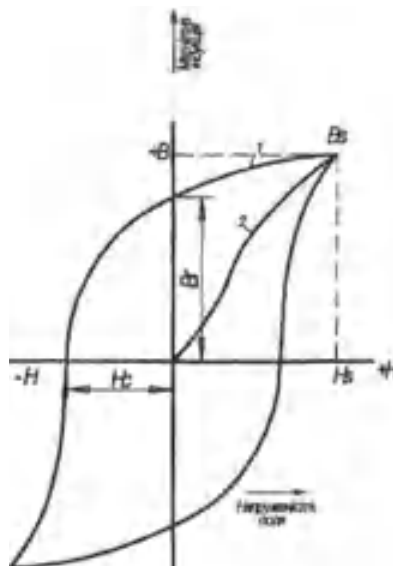


Рис. 7.9. Криві намагнічування: 1 - гістерезисна; 2 – первинна

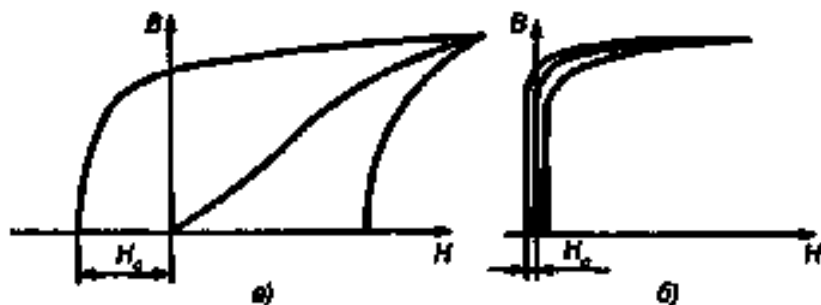


Рис. 7.10. Гістерезисні криві для магнітно-твердого (а) і магнітно-м'якого (б) сплавів

У магнітно-твердих матеріалах коерцитивна сила H може досягти багатьох сотень і навіть тисяч ерстедів, тоді як в деяких спеціальних магнітно-м'яких матеріалах H_c не перевищує сотих і навіть тисячних ерстедів.

Магнітно-м'які матеріали. Феромагнітні матеріали, які намагнічуються і перемагнічуються у відносно слабких магнітних полях, відрізняються високими значеннями початкової μ_0 (визначають при дуже слабких полях $\sim 0,1$ А/м) і максимальної магнітної проникності, малим значенням коерцитивної сили і магнітними втратами на гістерезис (табл. 7.2). їм відповідає вузька гістерезисна петля (рис. 7.10, б). Магнітно-м'які матеріали використовують для виготовлення осердь котушок, трансформаторів, електромагнітів, динамома-шини, у вимірювальних приладах та ін., коли необхідно при найменших затратах енергії досягти максимальної індукції.

За перемагнічування феромагнетиків у магнітному полі виникають втрати енергії. Енергія, втрачена на перемагнічування, переходить в тепло, внаслідок чого феромагнетик нагрівається. Втрати на гістерезис (перемагнічування) можна визначити за площею статичної петлі гістерезису. Ця площа для магнітно-м'яких матеріалів невелика, і втрати енергії незначні.

Набагато більші втрати виникають за рахунок роботи вихрових струмів Фуко, які можна визначити за формулою:

$$P = AB^2 \tau f^2 d^2 / \rho,$$

з якої випливає, що при заданій напруженості магнітного поля H теплові втрати зростають пропорційно квадратам амплітуди магнітної індукції B , частоти поля f , товщини осердя d і обернено пропорційні питомому електричному опору ρ . Для зниження вказаних втрат збільшують питомий електроопір матеріалу осердь, зменшують товщину листів з прошарком полімерної чи оксидної ізоляції. Магнітно-м'які матеріали з малим питомим електроопором ($\rho < 0,1$ мкОм·м) використовують, як правило, для виготовлення магнітопровідників електромагнітних пристроїв постійного струму (електромагнітів, деталей реле, полюсних наконечників і т. д.).

Технічно чисте залізо і маловуглецеві сталі. До магнітно-м'яких матеріалів належать технічно чисте залізо і його замітники – маловуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0,04 % і до 0,06 % інших домішок. Технічно чисте залізо (армко-залізо) має достатньо високі магнітні властивості (табл. 7.3), які значно покращуються очищенням заліза від домішок. До особливо чистого відносять електротехнічне і карбонільне залізо.

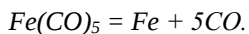
Таблиця 7.3

Склад і магнетні властивості заліза після різних видів обробки

МАТЕРІАЛ	ВМІСТ ДОМІШОК, %		МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ		
	ВУГЛЕЦЬ	КИСЕНЬ	МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ		КОЕРЦИТИВНА СИЛА, H А/М
			ПОЧАТКО- B_A, Γ_{Π}	МАКСИМАЛЬНА, Γ_{MAX}	
Технічно чисте залізо	0,020	0,060	250	7 000	64,0
Електролітичне залізо	0,020	0,010	600	15 000	28,0
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3 300	21 000	6,4
Переплавлене у вакуумі електротехнічне залізо	0,010	—	—	61 000	7,2
Залізо, оброблене у водні	0,005	0,003	6 000	200 000	3,2
Монокристал чистого заліза, відпалений у водні	—	—	—	143 000	0,8

Електротехнічне залізо отримують електролізом сірчаного або хлористого заліза. Після осадження на катоді (пластині з м'якої сталі) шару заліза товщиною 4-6 мм його старанно промивають, знімають з катода, здрібнюють у кульових млинах і переплавляють у вакуумі.

Карбонільне залізо виготовляють термічним розкладом карбонілу заліза згідно із рівнянням:



З отриманого дисперсного порошку карбонільного заліза пресують заготовки, після спікання яких отримують готові деталі.

Електротехнічне і карбонільне залізо внаслідок складності технології їх отримання використовують тільки для виготовлення невеликих виробів.

3. Магнітом'які височастотні матеріали: ферити, магнітодіелектрики.

Маловуглецеві електротехнічні сталі випускають у вигляді листів товщиною 0,2-4мм з гарантованими магнітними властивостями. Максимальне значення магнітної проникності не менше 3500-4500, коерцитивної сили не більше 48-95 А/м.

Кремністі електротехнічні сталі. Для зниження загальних втрат при перемагнічуванні електротехнічні сталі легують кремнієм, який значно підвищує електричний опір сталі (один відсоток кремнію підвищує електричний опір на 0,12 мкОм-м) і знижує втрати на струми Фуко. Отриманий залізокремністий твердий розчин має більш високу коерцитивну силу, ніж чисте залізо. Однак у цьому сплаві за нагріву можна отримати більш грубозернисту структуру, яка за охолодження не здрібнюється, і дещо зменшити значення коерцитивної сили. Зменшення коерцитивної сили відбувається також внаслідок того, що кремній сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту та майже повному розкисленню сталі. Значення коерцитивної сили в кремністій електротехнічній сталі приблизно таке саме, як і у звичайному залізі. Електричний опір зростає зі збільшенням у сталі вмісту кремнію, але при цьому одночасно різко знижується пластичність сталі і можливість отримання тонколистового прокату. Тому вміст кремнію в сталі не перевищує 4,5 %.

Шляхом спеціалізованого прокатування і певної термічної обробки вдається виготовляти текстуровану сталь (гайперсил) крупнокристалічної будови з орієнтацією осей найлегшого намагнічування паралельно напрямку прокату і поліпшеними в цьому ж напрямку магнітними властивостями.

Магнітні властивості легованих кремнієм сталей наведені в табл. 7.4.

Перша цифра в марці визначає вид прокату і текстуру: гарячекатана ізотропна (1); холоднокатана ізотропна (2); холоднокатана анізотропна з кристалографічною текстурою (3). Друга цифра в марці вказує на вміст Si, %: 0 - вміст 0,4%; 1 (0,4-0,8%); 2-(0,8-1,8%); 3-(1,8-2,8%); 4-(2,8-3,8%); 5 (3,8 - 4,8 %). Третя цифра визначає втрати на гістерезис і теплові втрати при певному значенні В і f Наприклад, 1 - питомі В грати при В = 1,5 Тл f = 50 Гц (P_{1,5/50}). Четверта цифра - код числового значення нормованого параметра.

Сталі виготовляються у вигляді листів товщиною 0,1-1мм, рулонів і різаної стрічки з електроізоляційним покриттям або без нього. Текстурована сталь використовується для осердь трансформаторів, що виготовляються навивкою з рулонного матеріа

ТАБЛИЦЯ 7.4

Магнітні властивості легованої електротехнічної тонколистової сталі

Сталь	Товщина листа, мм	Рi,5/50, ВТ/КГ	В(Тл) при Н(кА/м), не менше	
			2,5	30
Гарячекатана ІЗОТРОПНА				
1311	0,50	6,1	1,48	1,95
1411	0.50	4.4	1.46	1.94

1511	0,050	3,5	1,46	1,90
ХОЛОДНОКАТАНА ІЗОТРОПНА				
2011	0,65	9,0	1,60	2,02
2111	0,65	10,0	1,58	2,0
2211	0,65	7,0	1,56	1,96
2311	0,65	5,8	1,52	1,96
2411	0,50	3,6	1,49	1,96
ХОЛОДНОКАТАНА АНІЗОТРОПНА				
3411	0,50	2,45	1,75	-
3416	0,28	0,89	0,9	-

Це дозволяє зменшити масу і габаритні розміри силових трансформаторів на 20 - 25 %, а радіотрансформаторів на 40 %.

У процесі виготовлення прокату, а також після технологічних операцій його різання, штампування тощо в матеріалі виникає велика кількість дислокацій та значні внутрішні напруження, які погіршують магнітні властивості внаслідок збільшення коерцитивної сили і втрат на гістерезис. Відпал у вакуумі або водні усуває дефекти та напруження і покращує магнітні властивості. За відпалу у водні відбувається також очищення сталі від шкідливих домішок.

Пермалої - ЗАЛІЗОНІКЕЛЕВІ СПЛАВИ З ВМІСТОМ НІКЕЛЮ 45 - 83 % І ДУЖЕ ВИСОКОЮ ПОЧАТКОВОЮ МАГНІТНОЮ ПРОНИКНІСТЮ У СЛАБИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ (РИС. 7.11).

Підвищений питомий електроопір пермалоїв дозволяє використовувати їх при частотах до 25 кГц. **Розрізняють низьконіке-леві (35 - 50 % №), або гайперники, і високоніке-леві (60 - 80 % МІ) пермалої.** Найбільше значення максимальної магнітної проникності має сплав з 78,5 % Ni після термообробки для видалення шкідливих домішок, зняття залишкових напружень і укрупнення зерна. Сплави повільно нагрівають, до 1100-1150°C у вакуумі або водні, витримують при цій температурі 3-6 годин, повільно охолоджують до 600 °С, потім швидко охолоджують до кімнатної температури.

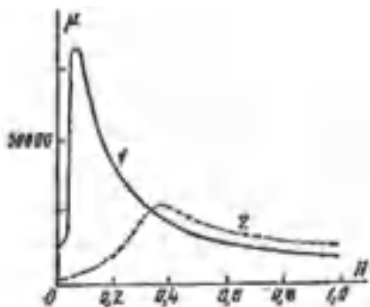


Рис. 7.11. Залежність μ від H :

1- у магнітному сплаві (пермалої), 2- у м'якому залізі

Таблиця 7.5

Основні характеристики нелегованих пермалоїв

Вміст нікелю, %	Π	МАХ	$H, A/m$	$\mu, \text{мк Ом м}$
78,5	10000-14000	130000-220000	1-3	0,25
66	3000-4000	120000-200000	3-5	0,32
50	2000-3000	50000-70000	6-9	0,45

Таблиця 7.6

Основні характеристики легованих пермалоїв

Вміст нікелю, %	Вміст легуючих елементів, %	Π	МАХ	$H, A/m$	$\mu, \text{мк Ом м}$
-----------------	-----------------------------	-------	-----	----------	-----------------------

78,5	3,8 Мо	25000	150000	1	0,55
66	2Мо	7000	120000	0,7	0,8
50	4 Сз	3000	30000	8	0,95

Значною перевагою пермалоїв є їх висока пластичність, яка полегшує технологію виготовлення з них дуже тонких листів, стрічок і дроту. Як недолік - зниження магнітних властивостей надії, під дією незначних напружень. Так, напруження стиску 5 Мпа зменшують магнітну проникність у 5 разів і підвищують коерцитивну силу у 2 рази. Тому готові деталі нагрівають для зняття напружень, а їх монтаж здійснюють без сильного натягу.

Для поліпшення електромагнітних і технологічних властивостей залізонікелеві сплави додатково легують хромом, кремнієм, молібденом, марганцем, міддю. Хром і молібден підвищують питомий електроопір і магнітну проникність і одночасно зменшують чутливість до залишкових напружень, наклепу. Мідь покращує механічну оброблюваність, підвищує стабільність властивостей та питомий електроопір. Зростання електроопору в легованих пермалоях дозволяє застосовувати їх при підвищених і високих частотах. Усі легуючі елементи збільшують магнітну проникність T_H і T_{max} .

У марках пермалоїв перші дві цифри вказують на вміст нікелю у відсотках. Літера після Н - додаткове легування (Х - хромом, С - кремнієм, М - молібденом, Д - міддю).

До окремої групи можна віднести пермалої з прямокутною петлею гістерезису. У кінці марки сплаву ставиться літера П. У сплаві 50 НП прямокутність петлі досягається прокатуванням, а в сплавах 65 НП і 79 НМП охолодженням металу при гартуванні у магнітному полі (термомагнітна обробка). Осердя, виготовлені зі стрічок сплаву 79 НМП товщиною 3 мкм, можуть працювати при частотах 700 кГц, а при товщині 1,5 мкм - до 1 МГц.

Пермалої поставляють у вигляді стрічок завтошки 0,02-0,5 мм, листів (1,2мм), а також дротин. Магнітні характеристики пермалоїв стабільні при температурах від -60 до +60 °С.

Альсифери - сплави Ре-АІ-Ві. Оптимальний склад альсиферу: 9,4% Ві; 5,6% АІ, решта Іе. Промислові марки альсиферів мають характеристики: $\mu_H = 35\ 000$; $\mu_{max} = 120\ 000$; $H_c = 2,2\ А/м$; $p = 0,8\ мкОм\cdotм$. Альсифери можна застосовувати в деяких випадках взамін більш дорогих високопідіелевих пермалоїв. Внаслідок високої крихкості вироби з альсиферу (магнітні екрани, корпуси приладів та ін.) виготовляють у вигляді відливок з товщиною стінки не менше 2-3 мм. Альсифер легко подрібнюється у порошок і може використовуватись для виготовлення високочастотних пресованих осердь, а також магнітодіелектриків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сібікін, Ю. Д. Довідник електромонтажника: навчальний посібник для початкової професійної освіти / Ю. Д. Сібікін. - 4-е изд., Стер. - Москва ; Берлін: Директ-Медіа, 2014. - 331 с.
2. Сібікін, Михайло Юрійович Монтаж, експлуатація і ремонт електрообладнання промислових підприємств і установок. / Сібікін Михайло Юрійович. - М. : РадіоСофт, 2019. - 963 с.
3. Акімова, Н. А. Монтаж, технічна експлуатація та ремонт електричного і електромеханічного устаткування: / Н. А. Акімова, Н. Ф. Котеленець, Н. І. Сентюріхін. - 13-те вид., Стереотип. - Москва: Академія, 2016. - 299, с
4. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне.
Міненерговугілля України. - Х. : Видпнмицтво «Форт», 2017. - 760 с.
5. Монтаж, налагодження та експлуатація електроустаткування. Навчальний посібник
Грунтович Микола Васильович. Інфра-М, 2020, ISBN 978-5-16-015611-8, 271 с.
6. Електричні машини та апарати. Навчальний посібник
Аполлонський Станіслав Михайлович. КноРус, 2021, ISBN 978-5-406-08022-1, 388 с.
7. Яковлев В.Ф., Тимошенко Г.А., Литвин А.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Монтаж електрообладнання і систем керування». Суми, 2012 рік.
8. ДБН - всі будівельні норми України на порталі ДБНУ URL: <https://dbn.co.ua> > load > dbn
9. Правила безпечної експлуатації електроустановок URL:
<https://leg.co.ua/knigi/pravila/pravila-bezpechnoyi-ekspluatatsiyi-elektroustanovok-spozvivachiv.html>
10. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Гнатишин Я.М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: - Навчальний посібник – Львів «Магнолія 2006» 2008 – 180с.
11. Мазепа С.С., Марущак Я.Ю., Куцик А.С. Електрообладнання промислових підприємств. Навчальний посібник – 2-ге вид., стереот. – Львів: «Магнолія 2006», 2008 – 260с.
12. Гамола О.Є., Коруд В.І., Мадай В.С., Мусихіна Н.П. Електротехнічний практикум: Навчальний посібник / За заг. ред В.І. Коруда – Львів: «Магнолія 2006», 2009 – 194с.
13. Стахін П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Черніван В.Я., Мусахіна Н.П. Основи електротехніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник – 2-ге вид., стереотип – Львів: «Магнолія плюс» Видавець СПД ФО В.М. Піча, 2006 – 225с.
14. Коруд В.І., Гамола О.Є. Малинівський С.М. Електротехніка: Підручник / За заг. редакцією В.І. Коруда – 3-те вид., переобл. і доп. – Львів: «Магнолія 2006», 2007 – 447с.
15. В.К. Мурзін. Загальна електротехніка. – Полтава. «Кременчук», 2001. -323с.
16. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електротехніка та мікромхсхемотехніка: теорія і практикум. – К., Каравела, 2003 – 368с.
17. Паначевный Б.И. Курс электротехники. – Х. – Ростов на Дону, 202. – 288с.
18. Електричні системи та мережі [Текст] : навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів / Г. О. Шеїна ; Держ. вищ. навч. закл. "Донец. нац. техн. ун-т". - Покровськ : ДВНЗ "ДонНТУ", 2020. - 200 с.
19. Карякін, Р. Н. Заземлюючі пристрої електроустановок: довідник / Р. Н. Карякін. - М.: Енергосервіс, 2006. - 519 с.
20. Правила влаштування електроустановок: Усі діючі розділи ПУЕ-6 та ПУЕ-7 [Текст] : 6 випуск (з ізм. та доп. станом на 1 вересня 2006 р.). - Новосибірськ: Сиб. унів. вид-во, 2006. - 854 с., Іл.

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

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**МОНТАЖ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ**

Конспект лекцій

для студентів інженерно-технологічного факультету
зі спеціальності: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Суми -2022

МОНТАЖ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Конспект лекцій

для студентів інженерно-технологічного факультету
зі спеціальності: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Сумський НАУ, вул. Г. Кондратьєва 160

Підписано до друку 2022 р. Тираж 20 прим. Гарнітура. Times New Roman.
Умовн. Друк. арк. 2,0 замовл.
