

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**Курс лекцій.**

**Частина 2. Напівпровідникові, провідникові і магнітні  
матеріали.**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 2. Напівпровідникові, провідникові і магнітні матеріали. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Кириленко, К.В. Кириленко, В.М. Головка. – Електронні текстові дані (1 файл 2,905 Мбайт). – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023. – 109 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №5 від 23.02.2023 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 6 від 26.12.2022 р.)*

Електронне мережеве навчальне видання

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

## **Курс лекцій.**

### **Частина 2. Напівпровідникові, провідникові і магнітні матеріали.**

Укладачі: *Кириленко Катерина Всеволодівна*, канд. техн. наук., доц.  
*Кириленко Всеволод Михайлович*, канд. техн. наук, доц.  
*Головка Володимир Михайлович*, д-р. техн. наук, проф.

Відповідальний редактор *Будько В.І.*, докт. техн. наук., доц.

Рецензент *Пушкар М.В.*, канд. техн. наук., доцент., заст. декана.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b>	5
<b>ЛЕКЦІЯ 14</b>	6
<b>ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ</b>	6
Класифікація провідників	6
Провідникові матеріали в електричному полі.	8
Емісійні явища, контактна різниця потенціалів і термоЕРС.	17
Теплові і механічні характеристики провідників.	18
<b>МАТЕРІАЛИ З ВИСОКОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОВІДНІСТЮ</b>	19
Мідь	20
Сплави міді	23
Алюміній	25
<b>ЛЕКЦІЯ 15</b>	28
<b>МАТЕРІАЛИ З ВИСОКИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПОРОМ</b>	28
<b>БІМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ</b>	30
<b>НАДПРОВІДНИКИ ТА КРІОПРОВІДНИКИ.</b>	31
<b>ЗАСТОСУВАННЯ ІНШИХ МЕТАЛЕВИХ ПРОВІДНИКІВ</b>	33
Метали із середнім значенням температури плавлення.	34
Легкоплавкі метали.	35
Благородні метали.	36
Термопарні матеріали.	37
Вугільні провідникові матеріали та вироби	38
Контакти і контактні матеріали	39
Припої та флюси	41
Провідні та резистивні композиційні матеріали, контактоли	42
<b>ЛЕКЦІЯ 16</b>	45
<b>НАПІВПРОВІДНИКИ</b>	45
Класифікація напівпровідників і загальна характеристика їх застосування	45
Електропровідність напівпровідників	48
Явища, пов'язані з впливом зовнішніх факторів на напівпровідники	55
Контактні явища в напівпровідниках: р-п перехід і прилади на його основі	63
<b>ЛЕКЦІЯ 17</b>	69
<b>НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ</b>	69
Прості напівпровідникові матеріали	69
Бінарні з'єднання	71
<b>МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ</b>	75
Основні характеристики магнітного поля	75

Класифікація магнітних матеріалів	76
Намагнічування феромагнітних матеріалів	82
<b>ЛЕКЦІЯ 18</b>	89
<b>МАГНІТОМ'ЯКІ МАТЕРІАЛИ</b>	89
Магнітні матеріали на основі технічно чистого заліза	89
Кремениста електротехнічна сталь	92
Пермалої	95
Альсіфери	96
Спеціальні феромагнетики	96
Високочастотні магнітні матеріали	97
<b>МАГНІТОТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ</b>	101
Леговані мартенситові сталі	103
Відливні магнітотверді сплави	103
Магніти з порошків	104
Сплави, що пластично деформуються	104
Дифузійно твердіючі сплави на основі системи ЮНДК	104
Сплави на основі рідкоземельних металів	105
Магнітотверді ферити	105
<b>СТАБІЛЬНІСТЬ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ</b>	106
<b>Перелік рекомендованої літератури</b>	109

## Вступ

Дані лекції орієнтовані на студентів вищих навчальних закладів за спеціальністю 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” всіх форм навчання і містять інформацію з курсу „Електротехнічні матеріали”.

Сучасне електроенергетичне та електротехнічне устаткування, лінії електропередачі високої та низької напруги, електрофізичне і електротехнологічне обладнання, пристрої електроніки, радіотехніки, автоматики і телемеханіки не можуть бути якісно спроектованими і сконструйованими без використання електротехнічних матеріалів і не можуть ефективно вироблятися та експлуатуватися без знання властивостей і особливостей застосування цих матеріалів. Основні завдання сучасного електротехнічного матеріалознавства: розробляти нові і підвищувати ефективність використання існуючих електротехнічних матеріалів в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці, зокрема за рахунок підвищення питомої потужності електрообладнання, зменшити втрати електроенергії при її передачі в повітряних і кабельних лініях і при роботі електричних машин і пристроїв, забезпечити безаварійність і безпеку роботи при обслуговуванні електроустаткування.

Вивчення дисципліни "Електротехнічні матеріали" сприяє розумінню процесів, що відбуваються в електротехнічних матеріалах і допомагає визначити можливості використання матеріалів в електроенергетиці, електротехніці і електромеханіці та ефективність функціонування і експлуатаційну надійність електрообладнання. Засвоєння критеріїв вибору електротехнічних матеріалів в залежності від принципу роботи, конструкції і умов використання обладнання формує фахівця, здатного виконувати роботу дослідника, конструктора, технолога та експлуатаційника електроенергетичного, електротехнічного, електромеханічного, електрофізичного та випробувального обладнання для виробництва, перетворення, транспортування, розподілу та використання електричної енергії, забезпечуючи в процесі проектування і виробництва високу якість цього обладнання, а в процесі експлуатації ефективно використання, кваліфіковане технічне обслуговування та надійність.

Дисципліна "Електротехнічні матеріали" є обов'язковою при підготовці бакалаврів для роботи в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, а також в суміжних галузях.

# ЛЕКЦІЯ 14

## ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

### Класифікація провідників

*Провідниковий матеріал* – це електротехнічний матеріал, який має властивості провідника і призначений для виготовлення струмопровідних деталей чи провідникових екранів для вирівнювання електричного поля.

Основною електричною властивістю провідника є висока провідність. Цю властивість можуть мати тверді тіла, зокрема метали, тверді електроліти, електролітні розчини чи розплави, іонізовані гази (плазма). Неіонізовані гази і чисті рідини відносяться до діелектриків і стають добрими провідниками тільки в умовах пробою, тобто фактично у стані відмови, коли їх провідність вже не відіграє значної ролі, за винятком використання для комутації електричних кіл.

Залежно від типу вільних носіїв розрізняють

- *електронні* провідники (I роду) - це метали і металеві сплави, що широко використовуються в електротехніці і електроенергетиці, а також деякі нітриди і карбіди перехідних металів;
- *іонні* (II роду) - суперіонні провідники (тверді електроліти), розчини і розплави солей, кислот і лугів, що, через іонну провідність, що приводить до руйнування речовини, не використовуються в електротехніці і електроенергетиці, і є предметом вивчення електрохімії.

Для плазми, яка також не є предметом розгляду, як електротехнічний матеріал, характерним є специфічний тип провідності – сумісна амбіполярна провідність, коли електрони і іони в результаті виникнення сильних об'ємних зарядів, що створюються електронами, рухаються узгоджено в одному напрямку, та багато інших специфічних електрофізичних явищ, які і стали причиною виділення плазми в окремий агрегатний тип речовини.

Класифікувати провідникові матеріали I роду можна за різними критеріями, такими як значення питомого опору, призначення, структура і конструктивні особливості провідникових матеріалів. З подібною класифікацією провідників можна ознайомитися за табл.14.1. Область застосування провідникових матеріалів для виробництва конкретних виробів визначається також їх основними властивостями (табл. 14.2).

Найбільш характерними для провідників явищами є такі процеси: електропровідність, емісія електронів, контактна різниця потенціалів, термо-ЕРС. Важливими для використання провідникових матеріалів в електротехніці і електроенергетиці є також теплофізичні і механічні характеристики, без знання яких використовувати провідники неможливо і які також, поряд з електрофізичними процесами в провідниках, будуть розглянуті нижче.

Таблиця 14.1

## Класифікація електротехнічних провідникових матеріалів

Ознака класифікації	Тип матеріалу
Значення питомого опору	Матеріали високої провідності ( $\rho < 0,1 \text{ мкОм}$ )
	Сплави високого опору ( $\rho > 0,3 \text{ мкОм}$ )
	Кріопровідники (при $T \sim 30 \text{ К}$ $\rho < 10^{-4} \text{ мкОм}$ )
	Надпровідники (при $T$ , близьких до $0 \text{ К}$ , перехід до $\rho = 0$ )
Призначення	Контактні
	Електродні
	Резистивні
	Жаростійкі
	Припої
Структура провідникових матеріалів	Біметали
	Багатошарові матеріали
	Композити
Конструктивні особливості матеріалів	Дротові
	Трубчасті
	Листові
	Фольгові
	Плівкові

Таблиця 14.2

## Застосування провідникових матеріалів

Основні властивості	Провідникові вироби
Мале значення $\rho$ , висока механічна міцність, гнучкість, здатність паятися	Кабелі, шнури, проводи монтажні, обмотки електричних машин і апаратів
Мале значення $\rho$ , висока адгезія до діелектриків, близькі значення $TK\rho$ провідника і діелектрика, здатність паятися	Електроди для конденсаторів, металізація хвилеводів, резонаторів, друкованих плат, інтегральних схем
Велике значення $\rho$ і $TK\rho \sim 0$	Резистори, резистивні елементи
Змінювання $\rho$ під дією механічного навантаження	Тензорезистори
Змінювання $\rho$ при нагріванні	Терморезистори, баретери
Стійкість до механічного стирання, електричної ерозії, незначний перехідний опір	Контакти вимикачів, перемикачів, реле т.п.
Контактні явища	Термопари
Неоднакові значення $TKI$	Біметалічні пластини
Мала робота виходу, висока температура плавлення	Деталі електровакуумних приладів
Висока температура плавлення, густа оксидна плівка	Нагрівальні елементи
Густа оксидна плівка, стійка до розчинів електролітів	Фольга чи пориста маса для електролітичних конденсаторів
Надпровідність	Приладобудування, кабелі, проводи, обмотки електричних машин та апаратів
Змочування, розчинення металів, певна температура плавлення	Припої

## Провідникові матеріали в електричному полі.

*Вплив вільних електронів в металах на їх поведінку в електричному полі.* З погляду зонної теорії до провідників належать речовини, для яких характерними рисами є частково заповнена валентна зона, коли можливий вільний рух електронів по валентній зоні, або відсутність забороненої зони, коли валентна та зона провідності частково перекриваються, внаслідок чого всі валентні електрони можуть вільно рухатися по зоні провідності при дії електричного поля.

При розгляді електрофізичних і теплофізичних процесів в провідниках, зокрема в металах, ми будемо виходити з класичної моделі Друде-Лоренца, яка хоч і не є повністю адекватною, але дає результати близькі до реальних і достатні для електротехнічних застосувань. Згідно з класичною моделлю метал має кристалічну ґратку з позитивних іонів, відштовхування яких компенсується газом вільних електронів.

*Гіпотезу* про електронний газ класичної теорії електропровідності металів підтверджують такі досліді:

1. При довготривалому проходженні електричного струму в колі з декількох металевих провідників, не спостерігається проникнення атомів одного металу в інший, тобто іонна провідність відсутня.

2. При нагріванні металів до високих температур швидкість теплового руху вільних електронів збільшується, а найбільш швидкі вилітають з металу, зумовлюючи електронну термоемісію.

3. При освітленні металів короткохвильовим випромінюванням відбувається вибивання електронів з металу фотонами (фотоефект).

4. В момент різкого гальмування провідника, що швидко рухається, проходить зміщення електронного газу за законами інерції, що призводить до появи різниці потенціалів (фіксується приладами).

5. В металевій пластинці, що розміщена в поперечному магнітному полі, виникає поперечна електрорушійна сила, що відповідає негативно зарядженим частинкам (ефект Холла).

Якщо провідник знаходиться в електричному полі, не маючи контактів з електродами, що створюють поле, то наслідком наявності вільних електронів у металі є *практична відсутність в його об'ємі електричного поля*. В результаті процесу поляризації металу електрони швидко переходять на його поверхню в достатній кількості, щоб повністю скомпенсувати прикладене поле, що створюється джерелом напруги, поляризаційним полем електронів на поверхні металу, і напруженість поля в провіднику дорівнює нулю.

*Поверхнєве поле зарядів* на поверхні провідника в діелектричному середовищі направлене по перпендикуляру до неї, а густина поверхневого



заряду, а відповідно і напруженість електричного поля в діелектричному середовищі, що оточує провідник, тим більші, чим більша кривизна поверхні провідника, що зумовлює розподіл поля в зовнішньому середовищі. Крім того, найбільша щільність електронів також буде спостерігатися в місцях, де кривизна поверхні провідника максимальна (згадайте, що  $\varepsilon_r \varepsilon_0 E = D = \sigma$ ).

При безпосередньому контакті металевого провідника з електродами на відміну від діелектрика, де зв'язаність поляризаційних зарядів дозволяє джерелу напруги повністю компенсувати їх заряд і відновити напруженість поля, що була у вакуумі, у випадку, коли вільні електрони можуть безперешкодно переходити в електрод, джерело напруги, що має контакт з поверхнею провідника, весь час в динамічному режимі намагається скомпенсувати поляризаційний електронний заряд, створюючи при цьому струм, що обмежується внутрішнім опором провідника, зумовленим розсіюванням електронів в ньому. Саме *розсіювання електронів в провіднику і є причиною електропровідності, що супроводжується певним падінням напруги в ньому і створенням невеликого подовжнього поля.*

На електропровідність провідників впливають *температура, склад та структура металу, частота прикладеної напруги і геометричні розміри.*

**Електропровідність провідникових матеріалів.** Основним параметром, який характеризує електропровідність провідникових матеріалів у нормальному стані є *низький питомий електричний опір  $\rho$* , що вимірюється в мкОм·м. Інколи замість питомого опору розглядають обернену йому величину - *питому електричну провідність  $\gamma = 1/\rho$ .*

*Питома електронна провідність*, як було показано раніше, в загальному випадку дорівнює

$$\gamma = e \cdot n \cdot u,$$

де  $n$  – концентрація електронів,  $u$  – їх рухливість.

*Концентрація вільних електронів* в рамках класичної моделі наближено дорівнює числу атомів в одиниці об'єму у металі і може бути розрахована за формулою

$$n = N_A \rho_0 / A,$$

де  $N_A$  - число Авогадро;

$\rho_0$  - густина металу;

$A$  - його атомна маса.

Концентрація електронів у всіх металах приблизно однакова (в межах 10%), але варіація значень  $\rho$  складає біля чотирьох порядків внаслідок різниці в рухливості електронів.

Рухливість, згідно з класичною теорією металів, визначається як:

$$u = q \lambda / (2 m v),$$

де  $q$  і  $m$  – відповідно заряд і маса електрона;  $\lambda$  - довжина його вільного пробігу;  $v$  – теплова швидкість, що визначається іонним чи фононним<sup>1</sup> характером розсіювання електронів (при нормальних умовах теплова швидкість хаотичного руху електронів згідно розподілу Больцмана складає близько  $10^5$  м/с практично для усіх металів). Слід при цьому зауважити, що поступальна швидкість упорядкованого руху електронів в електричному полі (дрейфова швидкість), що зумовлює струм, як правило становить доли м/с.

Таким чином, основним фактором впливу на електропровідність металів є рухливість, яка визначається довжиною вільного пробігу електронів, що залежить від механізму їх розсіювання, який різний для провідників різного складу.

Залежно від складу провідники I роду поділяють на *прості*, що складаються з одного хімічного елементу, і *складні*, що є сумішами, сплавами або хімічними сполуками.

У *простих провідниках, тобто чистих металах* розсіювання електронів відбувається на теплових коливаннях кристалічної ґратки (*фононне розсіювання*)<sup>2</sup>. При даній температурі довжина вільного пробігу електронів визначається параметрами ґратки та іонним радіусом елемента.

Концентрація фононів  $n_\phi$  при температурах нижче температури Дебая  $\theta_D^3$ , що лежить для металів в межах 100 – 400 К, пропорційна  $T^3$  (кріорезистивний стан), а при  $T > \theta_D$  пропорційна  $T$ . Довжина вільного пробігу при фононному розсіюванні обернено пропорційна  $n_\phi$ .

Враховуючи сказане, на залежності  $\rho(T)$  для чистих металів можна виділити дві ділянки: на першій ділянці (до температури Дебая)  $\rho \sim T^3$ , на другій  $\rho \sim T$  (рис. 14.1).

---

<sup>1</sup> Фонон – квазічастинка, що відповідає енергії гармонійної складової при розкладі в ряд реального теплового руху в часі мікročастинки в речовині. Названа по аналогії з фотоном, що відповідає кванту світла.

<sup>2</sup> Теплова енергія речовини дорівнює сумі енергій гармонік, що входять до розкладу її теплового руху в ряд, а тому в результаті зіткнення даної частинки з іншими змінюється характер руху і, відповідно, розподіл гармонік, що можна описати як процес взаємодії частинки з фононами.

<sup>3</sup> Температура Дебая відповідає найвищій, можливій в кристалічній ґратці металу, враховуючи її дискретну структуру, частоті коливань іонів  $\theta_D = h\nu_{\max}/k$ .

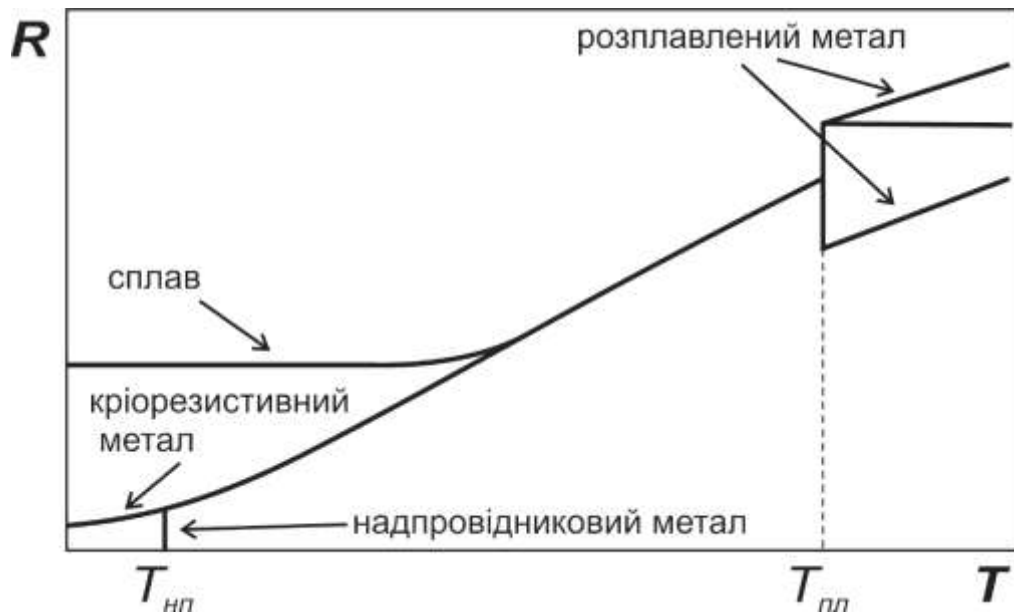


Рис. 14.1 Схематичне зображення температурної залежності питомого опору металевих провідників

Механізм фононного розсіювання є температурозалежним, що приводить до *температурної залежності питомого опору* (рис. 14.1). Кількісно температурна залежність питомого опору провідників, як і інших фізичних величин, характеризується температурним коефіцієнтом опору

$$TK\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} .$$

Зростання температури для більшості чистих металів в області нормальних температур викликає зменшення довжини вільного пробігу при фононному розсіюванні за законом  $\lambda_\phi \sim T^{-1}$ , у результаті чого практично для всіх чистих металів, за виключенням магнетиків, в області нормальних температур має місце позитивний  $TK\rho = 1/T$ , або при 20 °С біля  $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . На практиці  $TK\rho$  може при нормальних умовах приймати значення від  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  для церію і ртуті до  $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  для нікелю.

Для електропровідності провідників, що включають кілька металів (метали технічної чистоти, сплави, інтерметалічні хімічні сполуки тощо) крім фононного розсіювання електронів слід враховувати характерне для таких матеріалів розсіювання електронів на іонах домішки чи добавки<sup>4</sup> внаслідок різної структури електронних енергетичних рівнів різних елементів (*іонне розсіювання*) та на дефектах структури.

<sup>4</sup> Домішкою в металі будемо вважати атоми чи іони іншого металу, що попали в нього природним шляхом чи в процесі виготовлення і не вводилися в нього спеціально, а добавкою, ті, що вводилися в метал спеціально для надання йому певних властивостей.

Довжина вільного пробігу при іонному розсіюванні  $\lambda_i \sim v^4$ . Оскільки для металів, внаслідок виродження, теплова швидкість  $v$  електронів практично стала, а концентрація домішок не залежить від температури, то інтенсивність іонного розсіювання теж практично константа. Тому у випадку переважання іонного розсіювання, наприклад у металах технічної чистоти за відносно низьких температур, а також у *сплавах* значення  $\rho$  однозначно визначається концентрацією домішки чи добавки, а  $TK\rho$  має низьке значення, часто близьке до нуля.

Іонний механізм розсіювання електронів є основним в технічно чистих металах в області низьких температур і в металевих сплавах високого опору, що застосовуються для виготовлення резистивних та нагрівальних елементів при нормальних температурах.

Для технічно чистих металів в залежності  $\rho(T)$  в області низьких температур, з врахуванням малої концентрації дефектів і не досить інтенсивних коливань власних іонів, основну роль відіграє розсіювання на іонах домішки, і опір має сталі значення до певної температури, що тим вища, чим більша концентрація домішки в металі (рис. 14.1). Після перевищення цієї температури основну роль починає відігравати фононне розсіювання електронів і питомий опір лінійно зростає зі збільшенням температури.

Така ж поведінка питомого опору характерна і для *сплавів*, але стабільність  $\rho$  має місце в більшому інтервалі температур.

Враховуючи вплив дефектів на електропровідність металів можна чекати значного зростання їх питомого опору при плавленні, коли спостерігається різке зростання дефектності металів. Але  $\rho$  у цьому випадку більше корелює із зміною об'єму, ніж з дефектністю.

Якщо об'єм металу при плавленні зростає, то внаслідок збільшення інтенсивності коливань іонів  $\rho$  стрибкоподібно зростає, і навпаки. Так, наприклад, відношення питомих опорів у рідкому стані до питомих опорів в твердому для металів, що збільшують опір, складає від 1,45 для натрію до 3,2 для ртуті, а при зменшенні опору - від 0,43 для вісмуту до 0,58 для галію відповідно. В першому наближенні це можна пов'язати із зміною рухливості електронів, як і у випадку зміни  $\rho$  при деформації стискування ( $\rho$  знижується внаслідок зменшення амплітуди теплових коливань іонів) та розтягування ( $\rho$  зростає). Після плавлення у деяких металів у рідкому стані  $TK\rho$  може бути від'ємним.

У феромагнітних матеріалів (залізо, нікель, кобальт і сплави на їхній основі) за дуже низьких температур усі спінові магнітні моменти атомів у межах певного домену орієнтовані паралельно. Внаслідок періодичності розташування вони не викликають розсіяння електронів. Підвищення температури спричиняє порушення спінової упорядкованості, при цьому спін-

магнітна взаємодія викликає додаткове розсіяння електронів і призводить до нелінійності залежності  $\rho(T)$  (рис. 14.2). Вище температури Кюрі, коли доменна структура матеріалу руйнується, магнітна компонента рухливості залишається постійною і відбувається відновлення лінійності  $\rho(T)$ .

В класичній моделі електропровідності металів розглядається електронний газ, поведінка якого описується розподілом Больцмана. Більш близьким до дійсності є припущення, що електрон рухається в періодичному електричному полі, що створюється іонами в вузлах кристалічної ґратки. Згідно з квантовою механікою, в такому випадку рух електрона контролюється ефективною масою, що визначається як друга похідна від кінетичної енергії. Вона може бути як більшою, так і меншою маси вільного електрона, а в деяких випадках навіть від'ємною. Енергія електронів внаслідок неможливості займати однакові енергетичні стани слабо залежить від температури у відповідності з квантовомеханічним розподілом Фермі-Дірака

$$n(\varepsilon) = n_0 / (\exp((\varepsilon - \mu)/kT) + 1),$$

де  $\varepsilon$  – енергія даного електрона,  $\mu$  – хімічний потенціал (рівень Фермі), і реальна швидкість електронів значно перевищує ту, що визначається за тепловою енергією ( $10^5$  м/с). Електрони в металі в такому стані називаються виродженим електронним газом.

Метали з додатньою ефективною масою називаються електронними, наприклад алюміній, а з від'ємною – дірковими, наприклад цинк, молібден. Знак маси носіїв заряду може бути визначений за знаками коефіцієнта Холла або термоЕРС, про що інформація буде надана у відповідних місцях. Слід відзначити, що для металів з найменшим питомим опором, таких як срібло, мідь, золото, коефіцієнт Холла має негативний знак, що повинно свідчити про електронний характер електропровідності, а термоЕРС – додатній, що характерно для діркової провідності. Це свідчить, що модель електронної будови металів, що розглядається, як і класична, не є повністю адекватною, і що вона повинна бути насправді складнішою. Якщо виходити з точки зору, що хімічний зв'язок в металах поліковалентний, то в металах повинна існувати суперорбіталь (поверхня Фермі), що охоплює весь його об'єм, і електрони можуть вільно рухатися по ній. Але заглиблюватися в сучасні квантовомеханічні теорії ми не будемо.

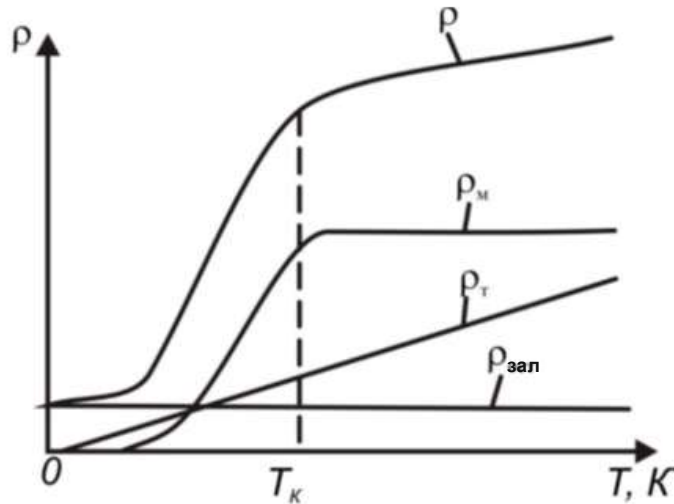


Рис.14.2 – Схематична температурна залежність компонентів питомого опору  $\rho$  ферромагнітного металу:  $\rho_m$  – магнітна,  $\rho_t$  – теплова,  $\rho_{zal}$  – залишкова, що зумовлена неконтрольованими домішками

***Вплив складу провідникових матеріалів на їх електропровідність.***

Питомий опір  $\rho$  складних провідників залежить від характеру взаємодії компонентів, але можна констатувати, що збільшення концентрації домішки чи добавки в межах, поки вона не стане основним компонентом, практично завжди приводить до збільшення питомого опору.

Можна виділити три основні типи складних провідників: гетерогенні структури (механічні суміші, отримані методами порошкової металургії), тверді розчини з необмеженою або обмеженою розчинністю та хімічні (інтерметалічні) сполуки.

У випадку механічної суміші спостерігається монотонна зміна  $\rho$  у межах значень, характерних для чистих компонентів. Питому провідність можна розраховувати за формулами, наведеними при розгляді відносної діелектричної проникності в першій частині посібника, зробивши відповідну заміну.

Для технічних металів з вмістом домішки до 2 – 4 ат. % для питомого опору часто справедливе правило Матіссена, згідно якого

$$\rho = \rho_{\text{чист}} + \rho_{\text{дом}}, \quad \frac{d\rho}{dT} = \frac{d\rho}{dT}_{\text{чист}},$$

де  $\rho_{\text{чист}}$  – питомий опір чистого металу;  $\rho_{\text{дом}}$  – постійна складова питомого опору, зумовлена розсіюванням електронів на іонах домішки. Таким чином, температурна залежність питомого опору для металів з різними концентраціями домішки у цьому випадку буде представлена серією паралельних прямих, нахил яких буде визначатися температурною залежністю основного металу, а положення по осі ординат концентрацією домішки.

Якщо мова йде про сплави, то необмеженій розчинності компонентів відповідає екстремальна залежність  $\rho$  від концентрації одного із компонентів (рис. 14.3), причому якщо провідники належать до однієї групи таблиці Менделєєва, то питомий опір проходить через максимум, що відповідає приблизно однаковій концентрації компонентів, якщо до різних, то максимум зсунутий в сторону компонента з більшим опором.

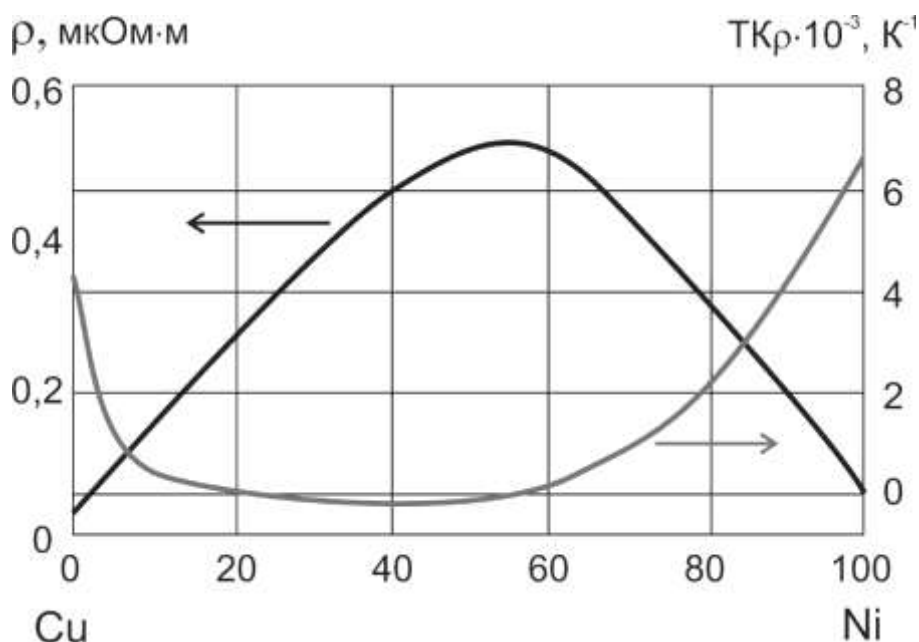


Рис. 14.3 Залежність питомого опору і  $TK\rho$  від складу сплаву міді і нікелю

Чим більша різниця у валентностях і розмірах атомів, тим більше деформується кристалічна ґратка основного металу і зростає питомий опір.  $TK\rho$  при цьому має мінімальні значення в області максимуму питомого опору, що в кілька разів менші, ніж для чистих металів, а часто близькі до нуля.

При обмеженій розчинності надлишок введеної домішки утворює відповідну фазу або вступає в хімічну взаємодію з основним металом, а тому питомий опір буде меншим, ніж у попередньому випадку. Утворення хімічних сполук супроводжується різкими зломами у концентраційній залежності  $\rho$  у точках стехіометричного складу (рис. 14.4).

Утворення дефектів кристалічних ґраток, що викликають розсіювання електронів, відбувається внаслідок теплових коливань власних іонів, наявності іонів домішок, вакансій, дислокацій, механічної деформації. Для практичного застосування металевих провідників важливо, що вплив дефектів структури металів на  $\rho$  менший, ніж на механічні характеристики. Тверда мідь після волочіння має відносно подовження при розриванні у 15-70 разів менше, міцність на розривання у 1,5 рази більшу, ніж м'яка відпалена мідь, в той час як питомий опір зростає менше, ніж на 5%.

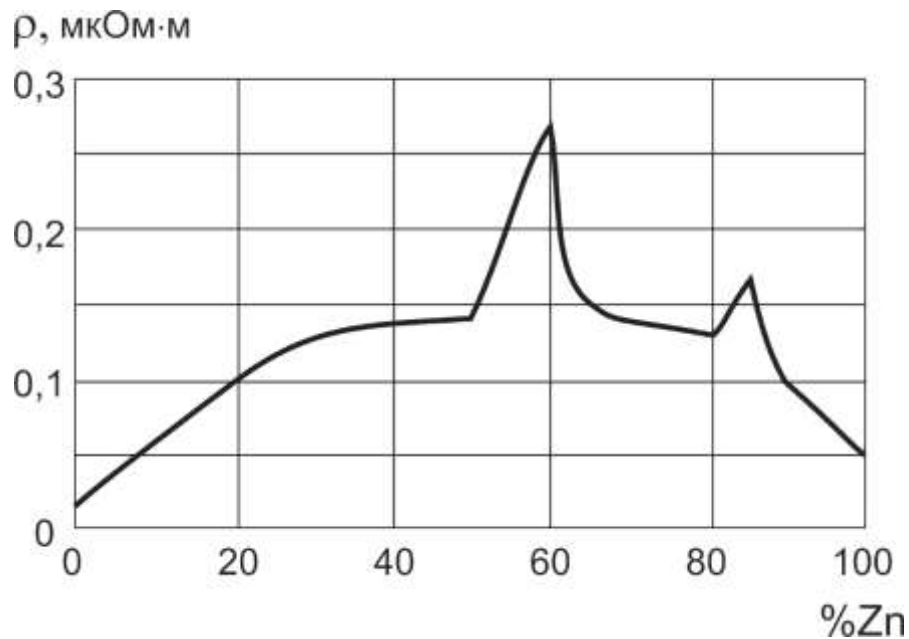


Рис. 14.4 Залежність  $\rho$  від складу сплаву Zn-Mg

**Скін-ефект.** При протіканні змінного струму в провіднику внаслідок електромагнітної індукції виникають вихрові струми (струми Фуко). Вони витісняють змінний струм на поверхню провідника, внаслідок чого густина змінного струму експоненціально зменшується зі збільшенням відстані від поверхні. Явище витіснення змінного струму на поверхню називають скін-ефектом, а товщина на якій густина струму зменшується в порівнянні з

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \gamma \mu_0 \mu}},$$

приповерхневою в  $e$  раз - скін-шаром.

На промисловій частоті на потужних ЛЕП використовують алюмінієвий дріт зі сталевим осердям, що внаслідок скін-ефекту в сталі тільки незначно збільшує загальний опір, тому що струм проходить по алюмінієвій оболонці.

Товщина скін-шару на частоті  $10^8$  Гц стає дуже малою, наприклад, для алюмінію складає приблизно 10 мкм. Тому при високих і надвисоких частотах провідники виготовляють у вигляді коаксіальних кабелів, хвилеводів, у яких струм протікає по тонкому поверхневому шару, який виготовляється з матеріалу з високою провідністю.

Опір провідника при скін-ефекті можна оцінити опором квадрата його поверхні

$$R = \rho / \Delta,$$

що не залежить від розміру квадрата, як і взагалі поверхневий опір.



Часто поверхневий опір використовують для характеристики тонких металевих плівок, покриттів, питомий опір яких зростає при зменшенні товщини внаслідок зростання ролі опору поверхні, що є дефектною.  $TK\rho$  металевих плівок при певній товщині проходить через нуль і стає від'ємним, що дозволяє формувати плівки з термостабільним опором.

### **Емісійні явища, контактна різниця потенціалів і термоЕРС.**

Електрони в металі внаслідок розподілу енергії згідно з формулою Фермі-Дірака при нормальних температурах мають великі швидкості, і при русі перпендикулярно поверхні можуть покидати метал. Але для цього вони повинні затратити певну енергію, виконавши роботу, що називається *роботою виходу*. Робота виходу в грубому наближенні складається з роботи по подоланню сил притягання заряду дзеркального відображення, що формується в металі в результаті кулонівської дії електрона, що вилетів, на електрони в металі, а також по подоланню сил відштовхування подвійного зарядженого шару, утвореного електронами, що вилетіли з металу раніше, і їх дзеркальними відображеннями. Вихід електронів з металу називається *емісією*.

Якщо прикласти додатне зовнішнє поле достатньої величини, то воно витягує емітовані електрони і спричиняє струм термоелектронної емісії, густина якого описується формулою Річардсона – Дешмена

$$j = VT^2 \exp(-A/kT),$$

де  $A$  – робота виходу;

$V$  – постійна для даного металу величина.

В сильних електричних полях бар'єр для виходу електрона з металу, висота якого дорівнює роботі виходу, знижується (*ефект Шотткі*), товщина його зменшується і можуть відбуватися *тунельні* (наскрізні, без перескакування бар'єра і зі збереженням енергії, що мав електрон у валентній зоні,) переходи електронів з металу у зовнішнє середовище. Це явище називається *автоелектронною або холодною емісією*.

При контакті двох металів з різною роботою виходу в зв'язку з переходами електронів з одного металу в інший між ними виникає *контактна різниця потенціалів*, значення якої для металів знаходиться у діапазоні мВ.

В замкненому електричному колі, що складається з послідовно з'єднаних різних провідникових матеріалів, сума контактних різниць потенціалів буде рівна нулю, якщо температура всіх контактів однакова. Якщо контакти провідників знаходяться при різних температурах, то на контакті з більшою температурою зросте контактна різниця потенціалів, що вже не буде врівноважуватися контактною різницею потенціалів контакту з нижчою температурою. В результаті виникне *різниця контактних різниць потенціалів*,

що називається термоелектрорушійною силою (термоЕРС), а в колі виникне струм. Явище виникнення термоЕРС називається ефектом Зеебека.

Для кола, що складається з двох паралельних ізольованих провідників А та В, нероз'ємно з'єднаних на одному кінці (зварених), що називається термопарою (рис. 14.5), напруга між вільними кінцями, або термоЕРС, дорівнює

$$U = \varphi_B - \varphi_A = \frac{k}{e}(T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B} = \alpha(T_1 - T_2)$$

де  $U$ - термоЕРС;

$k$  – стала Больцмана;

$T_1$ , - температура 2-х не з'єднаних холодних кінців;

$T_2$  – температура з'єданого кінця, що нагрівається;

$n_A$ ,  $n_B$  - концентрації електронів в провідникових матеріалах, що знаходяться у контакті;

$\alpha$  - питома термоЕРС.



Рис. 14.5 Схематичне зображення термопари

Таким чином, термоЕРС між двома холодними контактами, що мають однакову температуру, пропорційна різниці температур між ними і нагрітим контактом, коефіцієнт пропорційності називається питома термоЕРС.

### Теплові і механічні характеристики провідників.

Крім електрофізичних характеристик на практиці приділяється багато уваги тепловим характеристикам провідникових елементів, перш за все тепловому коефіцієнту розширення  $TKI$ , який зумовлює можливість використовувати металічні деталі сумісно або з діелектричними деталями без виникнення термомеханічних напружень, а у випадку необхідності (виводи зі скляних балонів електронних приладів) забезпечує вакуумно щільні з'єднання металевих і діелектричних деталей.

$TKI$  металевих провідників змінюється в широких межах від  $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для вольфраму до  $83,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для натрію.

Другим, досить суттєвим для практики параметром металів, є теплопровідність, особливо важлива для провідникових матеріалів, що застосовуються для пропускання струму. Чим більша теплопровідність металу, тим більше тепла, що виділилося при пропусканні струму, може бути відведено і тим ефективніше буде використаний провідник.

Наявність вільних електронів в металах сприяє значному зростанню теплопровідності в порівнянні з діелектриками, і, як правило, чим краще метал проводить струм, тим більша його теплопровідність, наприклад для марганцю

питомий опір  $\rho = 1,85 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  і коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 66,7 \text{ Вт/мК}$ , для вісмуту  $\rho = 1,16 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  і  $\lambda$  всього  $8,4 \text{ Вт/мК}$ , в той час, як для міді  $\rho = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  і  $\lambda = 406 \text{ Вт/мК}$ , для срібла  $\rho = 0,016 \text{ мкОм}$  і  $\lambda = 453 \text{ Вт/мК}$ . Фононний вклад в теплопровідність чистих металів складає 1 – 2% і тільки в забруднених металах і сильно деформованих сплавах може конкурувати з вкладом електронів.

Враховуючи, що теплопровідність і електропровідність зумовлені рухом одних і тих же частинок, можна чекати, що між цими явищами є зв'язок. І дійсно, зв'язок між коефіцієнтом теплопровідності і питомим опором дається законом Відемана-Франца-Лорентца:

$$\rho\lambda = L_0T,$$

$$\text{де } L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2.$$

Закон Відемана-Франца-Лорентца не виконується при температурах, нижчих за температуру Дебая, у випадку, коли значний вклад в теплопровідність вносять фонони, а також для надпровідників.

Як впливає з розподілу Фермі- Дірака електрони навіть при абсолютному нулі температур мають енергію, що складає кілька еВ, якщо відраховувати її від дна зони провідності, в той час як теплова енергія при нормальних умовах складає по порядку величини  $10^{-3}$  еВ, що пояснює відсутність впливу вільних електронів на теплоємність металів.

Для застосування провідникових матеріалів надзвичайно велике значення має температура плавлення, що може приймати значення від  $-39^\circ\text{C}$  (ртуть, єдиний рідкий у нормальному стані метал) до  $3400^\circ\text{C}$  (вольфрам). Температуру плавлення, як і інші характеристики використовують при виборі матеріалу для провідних жил проводів і кабелів, підборі матеріалів для термопар тощо.

До механічних характеристик провідників відносять ті ж характеристики, що і для діелектриків. Основними з них є короткочасна механічна міцність на розтягування, стиснення, згинання, кручення, зминання, довготривала – на повзучість і втому, відносне видовження і звуження при розтягуванні, а також твердість, пружність, пластичність, ударна в'язкість і крихкість.

Механічна міцність на розтягування суттєва для дротів повітряних ЛЕП, твердість – для контактних матеріалів, пластичність характеризує можливість витягувати з даного металу провід, виготовляти фольгу тощо.

## **МАТЕРІАЛИ З ВИСОКОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОВІДНІСТЮ**

Матеріали з високою електричною провідністю використовуються для виготовлення обмоток електромашин, апаратів, ліній передач електроструму, До них висувають наступні вимоги:

- якомога менший питомий опір;

- якомога менший температурний коефіцієнт питомого опору;
- висока механічна міцність (при розтягуванні), гнучкість, низька крихкість;
- властивість легко оброблятися прокаткою та волочінням<sup>5</sup>;
- здатність добре зварюватись та сплавлятися, створювати надійне з'єднання з малим перехідним електричним опором;
- стійкість до окислення і хімічна стійкість;
- корозійна стійкість.

## **Мідь**

*Загальна характеристика.* Мідь відноситься до досить дефіцитних металів. Вміст міді в земній корі 0,003%. Зустрічається вона в самородному стані та у складі сульфідних руд. З мідної руди шляхом послідовних процесів збагачення, випалювання і відновлення отримують сиру (чорну) мідь з домішками до 3%. Електротехнічну мідь отримують з сирої електролітичним очищенням (рафінуванням). Потім її переплавляють та переробляють у заготовки.

Мідь – метал червонуватого кольору, густина її – 8920 кг/м<sup>3</sup>, температура плавлення – 1083 °С. Хімічно малоактивна, кородує тільки в морській воді. До 185 °С не взаємодіє з киснем, до 375 °С утворює окис міді CuO, а при вищих температурах – напівокис міді Cu<sub>2</sub>O. В присутності вологи і вуглекислого газу на поверхні міді утворюється зелений наліт основного карбонату міді. Не реагує з соляною і сірчаною кислотами до концентрації 80%, але у гарячій азотній і сірчаній кислоті розчиняється.

Після вальцювання та волочіння через деформацію і наклеп на поверхні отримують тверду мідь, що має підвищені механічні характеристики та дещо більший питомий опір (0,0177 – 0,018 мкОм·м), ніж у м'якої міді (0,01724 мкОм·м), що виготовляють з твердої шляхом відпалювання. Початок зниження механічних характеристик міді в процесі відпалювання має місце при 200°С, температура рекристалізаційного відпалювання 600°С.

Випускають і використовують до двох десятків марок міді в залежності від кількості домішок, причому вміст домішок зростає при збільшенні цифри після великої букви М (мідь) – від М006 (99,99% міді) до М4 (99% міді). Маленькі букви в позначенні марки означають: б – безкиснева, р – розкиснена фосфором зі зниженим вмістом кисню, у – мідь катодна переплавлена. Як провідниковий матеріал використовують мідь марок М1 (99,9% міді) і М0 (99,95% міді).

---

<sup>5</sup>Волочіння – процес протягування провода через матрицю з конусним отвором з більшим діаметром на вході і меншим на виході для зменшення діаметра провода. Таким чином, наприклад, з міді отримують проводи з діаметром в соті долі мм.

Відпалена мідь марки М1 служить електротехнічним стандартом. Її властивості:  $\rho = 0,017241$  мкОм·м,  $TK\rho = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при температурах від 20 до 150°C. Властивості інших мідних матеріалів можуть подаватися в % від характеристик стандартної міді.

Основні властивості твердої і м'якої міді наведені в табл. 14.3.

Переваги міді, як електротехнічного матеріалу:

- малий питомий опір:  $\rho = 0,017 - 0,018$  мкОм·м,  $TK\rho = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , (менший тільки у срібла);
- висока механічна міцність;
- корозійна стійкість (падає при підвищенні температури);
- добре обробляється (витягується в дріт діаметром до 0,01 мм, прокачується в листи, стрічки, фольгу);
- відносно легко паяється та зварюється.

Тверду мідь застосовують там, де потрібна висока механічна міцність, для контактних проводів, шин розподільних пристроїв, колекторних пластин електричних машин тощо. М'яку мідь застосовують там, де потрібна гнучкість, пластичність: проводи діаметром від 0,01 до 10 мм різного профілю і призначення, струмопровідні жили в кабелях різного призначення, екрани кабелів зв'язку і радіочастотних кабелів тощо. У разі необхідності для захисту від окиснення мідні вироби покривають оловом, сплавом олова і свинцю, нікелем, сріблом, золотом.

**Електропровідність міді.** Температурна залежність електропровідності міді відповідає залежності, характерній для чистих металів. Питомий опір міді зростає від  $3 \cdot 10^{-5}$  мкОм·м при 10 К до  $4 \cdot 10^{-2}$  мкОм·м при 300 К (рис. 14.6). При температурі плавлення міді, що дорівнює 1356 К, її питомий опір стрибкоподібно змінюється від 0,1 мкОм·м до 0,22 мкОм·м, а при подальшому збільшенні температури зростає з  $TK\rho$  трохи меншим, ніж той, що характерний для нерозплавленої міді.

На питомий опір міді досить сильно впливають добавки (рис. 14.7). При концентрації 0,5% добавки в залежності від її типу питомий опір міді збільшується таким чином: срібло, цинк і кадмій – на 5%; алюміній, олово і нікель – на 25 – 40%; залізо, кремній, берилій, миш'як, сірка і фосфор – більше, ніж на 55%.

Правило Матіссена для міді виконується для широкого вибору добавок, таких як індій, нікель, сурма, олово, залізо, миш'як та інші. При цьому питомий опір міді за рахунок введення 1 ат.% добавки може змінюватися в досить широких межах. Якщо добавкою з такою концентрацією є індій, то питомий опір міді складає 0,028 мкОм·м, в той час як для використання як добавки миш'яка питомий опір міді дорівнює 0,084 мкОм·м.

Температурний коефіцієнт питомого опору міді практично однаковий як для твердої міді, так і для відпаленої.

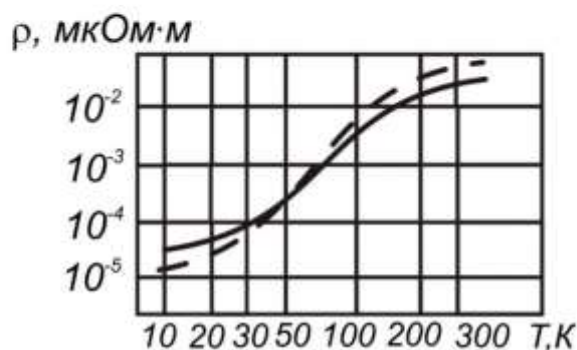


Рис. 14.6 Температурна залежність питомого опору міді (суцільна крива) та алюмінію.

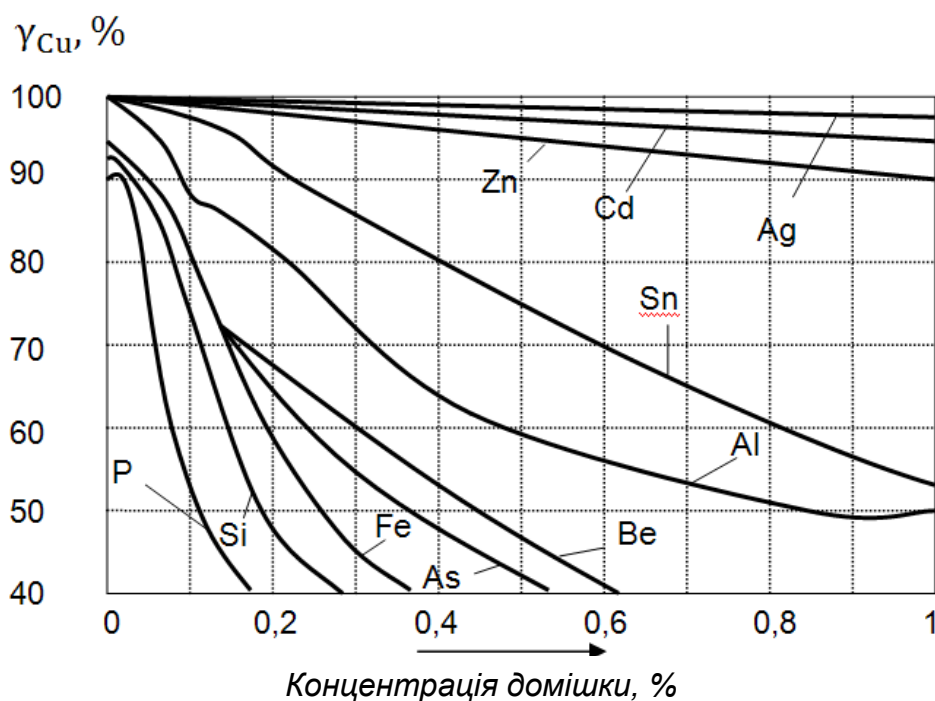


Рис. 14.7 Вплив домішок на питому електропровідність міді

На механічні характеристики (табл. 14.3) міді особливо шкідливо впливають такі домішки, як сірка, вісмут, свинець і кисень. Сірка знижує пластичність міді, внаслідок чого при низьких температурах мідь стає крихкою, вісмут і свинець викликають розтріскування міді при гарячій обробці тиском, кисень сприяє підвищенню питомого опору міді, а також виникненню "водневої хвороби" - розтріскуванню міді під тиском води, що утворюється в ній в результаті хімічної взаємодії водню з киснем.

З теплових характеристик міді (табл. 14.4) можна відзначити температуру плавлення, що в 1,64 раза вища за температуру плавлення алюмінію, і майже в два рази вищу теплопровідність.

Таблиця 14.3

## Основні електричні і механічні характеристики міді і алюмінію

Властивості	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Густина, кг/м <sup>3</sup>	8,96·10 <sup>3</sup>	8,9·10 <sup>3</sup>	(2,6...2,7)·10 <sup>3</sup>	
Межа міцності на розрив, МПа	250 - 500	200-280	100-180	70-100
Відносне подовження перед розривом, %	0,5 – 5,0	18 - 50	0,5 – 2,0	10 - 25
Твердість по Брінеллю, кгс/мм <sup>2</sup>	65 - 120	35 - 38	33	25
Модуль пружності: статичний динамічний	122-132	117	72	66
	112	74	66	54
Питома ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>		1560	1200	900
Питомий опір, мкОм·м, не більше	0,0177- 0,0180	0,01724	0,0290	0,0280

Таблиця 14.4

## Теплові властивості міді і алюмінію

Властивості	Мідь	Алюміній
Температура, °С:		
плавлення	1083	657 – 660
лиття	1150 – 1200	700 – 760
гарячої обробки	900 – 1500	-
початку помітної рекристалізації	~ 200	~150
рекристалізаційного відпалювання	500 – 700	350 -400
ТКІ, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> , в інтервалі 20 - 200°С	16,4	24
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	386	920 – 960
Питома теплота плавлення, МДж/кг	0,213	0,394
Коефіцієнт теплопровідності при 20°С, Вт/(м·К)	385 – 406	209

**Сплави міді**

Сплави міді застосовуються, коли необхідні кращі механічна міцність, підвищена твердість, великий опір тертю, пружність, антикорозійність, мала усадка (0,6...0,8%) порівняно з міддю. Як і мідь можуть бути тверді та відпалені.

Поділяються сплави міді на латунь і бронзи.

*Латунь* – сплав міді з цинком (до 45%). Має більшу міцність на розривання, високу пластичність, що досягає максимуму при вмісті цинку 37%. Піддається корозії у вологій атмосфері. Для запобігання цьому вводять олово, свинець, залізо, алюміній, нікель, марганець. Позначення основних добавок до латуні: О

– олово, С – свинець, К – кремній, З – залізо, Мц – марганець, А – алюміній, Н – нікель, Мш – миш'як.

Марка латуні складається з букви Л і наступної цифри, що вказує відсотковий вміст міді в латуні. Якщо використані добавки, то перша буква їх назв ставиться після Л, а через риску в кінці назви – відсотковий вміст, наприклад ЛС 59-1 – латунь, що містить 59% міді і 1% свинцю.

Латунь дешевша за мідь, але має більші питомий опір (0,07 – 0,33 мкОм·м) і ТКр ( $5 \cdot 10^{-4}$  –  $27 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>). Використовують латуні для виготовлення струмопровідних гвинтів, гайок, шайб, шпильок, штирів, гнізд, пружних елементів для комутуючих пристроїв та штепселів.

**Бронза** – сплав міді з іншими елементами, крім цинку. Позначення бронзи складається з букв Бр (бронза), далі йдуть перші букви назв легуючих елементів, а далі цифри, що показують вміст цих елементів у відсотках, наприклад БрОЦС6-6-3 – олов'яно-цинково-свинцева бронза з 6% олова, 6% цинку і 3% свинцю. Позначення основних добавок для бронз такі ж, як і для латуні, крім того використовуються такі добавки: Ц – цинк, Кд – кадмій, Б – берилій, Ф – фосфор, Т – титан.

Бронзи мають більші значення межі міцності на розривання (250 – 1100 МПа), твердість (НВ = 20 – 260 МПа) і зносостійкість, але вищий питомий опір (0,018 – 0,028 мкОм/м) і менше відносне подовження перед розривом (2 – 65%). Основні характеристики твердих і відпалених бронз та латуні наведені у табл. 14.5

Таблиця 14.5

Склад і властивості деяких мідних електротехнічних сплавів\*

Найменування сплаву і його склад	Питома провідність $\gamma$ відносно міді, %	Межа міцності на розрив, МПа	Відносне подовження перед розривом, МПа
Кадмієва бронза БрКд0,9 Cd – 0,9%, решта мідь	<u>95</u> 83-90	<u>до 310</u> до 730	<u>50</u> 4
Кадмієво-олов'яниста бронза БрКдО-0,8-0,6	<u>55-60</u> 50-55	<u>290</u> до 730	<u>55</u> 4
Берилієва бронза БрБ2 (Be – 2,25%)	<u>17</u> 10	<u>490 - 600</u> 1100	<u>30 – 50</u> 7
Олов'яно-фосфориста бронза БрОФ6,5-0,15	<u>10-15</u> 10-15	<u>400</u> 1050	<u>60</u> 3
Латунь Л68	<u>40</u> 30	<u>380</u> 880	<u>65</u> 5
Латунь ЛС59-1 (свинець – 1%)	<u>30</u> 20	<u>350</u> 450	<u>25</u> 5

\*У чисельнику дані для відпалених бронз і латуні, у знаменнику – твердотягнених.



Наведемо основні властивості та деякі застосування бронзи:  
олов'яниста – високі механічні та технологічні властивості;  
алюмінієвиста – високі механічна та корозійна стійкість;  
свинцевиста – високий коефіцієнт тертя;  
кремениста – висока пластичність, хороші ливарні властивості;  
берилієва – висока міцність, твердість, пружність (використовують для виготовлення колекторних пластин, струмопровідних пружних контактів, втулок, шестерень, пружин і т.д.);  
кадмієва – механічна міцність, твердість (виготовляють контактні проводи, колекторні пластини електромашин спеціального призначення);  
фосфориста – застосовують для виготовлення струмоведучих пружин та твердих припоїв.

### **Алюміній**

Алюміній – це найпоширеніший у природі метал, що міститься у земній корі у кількості 8,8%. Основні властивості алюмінію наведені в табл. 14.3 і 14.4. Відноситься до легких металів<sup>6</sup>. Густина алюмінію 2700 кг/м<sup>3</sup>, що в 3,5 рази менше густини міді.

Отримують алюміній з алюмінієвих руд (бокситів  $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ , нефелінів  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  та інших), спочатку очищаючи їх до чистого глинозему, потім розчиняючи у розплавленому кріоліті і, нарешті, виділяючи його з допомогою електролізу. Отримання алюмінію енергозатратна операція – на тонну металу витрачають 16 тис. кВт·год.

Колір алюмінію сріблясто-білий, він легкотопкий з температурою плавлення 657 - 660°C, має високі значення теплопровідності і пластичності. При холодному волочінні та прокатуванні в результаті наклепу, як і у випадку міді, отримують твердий алюміній, що має підвищені значення межі міцності при розриві, твердості і питомого опору. Рекристалізаційним відпалюванням алюмінію при 350-400°C з твердого одержують м'який (відпалений) алюміній.

За електропровідністю алюміній займає третє місце після срібла та міді, але за значенням є другим, після міді, провідником. Його питома електропровідність значно менше відрізняється для відпаленого і твердого алюмінію і дорівнює 0,028 і 0,029 мкОм·м відповідно. Через більший питомий опір при однаковому значенні опору проводи з алюмінію в 1,63 рази за перерізом більші ніж мідні, але, враховуючи значно меншу густину, в 2 рази легші за них.

Алюміній активно окислюється і покривається оксидною плівкою з великим електричним опором ( $\rho > 10^{14}$  Ом·м), яка створює великий перехідний

---

<sup>6</sup>До легких металів відносяться метали з густиною менше 5000 кг/м<sup>3</sup>.

опір і унеможлиблює пайку звичайними методами. Паяється алюміній або з допомогою спеціальних флюсів або з допомогою ультразвукових паяльників, які руйнують оксидну плівку. Інколи обмежуються пластичним обтисненням у місці контакту.

Якщо на контакт алюмінію з деякими іншими металами, наприклад міддю, діє волога, то виникає гальванічна пара, що породжує електрорушійну силу, в якій алюміній відіграє роль анода (він має з більшістю металів негативний електродний потенціал, що дорівнює  $-1,67$  В), і викликає руйнівну корозію. Для захисту від корозії місця з'єднання алюмінію з міддю покривають лаками.

На питому електропровідність алюмінію особливо негативно діють домішки титану, марганцю та ванадію, менше – міді, срібла і магнію, найменше – цинку, заліза, нікелю і кремнію (рис. 14.8).

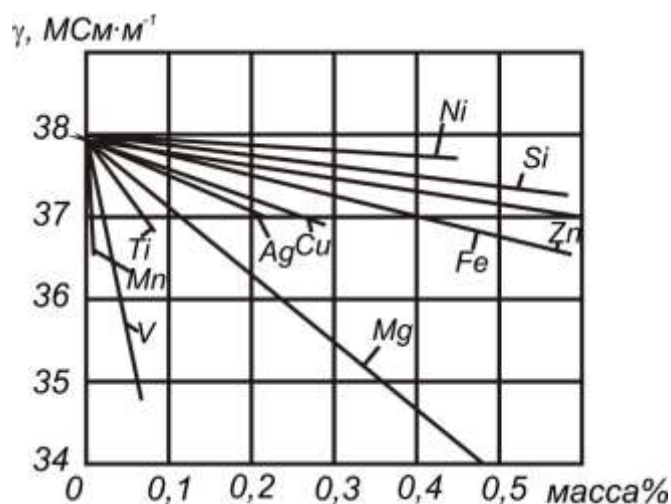


Рис. 14.8 – Залежність питомої провідності відпаленого алюмінію від вмісту домішок

Порівняно з міддю алюміній має гірші значення теплових характеристик, але питома теплоємність і теплота плавлення алюмінію більші, ніж у міді. І хоч температура плавлення алюмінію менша температури плавлення міді, провід з нього краще витримує струмові перевантаження, бо на його нагрівання до температури плавлення і саме плавлення потрібно в 1,58 разів більше теплоти.

В електротехніці використовують алюміній марок А7Е, А6Е, А5Е і АЕ чистотою 99,7; 99,6; 99,5 і 99,5%. З нього виготовляють алюмінієвий дріт марок АТП, АТ, АПТ і АМ, відповідно твердий підвищеної міцності, твердий, напівтвердий і м'який, а також фольгу, електроди і корпуси електролітичних конденсаторів тощо. Слід визначити такий недолік алюмінієвих проводів, як значно більша, у порівнянні з міддю, крихкість.

**Сплави алюмінію** мають малу питому вагу, високі механічні властивості, добрі ливарні якості, легко обробляються різанням і штампуванням, більш зносо- і нагрівостійкі, стійкіші до корозії в порівнянні з чистим алюмінієм, але

мають менші значення відносного подовження при розриві та більші – питомого опору.

В електротехніці найширше застосування зі сплавів алюмінію знаходить *алдрей*, що містить 0,3...0,5% магнію, 0,4...0,7% кремнію і 0,2...0,3% заліза. Він практично зберігає легкість чистого алюмінію, досить близький за питомою провідністю до нього, за механічною міцністю наближається до твердотягнутої міді. Застосовується для виготовлення проводів ліній електропередач;

Можна відзначити також *силумін*, що містить 5...14% кремнію і з якого виготовляють корпуси електромашин потужністю до 4 кВт.

## ЛЕКЦІЯ 15

### МАТЕРІАЛИ З ВИСОКИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПОРОМ

Сплавами високого електричного опору називають пластичні провідникові матеріали з питомим опором від 0,42 до 1,5 Ом·мм<sup>2</sup>/м. За застосуванням ці сплави поділяються на дві групи:

*I група* застосовується для виготовлення точних (еталонних) резисторів з заданим значенням опору. Вони повинні мати малий температурний коефіцієнт питомого опору, малу термоелектрорушійну силу при контактах з міддю, постійний опір в часі;

*II група* – це матеріали для резисторів різноманітного призначення та нагрівальних приладів. Від них вимагається малий температурний коефіцієнт опору, властивість переносити механічні струси та сильне нагрівання (800...1200 °С).

До провідникових матеріалів з високим електричним опором відносяться сплави на основі заліза і міді з додаванням вуглецю, нікелю, хрому, цинку, кобальту, алюмінію. Розглянемо деякі з цих матеріалів більш детально.

*Сталь* - сплав заліза з вуглецем і іншими добавками в залежності від потрібних властивостей - найдешевший і доступний метал, що має високу механічну міцність. На заводі її широкого використання як провідникового матеріалу стоїть високе значення питомого опору, який навіть для чистого заліза сягає 0,1 мкОм·м, а для сталі ще більший. Крім високого питомого опору на втрати електричної енергії на змінному струмі в сталі впливають і інші фактори. При змінному струмі навіть низьких частот в сталі, як у феромагнітному матеріалі, проявляється скін-ефект, тому активний опір при змінному струмі більший ніж при постійному. Крім того додаються втрати потужності на гістерезис.

Звичайна сталь характеризується низькою корозійною стійкістю, тому для роботи у відкритій атмосфері її потрібно захищати покриттям більш корозійно стійкого металу, наприклад цинку.

Для провідників застосовується м'яка сталь (0,1...0,15% вуглецю), питома електропровідність якої в 6...7 раз менша, ніж у міді.

Застосовують сталь для виготовлення проводів ліній передач невеликої потужності, шин, рейок трамваїв, метро.

*Манганін* - сплав жовтуватого кольору, що застосовується для виготовлення зразкових резисторів. Склад манганіну: 85% міді, 12% марганцю, 3% нікелю та інші компоненти в невеликій кількості. В основному використовують дроти з твердого манганіну МНМц3-12 та м'якого МНМцФ33-

12-0,3-0,3. Виготовляють дроти з мінімальним діаметром до 0,02 мм, допустима температура їх нагрівання 200<sup>0</sup>С. Електричні властивості твердого манганіну:  $\rho = 0,48 \pm 0.05$  мкОм·м,  $TK\rho = (1 - 2.5) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , м'якого:  $\rho = 0,47 \pm 0.05$  мкОм·м,  $TK\rho = (-2 - 10) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , коефіцієнт термоЕРС манганіну з міддю в інтервалі температур 0 – 100<sup>0</sup>С не перевищує 1 мкВ/К.

*Константан* має склад: 60% міді і 40% нікелю. За механічними властивостями близький до манганіну. Допустима температура нагрівання 450<sup>0</sup>С (вища, ніж у манганіну). Константан має постійний питомий опір ( $\rho = 0,48 \dots 0,52$  мкОм·м) в широкому діапазоні температур,  $TK\rho$  при 20 °С знаходиться в межах  $(5 \dots 25) \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ . Недоліком є висока термоЕРС в парі з міддю та залізом (45...55 мкВ/К), що обмежує використання резисторів з константану у точних вимірювальних схемах, зате сприяє використанню константану для виготовлення термопар. Широке застосування стримується наявністю дорогого нікелю.

Сплави на основі заліза, що містять залізо, нікель і хром називаються *ніхромами*, при підвищеному вмісті заліза – фероніхромами, і застосовуються для електронагрівальних елементів. Ніхром може використовуватись при 900...1100<sup>0</sup>С і мають вищий температурний коефіцієнт опору  $TK\rho = (100 \dots 200) \cdot 10^{-6}$ , ніж манганін і константан. Така висока робоча температура зумовлена утворенням на поверхні матеріалу щільної оксидної плівки, що має температурний коефіцієнт розширення, близький до  $TKI$  ніхрому, що запобігає її розтріскуванню при нагріванні до високих температур. Взагалі потрібно мати на увазі, що ресурсу ніхрому більш шкодить багаторазова короткочасна комутація, ніж робота при підвищеній температурі. До недоліків ніхрому потрібно віднести підвищену вартість, що пов'язана з використанням нікелю.

Основні характеристики манганіну, константану і ніхрому наведені в табл. 15.1.

Таблиця 15.1

Основні характеристики манганіну, константану і ніхрому

Параметр	Манганін	Константан	Ніхром
Густина, кг/м <sup>3</sup>	8400	8900	8200...8300
Питомий електричний опір, мкОм·м	0,42...0,53	0,48...0,52	1,1...1,2
$TK\rho \cdot 10^6, \text{ K}^{-1}$	-2...25	-(5...25)	100...200
ТермоЕРС у парі з міддю, мкВ/К	1	45...55	-
Міцність при розтягуванні, МПа	450...600	-	650...700
Відносне подовження при розриві, %	15...30	20...40	25...30
Робоча температура, °С	200	400	1000

Сплави системи залізо-хром-алюміній називаються *фехралями* та *хромалями*. Сплави фехраль і хромаль відрізняються за вмістом хрому, в хромалях його в 2 рази більше ніж в фехралях. Зі зростанням вмісту хрому та алюмінію зростає твердість і погіршуються технологічні властивості сплавів. Сплави бояться механічних струсів в нагрітому стані. Скручування проволочи з них треба робити в нагрітому стані (300...400<sup>0</sup>С).

Перевагою фехралей і хромалей є менша вартість, пов'язана з використанням алюмінію замість нікелю. Недоліком сплавів фехраль і хромаль є різке зростання розміру зерен сплаву після нагрівання до температури 900...1000<sup>0</sup>С і охолодження.

Застосовують фехраль і хромаль в електронагрівальних приладах, а також як термодіагностичні матеріали.

*Нейзильбер*. Склад: 16% нікелю, 20% цинку, 64% міді.  $\rho = 0,26$  мкОм·м, температура плавлення 1080<sup>0</sup>С. Застосовують для виготовлення деталей приладів, електромашин і електроапаратури, медичинських інструментів. Виготовляють у вигляді стрічок, прутків, проводів.

### **Біметалеві матеріали.**

Серед *біметалів* широке використання в електротехніці знаходить сталь вкрита шаром міді. Застосовують два способи його виготовлення:

– гарячий – стальну болванку ставлять у форму і проміжок між ними заливають розплавленою міддю. Для отримання потрібного розміру виробу заготовку протягують або прокачують;

– холодний (електролітичний) – стальну заготовку під час електролізу протягують через ванну з мідним купоросом.

Другий спосіб дає рівномірне покриття, але не забезпечує міцність зчеплення та вимагає значних витрат електроенергії.

Механічні та електричні властивості біметалів є проміжними між властивостями мідних та сталених провідників. Застосовують для ліній електропередач, ліній зв'язку, шин, рубильників, конструкційних деталей електроапаратів.

Для виготовлення проводів використовують біметал алюміній – мідь. У цьому випадку круглу алюмінієву заготовку проводу на спеціальних станах опресовують мідною стрічкою. Отриманий біметал потім можна волочити до потрібного діаметра. Недоліком дротів з цього біметалу є крихкість.

При виготовленні теплових реле, вимикачів, термометрів застосовують *термічні біметали* – дві зварені між собою деформовані пластинки різних металів. При нагріванні внаслідок різних ТКІ метали по різному розширюються і при досягненні критичної деформації біметал різко змінює форму, що приводить до замикання контактів.

## НАДПРОВІДНИКИ ТА КРІОПРОВІДНИКИ.

Для деяких провідників при температурах, близьких до абсолютного нуля, може наступити стан надпровідності. Для таких матеріалів на температурній залежності є характерним стрибок питомого опору до нуля при температурі надпровідності  $T_{HP}$ . Струм, збуджений в напівпровіднику, може протікати роками без затухання. В наш час надпровідність виявлена у 39 хімічних елементів, з яких 33 метали, і в більше тисячі різних сплавів і хімічних сполук.

Явище надпровідності довгий час не могли пояснити. Основною перешкодою для розуміння явища надпровідності було те, що електрони описуються розподілом Фермі – Дірака, для якого справедливий принцип заборони Паулі. Відповідно до нього мінімальна енергія електронів при абсолютному нулі повинна відповідати температурі Фермі, що незначно відрізняється від енергії при кімнатній температурі, і в поведінці електронів не повинно було б відбуватися ніяких змін, крім зниження питомого опору до деякого мінімального рівня.

Вихід було знайдено Купером через півстоліття марних спроб пояснити надпровідність. За Купером при температурах, нижчих від температури переходу у надпровідний стан, сусідні електрони починають взаємодіяти між собою за рахунок поляризації кристалічної ґратки і узгоджують просторову орієнтацію спінів, утворюючи спарені електрони, що можуть розглядатися як одна частинка, так звана пара Купера, що має цілочисленний спін і внаслідок цього розподіляється по закону Бозе-Енштейна, а не Фермі-Дірака.

Пари Купера займають найнижчий енергетичний рівень і перетворюються в єдиний континуум, який рухається узгоджено. Він відділений від наступного енергетичного рівня енергетичною щільною, більшою ніж енергія коливань іонів, а тому кристалічна ґратка не може вплинути на рух спарених електронів при зіткненні з ними і питомий опір, що зумовлений розсіюванням електронів на іонах кристалічної ґратки, у випадку надпровідників падає до нуля.

У надпровіднику можлива сила струму обмежується тільки створюваним цим струмом магнітним полем. Його напруженість не повинна перевищувати деяке, характерне для кожного надпровідника, критичне значення, щоб не зруйнувати надпровідність. При перевищенні критичної густини струму і, відповідно, критичної напруженості магнітного поля, надпровідність зникає. Зруйнувати надпровідність можна і прикладаючи зовнішнє магнітне поле, що перевищує критичну напруженість (індукцію) магнітного поля.

Надпровідники є ідеальними діамагнетиками, для них характерним є так званий ефект Мейсснера – Оксенфельда, згідно з яким магнітне поле всередині надпровідника не може існувати, тобто  $\mu_r = 0$ , Тому для напівпровідника характерне зависання в просторі над магнітом.

Серед надпровідників розрізняють надпровідники I, II і III роду, а також високотемпературні надпровідники.

До надпровідників I роду відносяться ті матеріали, в яких опір зникає стрибкоподібно і які мають одну критичну напруженість магнітного поля. До них відносяться всі чисті метали, крім перехідних. Вони мають малі значення критичної температури і критичної напруженості магнітного поля. Максимальні значення цих параметрів має свинець ( $T_{кр} = 7,2$  К,  $H_{кр} = 65$  кА/м), найменші – вольфрам ( $T_{кр} = 0,01$  К,  $H_{кр} = 0,1$  кА/м).

Надпровідники II роду переходять у надпровідний стан в деякому інтервалі температур, причому в процесі переходу у них співіснують надпровідникова і нормальна фази. Для надпровідників II роду існує дві критичні напруженості магнітного поля: перша визначає область існування чисто надпровідного стану, друга, що може перевищувати першу на порядок-два, є границею між напівпровідниковим змішаним і нормальним станами. Ефект Мейсснера – Оксенфельда в них існує тільки в області від нуля до  $H_{кр1}$ . Характеристики надпровідників II роду кращі в порівнянні з надпровідниками I роду, наприклад, для ніобію  $T_{кр} = 9,22$  К,  $H_{кр2} = 155$  кА/м.

Для надпровідників III роду, які називають "твердими", характерна велика кількість неоднорідностей, таких як дефекти та домішки, в результаті чого критична густина струму зростає на кілька порядків. До "твердих" надпровідників відноситься велика група сплавів і хімічних сполук на основі ніобію та ванадію, наприклад сплав ніобій-германій ( $T_{кр} = 23,2$  К,  $j_{кр} = 1$  ГА/м<sup>2</sup>).

Особливий інтерес (поки що для електроніки та приладобудування, а у перспективі й для електротехніки) становлять високотемпературні надпровідники на основі  $Ba(Sr)-Cu-R-O$ , де R – рідкісноземельний елемент (найчастіше ітрій, лантан), температура переходу якого у надпровідний стан лежить вище температури зрідження азоту (77 К), а в окремих випадках може досягати згідно з повідомленнями в періодичній літературі  $\sim 240$  К, але при цьому надпровідність матеріалу дуже нестабільна. Основними недоліками високотемпературних надпровідників є обмежена кількість заморожувань до температури надпровідності та крихкість (кераміка!).

Надпровідники використовують при виготовленні потужних магнітів<sup>7</sup>, електричних машин і трансформаторів з високим коефіцієнтом корисної дії, кабельних ліній для передачі великих потужностей, індуктивних акумуляторів енергії, хвилеводів з надзвичайно низьким згасанням, елементів пам'яті тощо.

Кріопровідниками називають такі матеріали (наприклад, мідь, алюміній, срібло, берилій), що суттєво знижують опір в низькотемпературній області. Питомий опір кріопровідників при кріогенних температурах стає на кілька порядків нижчим, ніж при нормальній температурі. Відповідно зменшуються і втрати енергії внаслідок протікання струму.

---

<sup>7</sup>У Великому адронному колайдері використовується більше 1600 надпровідникових магнітів вагою понад 27 тон кожний. На їх охолодження витрачають 10 000 тон рідкого азоту і 120 тон рідкого гелію.



Густина струму в кріопровідниках при робочих температурах в тисячі раз перевищує густина струму в них при нормальних температурах. Це дозволяє більш ефективно, ніж надпровідники, використовувати їх в електричних машинах, кабелях, сильноточових електричних пристроях, зважаючи на те, що при цьому потрібні більш висококиплячі та дешевші, в порівнянні з гелієм, охолоджувальні речовини – зріджений водень або зріджений азот.

## **ЗАСТОСУВАННЯ ІНШИХ МЕТАЛЕВИХ ПРОВІДНИКІВ**

*Тугоплавкі метали.*

До тугоплавких відносяться метали, які мають температуру плавлення вищу ніж у заліза ( $1539^{\circ}\text{C}$ ). Отримують вироби з них методами порошкової металургії (спіканням порошків або їх пресуванням при високій температурі і великому тиску) або методами електровакуумних технологій (плазмова обробка, плавлення електронним чи лазерним променем). Тугоплавкі метали легко окиснюються, а тому їх використовують при підвищених температурах в атмосфері інертних газів або у вакуумі.

*Вольфрам* – важкий, твердий метал ясно-сірого кольору, високої густини  $d = 19300 \text{ кг/м}^3$ , має найвищу з металів температуру плавлення  $T_{\text{пл}} = 3400^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 0,055 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , межу міцності при розтягуванні  $\sigma_p = 550 - 3500 \text{ МПа}$ . При механічній обробці його структура стає волокнистою, що сприяє підвищенню механічної міцності вольфраму. Має малу схильність до утворення електричної дуги, велику стійкість до електричної ерозії та механічного зношування. У захисній атмосфері може працювати до  $2200^{\circ}\text{C}$ .

Недоліки вольфраму: труднощі механічної обробки, окиснення при наявності кисню при температурі, вищій за  $400^{\circ}\text{C}$ , утворення сульфідних плівок у присутності сполук сірки, необхідність великого контактного тиску для отримання малого перехідного опору контакту.

Використовують для розжарювальних ниток ламп, електродів, підігрівачів, пружин в електричних лампах, для контактів, у рентгенівських, електронно-променевих і газорозрядних трубках, а також як контактний матеріал.

*Тантал* – важкотопкий метал ясно-сірого кольору з блакитним відтінком,  $d = 16600 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 3000^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 0,124 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 350 - 1250 \text{ МПа}$ . Як і вольфрам, тантал отримують методами порошкової металургії, але спікання проводять у вакуумі через сильне газопоглинання танталу.

Тантал значно технологічніший ніж вольфрам. З танталу виготовляють фольгу й листи товщиною  $0,008 - 2 \text{ мм}$ , дріт діаметром  $0,03 - 1,6 \text{ мм}$ , безшовні тягнені трубки зовнішнім діаметром  $1,5 - 4 \text{ мм}$  при товщині стінок  $0,3 - 1,9 \text{ мм}$ . Використовують тантал для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп,

плівкових резисторів, у виробництві об'ємних електролітичних конденсаторів великої ємності тощо.

*Молибден* – за зовнішнім виглядом і властивостями близький до вольфраму, але майже в два рази легший. Його характеристики:  $d = 10200 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 2620 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 350 - 2500 \text{ МПа}$ . Значно легше, ніж вольфрам, піддається обробці. Нестійкий до окиснювання у вологій атмосфері, оксиди утворюються вже при  $250^\circ\text{C}$ .

Використовують для виготовлення жаростійких сплавів, анодів радіоламп, нагрівачів, розривних контактів, вакуумно-щільних з'єднань зі стеклами С47-С52 тощо.

*Ніобій* - важкотопкий метал ясно-сірого кольору,  $d = 8570 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 2470^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,15 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 350 - 900 \text{ МПа}$ . За хімічними властивостями та методами механічної обробки і використанням ніобій схожий на тантал. Має відносно високі температури переходу у надпровідний стан: для чистого ніобію  $T_{\text{кр}} = 9,2 \text{ К}$ , а для його сплавів до  $23,2 \text{ К}$ , а тому його використовують для виробництва надпровідних магнітів і хвилеводів.

### **Метали із середнім значенням температури плавлення.**

До цих матеріалів відносяться метали з температурою плавлення від  $500$  до  $1600^\circ\text{C}$ . В електротехніці використовують залізо, кобальт і нікель та сплави на їх основі. Всі ці метали і сплави мають феромагнітні властивості, що впливають на значення питомого опору.

*Залізо* в чистому вигляді має великий питомий опір і його не використовують як провідниковий матеріал. Властивості сплавів на основі заліза розглянуті вище в розділах "Матеріали з високим електричним опором" і "Біметалеві матеріали".

*Кобальт* – пластичний блискучий білий метал із сіруватим відтінком,  $d = 8850 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,064 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 500 \text{ МПа}$ . На повітрі не окислюється. При  $300^\circ\text{C}$  покривається тонкою плівкою  $\text{CoO}$ .

Використовують як складову частину сплавів і композиційних жаростійких і магнітних матеріалів з підвищеною механічною міцністю і низьким ТКр.

*Нікель* – сріблясто-білий, тягучий метал з характеристиками  $d = 8960 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 1453 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,068 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 400 - 600 \text{ МПа}$  у відпалених зразків. Менш

активний, ніж залізо і кобальт. На повітрі не тьмяніє, з киснем починає взаємодіяти при 500°C, стійкий до дії води і органічних кислот.

Має феромагнітні властивості. Використовується як компонент для жароміцних, провідникових і магнітних сплавів з особливими фізико-хімічними властивостями. У чистому вигляді застосовується у вакуумній техніці, для декоративного покриття, іноді – для нагрівальних елементів.

### **Легкоплавкі метали.**

До легкоплавких металів відносяться метали з температурою плавлення нижче 500°C, такі як свинець, олово, цинк, кадмій, ртуть, індій і галій.

*Свинець* – досить важкий ( $d=11340 \text{ кг/м}^3$ ) метал синювато-сірого кольору з металевим блиском на свіжому зрізі. На повітрі його поверхня швидко тьмяніє. Має низьку температуру плавлення  $T_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C}$  і підвищене значення  $\rho = 0,190 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ . М'який і високопластичний метал ( $\sigma_p = 16 \text{ МПа}$ , легко ріжеться ножем), не стійкий до вібрації. Свинець при низьких температурах стійкий до корозії під дією води, сірчаної та соляної кислот, але руйнується азотною та оцтовою кислотами, а також розкладається в присутності вапна та гниючих органічних речовин. При підвищених температурах вода поступово окиснює свинець, бо розчиняє його оксидну плівку. Отруйний.

Використовується для плавких запобіжників, пластин акумуляторів, захисних екранів від радіації, у м'яких припоях, для захисних оболонок кабелів. В останній час захисні оболонки кабелів виготовляють з алюмінію і пластмас, як більш дешевих матеріалів.

*Олово* – сріблясто-білий метал з кристалічною будовою (при згинанні паличка олова тріщить внаслідок тертя кристалів). Його характеристики: біле олово, що стійке при температурі вищій 13,2 °C має густину  $d=7250 \text{ кг/м}^3$ , для порошкоподібного сірого олова, що існує при нижчих температурах,  $d=5850 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 232^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,113 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 500 \text{ МПа}$ . Введення 0,5% сурми або вісмуту унеможлиблює перехід білого олова в сіре. Слабо окислюється в повітрі та в кислотах.

Біле олово м'яке, тягуче, з нього можна отримати тонку фольгу. Олов'яна фольга використовується для обкладинок деяких типів конденсаторів, фольга із олов'яно-свинцевого сплаву для обкладинок слюдяних конденсаторів. Крім того, олово входить до складу припоїв і бронз, а також його застосовують як захисне покриття міді і сталі.

*Ртуть* має рекордно низьку температуру плавлення  $-39^{\circ}\text{C}$  (єдиний рідкий при нормальних умовах метал) і максимальне з усіх металів значення питомого опору  $\rho = 0,958 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , при нагріванні легко окислюється. Дуже отруйна.

Ртуть розчиняє лужні та лужно-земельні метали, магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій, платину, золото й срібло, утворюючи амальгами. Нерозчинні у ртуті залізо, вольфрам і тантал.

Застосовують ртуть для ртутних ламп і газорозрядних приладів, ламп денного світла, контактів реле, термометрів.

### **Благородні метали.**

В електротехніці вважають благородними металами золото, срібло, платину і паладій, до них в загальному випадку додають і інші метали платинової групи, такі як іридій, осмій, рутеній, родій. Ці метали мають високу хімічну стійкість, в тому числі і при підвищених температурах. Золото, срібло і платина на повітрі не окиснюються до плавлення.

Благородні метали зустрічаються у природі у вигляді самородків і в складі різних руд. Добувають їх металургійною і хімічною переробкою, а потім електролітично очищують.

*Золото* – метал жовтого кольору,  $d = 19300 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 1063^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 0,0225 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 150 \text{ МПа}$ . Має високу пластичність, можна отримувати фольгу товщиною  $0,01 \text{ мкм}$ .

Використовують як контактний матеріал для корозійностійкого покриття в електронній техніці, для електродів фотоелементів, як покриття резонаторів НВЧ, внутрішніх поверхонь хвилеводів, для прецизійних контактів з малим контактним тиском і малою напругою, а в сплавах зі сріблом, нікелем і цирконієм для контактів з підвищеними твердістю, ерозійною і корозійною стійкістю.

*Срібло* – метал білого кольору, пластичний, з найнижчим серед металів питомим опором  $\rho = 0,0158 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ . Інші характеристики:  $d = 10490 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 961^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_p = 200 \text{ МПа}$ .

Застосовують для контактів, для нанесення електродів на діелектрик при вимірюваннях, для електродів в керамічних конденсаторах, гальванічного покриття у ВЧ і НВЧ пристроях, у складі твердих припоїв, у виробництві срібно-цинкових і срібно-кадмієвих акумуляторів. Недолік: понижена хімічна стійкість, особливо по відношенню до сірковмістних речовин, підвищений коефіцієнт дифузії в кераміку, що спричиняє її старіння.

*Платина* – блискучий тугоплавкий метал сірувато-білого кольору. Має характеристики  $d = 21450 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_{\text{пл}} = 1770^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 0,098 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p = 150 \text{ МПа}$ .

Надзвичайно хімічно стійкий, пластичний, температуростійкий (до 1600°C) метал, але має не високу твердість.

Використовують для контактних сплавів з нікелем, сріблом, золотом і іридієм, термопар, розтяжок електровимірювальних приладів. Сплави платини з ітрієм стійкі до окиснення та до зношування, допускають велику частоту вмикань, але дорогі і використовуються в особливих випадках. Сплави платини з родієм застосовують в термопарах.

*Паладій* – метал сріблясто-білого кольору, найлегший:  $d = 12020 \text{ кг/м}^3$  і найбільш легкоплавкий метал платинової групи:  $T_{\text{пл}} = 1550^\circ\text{C}$ , його питомий опір  $\rho = 0,108 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , межа міцності при розриві  $\sigma_p = 200 \text{ МПа}$ .

Використовують в електровакуумних техніці для поглинання водню (1 обсяг паладію поглинає до 900 обсягів водню). В з'єднаннях з сріблом і міддю застосовують для контактів.

### **Термопарні матеріали.**

Для вибору пар металів для термопар потрібно користуватися абсолютною термоЕРС, яка виникає в однорідному провіднику з даного металу при наявності в ньому різниці температур між його кінцями. Абсолютна термоЕРС може мати різні знаки в залежності від особливостей електропровідності металів. Холодний кінець провідника з різницею температур буде мати заряд вільних носіїв заряду в металі, які в результаті нагрівання збільшують швидкість, а тому будуть накопичуватися біля нього. Експеримент показує, що саме в цьому відношенні класична модель металічного зв'язку в твердому тілі, в якій вважається, що носіями заряду в металі є електрони, не відповідає експериментальним даним. Наприклад, у цинку, молібдені та деяких інших металах електронам доводиться приписувати позитивний заряд, що відповідає дірковій провідності (див. розділ про напівпровідники), а в міді, золоті, сріблі про знак носіїв заряду нічого визначеного сказати не можна в силу суперечливого характеру результатів визначення типу носіїв з допомогою термоЕРС та ефекту Холла, про який буде розказано в розділі Магнітні матеріали.

Абсолютна термоЕРС може мати різні знаки, а по абсолютній величині має значення від 18 мкВ/К для хрому до 75 мкВ/К для вісмуту. ТермоЕРС термопари можна розрахувати як алгебраїчну (з врахуванням знаку) різницю абсолютних термоЕРС вибраних металів.

При визначенні верхньої межі вимірюваних температур термопарами враховується стійкість матеріалів термопари до навколишнього середовища. Найчастіше застосовують такі термопари:

- платинородій (90% платина, 10% родій) - платина – для вимірювання температур до 1600<sup>0</sup>С;
- мідь – константан (60% міді, 40% нікелю) і мідь – копель (56% міді, 44% нікелю) – для вимірювання температур до 350<sup>0</sup>С;
- залізо – константан, залізо – копель, хромель (90% нікель, 10% хром) – копель – до 600<sup>0</sup>С;
- хромель– алюмель (95% нікелю, 5% алюміній, кремній, магній) – до 900...1000<sup>0</sup>С.

Найбільша термоелектрорушійна сила у хромель-копелевих термопар, в найширшому інтервалі температур працює термопара платинородій – платина. Для вимірювання криогенних температур можна використовувати термопару залізо-золото.

### Вугільні провідникові матеріали та вироби

З неметалічних провідників для електротехніки особливо важливі матеріали на основі вуглецю або електровугільні вироби. Сировиною для виробництва електровугільних виробів служить сажа, графіт або антрацит. Вихідна сировина подрібнюється та змішується з кам'яновугільною смолою. Їй надають необхідної форми і обпікають (для щіток 800<sup>0</sup>С, вугільних електродів – 3000<sup>0</sup>С). При високих температурах випалювання вуглець штучно переводять в графіт, тому такий процес називають графітуванням. Вугільні вироби мають від'ємний ТКр.

З вугілля виготовляють щітки електричних машин, електроди для прожекторів, електроди для дугових електропечей і електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів. Вугільні порошки використовують в мікрофонах. З вугілля виробляють високоомні резистори, розрядники для телефонних мереж, елементи електровакуумної техніки.

*Щітки* – ковзний контакт для підведення (відведення) струму в електричних машинах. Розміри від 4×4 до 35×35 мм висотою 12...70 мм. Марки щіток класифікують за складом і технологією виготовлення, за питомим опором, допустимою густиною струму, лінійною швидкістю на колекторі, коефіцієнтом тертя, твердістю тощо.

Розрізняють *вугільно-графітні (Т, УГ), графітні (Г), електрографітовані (ЕГ), міднографітні (М, МГ), бронзово-графітні(БГ) щітки*. Основні параметри даних типів щіток наведені в табл. 15.2

Таблиця 15.2

Основні параметри щіток для електромашин.

Параметри	<i>Т, УГ</i>	<i>Г</i>	<i>ЕГ</i>	<i>М, МГ</i>	<i>БГ</i>
Допустима густина струму, А/см <sup>2</sup>	6...8	7...11	9...11	12...20	20
Допустима лінійна швидкість, м/с	10...15	12...25	25...45	15...20	20
Питомий опір, Ом·мм <sup>2</sup> /м	18...60	10...46	10...45	0,03...1,2	0,5...0,9

В залежності від складу щітки використовують в таких пристроях:

*G* – в машинах високої напруги, машинах постійного струму невеликої і середньої потужності, швидкохідних турбогенераторах із сталевими кільцями;

*UG* – в генераторах і електродвигунах невеликої і середньої потужності;

*MG* – в авто -, авіагенераторах, синхронних машинах, в тягових (рудничних) машинах з пониженою напругою;

*EG* – в електромашинах середньої і великої потужності, в машинах із змінним навантаженням і важкими умовами комутаційних струмів, в тягових та швидкохідних електродвигунах (мають найпоширеніше застосування).

*Вугільні порошки* для мікрофонів виготовляють із антрациту двох типів: дрібнозернистий (сито для просіювання має 52 отвори на  $1\text{см}^2$ ) та крупнозернистий (сито має 45 отворів на  $1\text{см}^2$ ), що відпалюють при  $600 - 800^\circ\text{C}$  для збільшення опору. Питомий опір дрібнозернистого вугільного порошку  $\rho = 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Вугільний порошок також використовують зі зв'язуючою речовиною для виготовлення вугільних електродів, але при цьому випалювання проводять при температурі  $3000^\circ\text{C}$ .

*Графіт, сажу, піролітичний вуглець, боровуглецеві плівки* використовують для виготовлення недротяних резисторів, що мають широкий діапазон номінальних значень, незначну злежність опору від напруги, високу стабільність при підвищеній температурі і вологості.

*Природний графіт* – модифікація чистого вуглецю шаруватої структури з великою анізотропією електричних і механічних характеристик.

*Сажу* – дрібнодисперсний вуглець з домішками смолистих та інших речовин. Лаки з сажою мають малий питомий опір і використовують для вирівнювання форми електричного поля в електричних машинах високої напруги.

*Піролітичне вугілля* – вугілля, що отримане шляхом піролізу (сухої відгонки деревинних порід без доступу кисню) у камері, де розміщені керамічні або скляні основи заготовок для резисторів, на які і наноситься провідниковий шар.

### **Контакти і контактні матеріали**

Контакти можна поділити в загальному випадку на нероз'ємні, роз'ємні, ударні та ковзні.

Нероз'ємні контакти (паяні, зварені) можуть піддаватися окисненню та корозії під дією навколишнього середовища, а тому їх потрібно захищати лаками (для захисту пайки найчастіше використовують целюлозний цапонлак) або емаллями.

До роз'ємних контактів з різних металів (скрутка, гвинтове з'єднання) ставиться вимога відсутності гальванічної пари, що у вологій атмосфері може приводити до електрохімічної корозії, від якої роз'ємні контакти потрібно захищати, як і нероз'ємні, лаками або емалями. При відкручуванні гайки або ослабленні гвинтового з'єднання внаслідок пластичної деформації з'єднаних металів при значних струмах може виникати електрична ерозія, спричинена розрядами. Для її уникнення потрібно періодично підтягати гвинтові з'єднання.

Ударні (розривні) контакти працюють в складних умовах. По-перше, в ударних контактах можлива *електрична ерозія*, пов'язана з розплавленням і переносом матеріалу в газоподібному і, особливо, в рідкому станах, розрядами, що виникають при розмиканні струму, і приводять до утворення на контактних поверхнях наростів і кратерів. Чим більші значення питомої теплоємності, температури і питомої теплоти плавлення й сублімації, тим менше ерозія.

Як правило, між контактуючими поверхнями виникає *дуга* з гіперболічною вольт-амперною характеристикою, тепла дія якої і приводить до руйнування електродів. З ним борються обмеженням струму і часу горіння дуги з допомогою дугогасильних схем, а також вибором для контактів жаростійких матеріалів з підвищеним струмом виникнення дуги, таких, як наприклад вольфрам, високою температурою і теплою плавлення.

Для ударних контактів широко використовують мідь, сплави й біметали на її основі. Виникаючі на її поверхні оксидні і сульфідні плівки можуть порушувати роботу у випадку низьковольтних і слабкострумових контактів, але в потужнострумових внаслідок малої сили зчеплення оксидної плівки з міддю вона руйнується дугою, оголюючи металеву мідь.

Ще однією проблемою ударних контактів є їх *зварювання* під дією високої температури і контактного тиску, що може привести до деформації і часткового розплавлення поверхонь контактів, а також до втрати здатності до розмикання. Найбільшу стійкість до зварювання має вольфрам, а вугільно-графітні матеріали взагалі не зварюються.

У порядку зменшення стійкості до зварювання матеріали для потужнострумових контактів розташовуються у такому порядку: графіт, вольфрам, композиції W-Mo, W-Cu(Ag), карбід вольфраму – срібло, Ag-Cd, металокераміка Ag-CdO(CuO), Ag(Cu) – графіт тощо.

В результаті *хімічної корозії* на поверхні контактних матеріалів утворюються оксидні, сульфідні, карбонатні і інші плівки з низькою питомою провідністю, що обмежують струм. Високу стійкість до корозії мають золото, платина і їхні сплави з іридієм, родієм і деякими іншими металами.

*Механічна зношуваність* виникає внаслідок удару і стискування контактних поверхонь та тертя між ними. Слід відзначити, що гальванічні покриття з благородних металів мають більш високу твердість і зносостійкість, ніж метали у масиві.



Для слабкострумних (від частки до одиниць ампера) контактів застосовують благородні і тугоплавкі метали.

До використовуваних благородних металів відносяться срібло, золото, платина і різні сплави на їх основі. Срібло використовують в бездугових контактах, золото і платину – в прецизійних, стійких до виникнення оксидних і сульфідних плівок, а сплави, що мають високу твердість, ерозійну і корозійну стійкість, для контактів, де може виникати дуга.

З тугоплавких металів застосовують вольфрам, молібден і вольфрам, легований молібденом.

До металевих ковзних контактів відносяться колекторні пластини електричних машин, які виготовляються в основному із твердої міді, бронзи або металокераміки Ag-CdO, струмознімачі трамваїв і тролєї тролейбусів, що виготовляються із мідно-графітних сплавів. В пружинних металевих ковзних контактах для потенціометрів, реостатів тощо застосовують спеціальні марки бронз: кадмієві, берилієві і хромисті, що мають високу пружність, стійкість до стирання і низькі значення питомого опору. Для виготовлення ковзних контактів використовують латунь, а також металокераміку, що застосовується для контактів апаратів всіх класів потужності. Вона більш стійка до оплавлення, приварювання та зношування.

### **Припої та флюси.**

Припої – це спеціальні сплави, які використовуються для паяння, якщо необхідно утворити механічно міцний, інколи герметичний шов або постійний нерозривний (чи ковзний) контакт з малим перехідним опором. Припій повинен мати меншу температуру плавлення, ніж метали, що паяються. Припій, розтікаючись по металу, дифундує в нього і частково розчиняє, в результаті чого утворюється проміжний прошарок, який після охолодження з'єднує деталі.

Припої поділяють на дві групи: м'які припої з температурою плавлення до 400°C і тверді з  $T_{пл} > 500^\circ\text{C}$ . Для м'яких припоїв межа міцності 50-70 МПа, для твердих - до 500 МПа.

До м'яких припоїв відносяться олов'яно-свинцеві припої з вмістом олова від 18 (ПОС-18) до 90% (ПОС-90). Їх питома провідність становить 9-13% питомої провідності чистої міді, а  $TKI = (26-27) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . До м'яких припоїв відносять припої з добавками алюмінію і срібла, ще більш легкоплавкими є припої з добавками вісмуту і кадмію.

До твердих припоїв належать мідно-цинкові (ПМЦ) і срібні (ПСр).

*Флюси* – це допоміжні речовини, що створюють умови, необхідні для паяння і забезпечують:

- розчинення і видалення оксидів і бруду з поверхні спаюваних металів;
- захист під час паяння поверхні металу і розплавленого припою від окиснювання;

- зниження поверхневого натягу розплавленого припою;
- поліпшення розтікання припою та змочування ним з'єднаних поверхонь.

За впливом на припаюваний метал флюси діляться на кілька груп.

*Активні (кислотні) флюси* на основі соляної кислоти, хлористих і фтористих сполук металів тощо. Ефективні, але потрібно мати на увазі проблему відмивання. Для паяння електронних схем кислотні флюси використовувати не можна.

*Безкислотні флюси* – це каніфоль і флюси на її основі, що виготовляються з додаванням неактивних речовин (спирту, гліцерину). Вони є основними флюсами при паянні в електротехніці та електронній техніці.

*Активовані флюси* на основі каніфолі з додаванням невеликої кількості солянокислого чи фосфорнокислого аніліну, саліцилової кислоти, солянокислого діетиламіну тощо. Висока активність цих флюсів дає можливість паяти без попереднього видалення оксидів після знежирювання.

*Антикорозійні флюси* виготовляють на основі фосфорної кислоти з додаванням різних органічних сполук і розчинників а також на основі органічних кислот. Залишки цих флюсів не викликають корозії.

### **Провідні та резистивні композиційні матеріали, контактоли**

В загальному випадку композиційні провідникові матеріали, в тім числі провідникові пасти, кермети і контактоли широко застосовують в електроніці при виготовленні керамічних конденсаторів, бездротових композиційних резисторів, провідних шарів, струмопровідних доріжок, контактних площинок в інтегральних схемах, монтажі дискретних елементів радіоелектронної апаратури, кріпленні кристалів цифро-знакових індикаторів до підкладок і т.п.

В електротехніці при випробуваннях електротехнічних матеріалів потрібно забезпечити надійний контакт між матеріалом зразка і джерелом напруги, для чого на поверхню зразка наносять електроди з допомогою композиційного провідникового матеріалу - провідникової пасти.

В композиційних провідникових матеріалах як провідну фазу найчастіше використовують порошки металів срібла, паладію, а також золота, родію і напівпровідників – діоксиду олова, оксиду кадмію, карбідів кремнію і вольфраму, силіцидів металів, графіт і сажу. Як органічні в'язучі речовини застосовують полімери, фенольні або ефірні смоли – гліфталеву, епоксидну та кремнійорганічну. Композиції на їх основі чутливі до дії вологи і температури. Граничні робочі температури до 150°C.

Для отримання високої вологостійкості і підвищеної до 350°C робочої температури використовують неорганічні в'язучі речовини (неорганічні емалі, порошкоподібне скло). Такі провідникові композиції після спікання при

високих температурах мають менше значення питомого опору, ніж композиції з органічною в'язучою речовиною.

Найширше використання отримали провідникові пасти на основі срібла та паладію. Пасти на основі срібла містять вуглекисле срібло або оксид срібла, які при температурах вище  $500^{\circ}\text{C}$  розкладаються з виділенням вуглекислого газу або кисню і дають на поверхні зразка чисте срібло. В пастах використовують, як в'язуче, розчин каніфолі в скипідарі, а як плавень, що поліпшує контакт срібла з керамікою, оксид вісмуту ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), борнокислий свинець ( $\text{PbV}_4\text{O}_4$ ) або безводну буру ( $\text{Na}_2\text{V}_4\text{O}_7$ ). Температура в'язання пасти  $825^{\circ}\text{C}$ .

Температурний коефіцієнт опору композиційних провідникових матеріалів, що використовуються для нанесення контактів, знаходиться на рівні  $2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  і залежить від складу матеріалу і кількісного співвідношення компонентів.

Кермет – це композиція оксиду кремнію і 90 % порошка хрому або суміші срібла і паладію в співвідношенні 5:4. Після нанесення пасти і термообробки при  $1100^{\circ}\text{C}$  отримують волого - і термостійку плівку товщиною 20...25 мкм з питомим поверхневим опором від  $10^3$  до  $10^6$  Ом.

Для отримання нероз'ємних електричних контактів в радіоелектроніці використовують провідникові клеї – контактоли. Як в'язуча речовина в контактолі використовуються епоксидні або кремнійорганічні смоли, а як наповнювач – порошки срібла, нікелю, паладію, золота та ін. Контактולי мають високу міцність та еластичність, низьку густину, високу антикорозійну стійкість. Питомий опір контактолів  $1 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Для високотемпературних нагрівачів для роботи в агресивних середовищах використовують композиційні резистивні матеріали. Методами порошкової металургії (гаряче спікання при високій  $\sim 1700 - 1800^{\circ}\text{C}$ ) і високому тискові (порядка  $10^8$  Па) отримують суцільнокерамічний нагрівач з виводами в діелектричній оболонці з нітриду кремнію і з провідниковою фазою з композиції нітрид кремнію з добавками провідникових карбідів або нітридів перехідних нагрівостійких металів, таких як гафній або цирконій, силіцид молібдену тощо з концентрацією, що перевищує поріг перколяції.

Щоб зрозуміти, що таке поріг перколяції, потрібно мати на увазі, що при використанні композиційних матеріалів, що є статистичними сумішами компонентів з дуже різними за величиною питомими опорами, такими як діелектрик і провідник, в них має місце явище перколяції (протікання), яке полягає в тому, що при певній концентрації провідника в діелектрику, коли виникає можливість створення неперервного провідникового каналу між електродами, загальний опір різко знижується на багато порядків внаслідок переходу від діелектричної до провідникової електропровідності. Концентрація

провідникового матеріалу, при якій відбувається цей перехід, і називається поріг перколяції, який для об'ємних зразків теоретично дорівнює 0,17 у відносних одиницях.

Для перколяційного питомого опору статистичного композита є багато формул, серед яких відзначимо дві: першу, формулу перколяції, що дає залежність електропровідності композита зі сторони діелектрика:

$$\rho_p = \rho_d \left( 1 - \frac{x_m}{x_c} \right)^t,$$

та другу - формулу МакЛахлана, що працює у всьому діапазоні концентрацій,

$$(1 - f_c) \frac{\sigma_i^{1/s} - \sigma_M^{1/s}}{\sigma_i^{1/s} + \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \sigma_M^{1/s}} + f_c \frac{\sigma_c^{1/t} - \sigma_M^{1/t}}{\sigma_c^{1/t} + \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \sigma_M^{1/t}} = 0,$$

де  $\rho_p$ ,  $\rho_d$  - питомий опір композиту і діелектрика,

$x_m$ ,  $x_c$  - відносна концентрація металевої фази та поріг протікання,

$t$  - показник перколяції,

$f_c$ ,  $\sigma_c$  - об'ємна доля і провідність на порозі перколяції,

$\sigma_i$ ,  $\sigma_M$  - провідність діелектрика і провідника,

$s$ ,  $t$  - до - і запороговий індекси перколяції.

Ці формули справедливі для механічної статистичної суміші компонентів. Якщо в процесі отримання матеріалу утворюються нові речовини, то задача сильно ускладнюється через невизначеність складу композиту.

Крім того, частинки компонентів повинні бути приблизно однакового розміру. У тих випадках, коли частинки одного компоненту - діелектрика чи провідника, будуть значно дрібніші від частинок другого компонента, буде мати місце відхилення значення порогу протікання від теоретичного.

Для матричних сумішей, коли матриця є провідникова, поріг протікання може бути значно меншим, а коли діелектрична, то значно більшим, ніж для статистичної суміші.

# ЛЕКЦІЯ 16

## НАПІВПРОВІДНИКИ

### Класифікація напівпровідників і загальна характеристика їх застосування

Напівпровідником, як відомо, називають речовину, основною властивістю якої є здатність сильно змінювати електропровідність при дії зовнішніх факторів, що здатні змінити або енергетичний стан електронів у напівпровіднику, або параметри самого напівпровідника. Властивості напівпровідників мають багато електротехнічних матеріалів, тому для визначення основних характеристик напівпровідникових матеріалів і можливостей їх використання дуже важливо систематизувати їх за такими класифікаційними ознаками, як хімічний склад, структура та механізм електропровідності.

За хімічним складом напівпровідникові матеріали класифікують на органічні (антрацен, полінафталін, поліацетилен тощо) та неорганічні, які в свою чергу поділяються на кілька груп.

До простих або елементарних неорганічних напівпровідників відноситься 9 хімічних елементів: бор (III група табл. Менделєєва, ширина забороненої зони  $W_{зз} = 1,1$  еВ), кремній (IV група,  $W_{зз} = 1,12$  еВ), германій (IV група,  $W_{зз} = 0,72$  еВ), фосфор (V група,  $W_{зз} = 1,5$  еВ), миш'як (V група,  $W_{зз} = 1,2$  еВ), сірка (VI група,  $W_{зз} = 2,5$  еВ), селен (VI група,  $W_{зз} = 1,7$  еВ), телур (VI група,  $W_{зз} = 0,36$  еВ), йод (VII група,  $W_{зз} = 1,25$  еВ),

Складні напівпровідники включають напівпровідникові хімічні сполуки типу  $A^{IV}B^{IV}$ , наприклад SiC,  $A^{III}B^{V}$ , до яких відносяться фосфіди, арсеніди і антимоніди, наприклад арсенід галію GaAs, фосфід галію GaP, антимонід індію InSb, сполуки типу  $A^{II}B^{VI}$ , наприклад оксид цинку ZnO, сульфід свинцю PbS та інші.

До склоподібних напівпровідників відносять халькогенідні стекла, що отримують сплавленням халькогенів (S, Se, Te) з елементами III, IV і V груп, а також напівпровідникові кисневмісні стекла з оксидів металів із змінною валентністю (Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu тощо). Такі оксидні напівпровідники одночасно мають у своєму складі різновалентні стани одного і того ж елемента, що й зумовлює електронну провідність.

Використовують також композиційні напівпровідники або напівпровідникові комплекси – багатофазні матеріали, в яких напівпровідникові матеріали з'єднані глинистою, скляною або іншою зв'язкою, такі як силіт, тіріт, віліт, летін тощо.

До зовнішніх факторів, що здатні змінити або енергетичний стан електронів у напівпровіднику, або параметри самого напівпровідника, звичайно відносять електричне та магнітне поля, температуру, випромінювання

різного характеру, механічні напруги і деформацію. Характер реакції напівпровідника на зовнішній вплив в значній мірі визначає можливу область його технічного застосування (табл. 15.3).

В електронних елементах, наприклад, використовують залежність електропровідності напівпровідників від електричного поля. Електронні напівпровідникові прилади мають ряд таких переваг над електронними лампами:

- малі габарити і маса, особливо в інтегральних схемах;
- простота і надійність конструкції, стійкість до вібрації і ударів;
- відсутність кіл розжарення, що приводить до суттєвого зниження інерційності і потужності споживання;
- великий термін служби і ресурс.

В елементах фото - і магнітоелектроніки основними факторами, що викликають зміни електропровідності, є освітлення і магнітне поле.

В приладобудуванні напівпровідники працюють як датчики для перетворення неелектричних величин (температури, тиску, деформації, магнітного поля і т.і.) в електричні.

В електроенергетиці напівпровідники застосовують для обмеження перенапруг та виробництва електричної енергії з теплової та сонячної.

Напівпровідники здатні виконувати і зворотну функцію – перетворювати енергію електричного поля в світлову, теплову тощо.

Найбільш широко напівпровідникові матеріали застосовуються у виробках, які використовують контактні явища між напівпровідниками з різними типами електропровідності, а також між напівпровідниками та іншими матеріалами. Контактні явища у напівпровідниках - основа побудови більшості виробів електронної техніки. Вони визначають також макровластивості неоднорідних напівпровідників, таких як варистори, позистори та інші (табл. 15.4).

## Області застосування об'ємних напівпровідникових матеріалів

<b>Зовнішній фактор</b>	<b>Реакція матеріалу</b>	<b>Можлива область застосування</b>
Температура $T$	Зміна провідності	Терморезистори (позистори, термістори)
Випромінювання $h\nu$	Зміна провідності	Фотоелементи, фоторезистори, датчики випромінювання
Електричне поле $E$	Зміна провідності (нелінійність ВАХ)	Варистори (обмежувачі перенапруги)
	Інжекція і рух об'ємного заряду (ефект Ганна)	Діоди Ганна (генерація високочастотних коливань)
	Утворення р-п переходу на контакті напівпровідників	Активні елементи електронної техніки
	Перерозподіл щільності заряду полем	Польові прилади
	Випромінювання світла	Світлодіоди, напівпровідникові лазери
	Нагрівання	Нагрівачі
Магнітне поле $H$	Зміна провідності	Помножувачі частоти, модулятори і підсилювачі, магніторезистори
	Виникнення поперечної ЕРС	Датчики Холла (вимірники магнітних полів)
Механічне навантаження $G$	Зміна провідності	Тензорезистори
Гرادієнт температури	Виникнення термоЕРС	Термогенератори, вимірювачі температури

## Застосування контактних явищ в напівпровідниках

Контактна система	Процес, що має місце в системі	Технічне застосування
<i>p-n</i> перехід	Вентильний ефект	Діоди
	Розділення носіїв заряду <i>p-n</i> переходом	Біполярні транзистори, сонячні елементи, фотодіоди, фототранзистори
	Модуляція ширини області просторового заряду <i>p-n</i> переходу	Польові транзистори, варикапи
	Лавинний пробій <i>p-n</i> переходу	Стабілізатори напруги
	Рекомбінаційне випромінювання	Світлодіоди, інжекційні лазери
	Вплив температури на генераційно - рекомбінаційні процеси	Термодіоди, термотранзистори, позистори
	Ефект Зеебека	Термогенератори
	Ефект Пельт'є	Холодильники
Перехід метал-напівпровідник	Вентильний ефект	Високочастотні діоди, транзистори
Перехід метал-діелектрик - напівпровідник	Зміна поверхневих властивостей	Діоди, транзистори, варикапи, фотоварикапи на основі МДН структур
	Захват і звільнення заряду в діелектрику	Прилади з зарядовим зв'язком

**Електропровідність напівпровідників**

Електропровідність напівпровідників залежить не тільки від інтенсивності зовнішнього фактора, але і від чистоти самого напівпровідника. Для проявлення напівпровідникових властивостей вміст випадкових домішок в кремнії не повинен перевищувати  $10^{-11}\%$ , германії -  $5 \cdot 10^{-9}\%$ , селені -  $8 \cdot 10^{-3}\%$ , а при синтезі напівпровідникових хімічних сполук –  $10^{-5} - 10^{-6}\%$ . Саме такі високі вимоги до чистоти напівпровідників і затримували довгий час їх застосування.

Зручніше всього розглядати електропровідність напівпровідників з позицій зонної теорії твердого тіла, що пояснює появу у речовині вільних носіїв заряду. Для напівпровідників, поза залежністю від будови, згідно цієї теорії характерна наявність не дуже широкої (не більш 3 еВ) забороненої зони між заповненою електронами валентною зоною і зоною провідності на енергетичній



діаграмі. Для того, щоб напівпровідник проводив, необхідно валентному електрону за рахунок флуктуацій теплової енергії або інших зовнішніх джерел надати необхідну енергію, щоб він міг перейти з валентної зони до зони провідності, де всі енергетичні рівні вільні, і рухаючись там, зумовив електропровідність.

Слід враховувати, що поряд з генерацією носіїв заряду в напівпровідниках одночасно протікає і зворотний процес – рекомбінація електронів з дірками чи навпаки. Коли швидкість прямого і зворотного процесів зрівнюється, встановлюється рівноважна концентрація носіїв заряду, яка і визначає питомий опір напівпровідника при даних умовах.

Характер електропровідності є найважливішою ознакою класифікації напівпровідникових матеріалів. За цією ознакою розрізняють власні напівпровідники, що не містять дефектів та домішок, які впливають на їхню електропровідність, та домішкові, які, в свою чергу, у залежності від природи домішок діляться на електронні (донорні домішки та добавки) та діркові (акцепторні домішки та добавки). В ролі домішок можуть виступати атоми інших елементів, надлишок власних атомів, дефекти кристалічної ґратки. Якщо атоми домішки чи добавки знаходяться у вузлах кристалічної ґратки, то вони мають назву *домішка чи добавка заміщення*, якщо в міжвузлях – *домішка чи добавка впровадження*.

До власних напівпровідників відносяться прості напівпровідники і ряд хімічних сполук, таких як арсенід галію, антимонід індію, арсенід індію тощо, що мають донорно-акцепторний зв'язок.

На рис. 15.1,а наведена енергетична діаграма власного напівпровідника, у якого електрони можуть надходити в зону вільних енергетичних рівнів і зумовлювати електронний струм по зоні провідності лише з валентної зони. У валентній зоні в результаті переходу зона - зона з'являється вільний дозволений енергетичний рівень, вакансія для валентного електрона, яка, як описано в розділі "Класифікація ЕТМ в рамках зонної теорії" рухається в напрямку, протилежному до напрямку руху електронів, за рахунок "естафетного" заповнення електронами. Саме її рух розглядають як рух частинки з позитивним зарядом, що дорівнює заряду електрона, і ефективною масою, що дорівнює другій похідній по швидкості від кінетичної енергії, яку прийнято називати діркою. Рух дірок по валентній зоні відповідає дірковому струму.

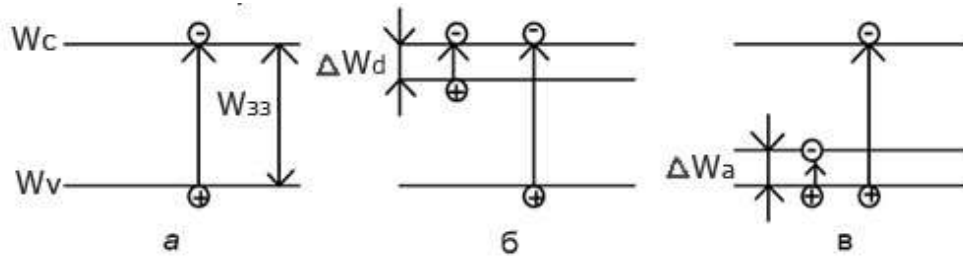


Рис. 15.1 Енергетичні діаграми власного (а), електронного (б) і діркового напівпровідника:  $W_{33}$  – ширина забороненої зони,  $W_c$  – енергія, що відповідає дну зони провідності,  $W_v$  – енергія, що відповідає стелі валентної зони,  $\Delta W_d$  – енергетична відстань донорних рівнів від дна зони провідності,  $\Delta W_a$  – енергетична відстань акцепторних рівнів від стелі валентної зони

Таким чином, електропровідність власного напівпровідника при будь-якому засобі збудження (температура, світло при власному поглинанні з довжиною хвилі  $\lambda = 1,234/W_{33}$  мкм, при  $W_{33}$  в еВ, і меншою), зумовлюється переходом валентних електронів з валентної зони у зону провідності та генерацією пар вільних носіїв заряду електрон - дірка. Носії заряду, що з'являються в результаті переходу зона - зона, називають *власними*.

Враховуючи наявність двох типів носіїв заряду в напівпровіднику, значення його питомої провідності за визначенням дорівнює

$$\gamma_i = qn_i(u_n + u_p),$$

де  $u_n$ ,  $u_p$  - рухливість електронів та дірок відповідно.

Концентрація носіїв заряду – електронів і дірок - у власних напівпровідниках однакова і визначається формулою:

$$n_i = p_i = 2N_e \exp(-W_{33}/2kT) = 2N_p \exp(-W_{33}/2kT),$$

де  $n_i$ ,  $p_i$  - концентрація власних електронів і дірок;

$N_e$  та  $N_p$  - число рівнів у вільній і валентній зонах;

$W_{33}$  - ширина забороненої зони.

Через більшу інерційність дірок електропровідність власних напівпровідників носить здебільшого електронний характер, тобто наближено:

$$\gamma_i = qn_i u_n.$$

За даних умов збудження концентрація власних носіїв тим більша, чим меншою є ширина забороненої зони. Росту концентрації власних носіїв сприяє також збільшення інтенсивності збудження. За високих рівнів збудження, коли концентрація носіїв досягає  $10^{25}$  м<sup>-3</sup>, внаслідок взаємодії носіїв між собою напівпровідник втрачає напівпровідникові властивості і набуває провідникові. Такий напівпровідник називається *виродженим*. У виродженому напівпровіднику в результаті збільшення інтенсивності фонованого розсіювання

з ростом температури електропровідність почне зменшуватися, що характерно для провідників.

В загальному випадку електропровідність напівпровідника визначається не лише концентрацією вільних носіїв заряду, але і їхньою рухливістю. Рухливість носіїв заряду напівпровідників, а відповідно і їх питомий опір, визначається механізмом розсіювання носіїв заряду. До причин розсіювання носіїв заряду, які по різному впливають на температурну залежність рухливості відносяться:

- теплові коливання атомів чи іонів кристалічної ґратки;
- домішки в іонізованому чи нейтральному стані;
- дефекти ґратки (порожні вузли, домішки впровадження, дислокації, тріщини тощо).

Для власних напівпровідників, а також для домішкових за підвищених температур, основним процесом, який визначає значення рухливості носіїв заряду, є розсіювання на теплових коливаннях іонів в вузлах кристалічної ґратки (фононне розсіювання), що в меншій мірі залежить від температури напівпровідника, ніж концентрація носіїв заряду. Тому, з певною точністю можна знехтувати залежністю рухливостей електронів і дірок від температури і температурну залежність питомої провідності власного напівпровідника в температурному інтервалі його використання описати рівнянням

$$\gamma_i(T) = A \exp(-W_{33} / 2kT),$$

де  $A$ - константа.

Якщо побудувати залежність електропровідності від температури в функціональних (напівлогарифмічних) координатах  $\lg(\gamma) = f(1/T)$ , коли масштаб по осях підбирається так, щоб зображувана залежність в потрібному інтервалі значень аргумента відображалася прямою лінією (в даному випадку замість  $\gamma = A \exp(-W_{33}/2kT)$  буде  $\lg(\gamma) = \lg(A) - W_{33}/(2k) \cdot 1/T$ , що при  $y = \lg(\gamma)$ ,  $a = \lg(A)$ ,  $b = W_{33}/k$ ,  $x = 1/T$  дасть  $y = a - bx$ ), то на прямолінійній ділянці графіка за двома точками  $\gamma_1(T_1)$  і  $\gamma_2(T_2)$  можна визначити ширину забороненої зони

$$W_{33} = 3,968 \cdot 10^{-4} \lg\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right).$$

У домішкових напівпровідниках, на відміну від власних, де концентрація носіїв заряду різного знаку однакова, в залежності від валентності добавки концентрація електронів чи дірок буде переважати іншу.

При введенні у власний напівпровідник атомів елементів п'ятої групи таблиці Менделєєва чотири електрони добавки утворюють хімічний зв'язок з чотирма сусідніми атомами напівпровідника, а п'ятий електрон залишається не зв'язаним. Він може створювати зайняті електронами енергетичні рівні в забороненій зоні біля дна вільної зони. При достатній концентрації домішки у забороненій зоні може виникати навіть додаткова домішкова енергетична зона.

Порушення періодичності кристалічної ґратки напівпровідникового матеріалу (вакансія, атом домішки), тобто дефект, також може спричинити появу у забороненій зоні напівпровідника дозволених для електронів енергетичних рівнів.

Дефекти кристалічної решітки, здатні при збудженні віддати електрон у зону провідності, прийнято називати донорами. Перехід електронів з донорних рівнів в зону провідності вимагає менших енергетичних затрат, ніж перехід зона - зона (рис. 15.1, б). Концентрація вільних електронів у цьому випадку буде значно перевищувати концентрацію дірок, поява яких зумовлена перекиданням електронів з валентної зони в зону провідності і напівпровідник матиме яскраво виражену електронну електропровідність.

Концентрація електронів при температурі напівпровідника  $T$  у не виродженому електронному напівпровіднику розраховується за формулою

$$n = \sqrt{N_d N_e} \exp(-\Delta W_d / 2kT),$$

де  $N_d$  - концентрація донорів;

$N_e$  - концентрація енергетичних рівнів у зоні провідності;

$\Delta W_d$  - відстань донорного рівня від дна зони провідності.

При підвищених температурах, коли донорні рівні повністю іонізовані, але температура ще недостатня для перекидання електронів з валентної зони в зону провідності, через спустошення донорних рівнів у забороненій зоні досягається насичення концентрації електронів в зоні провідності на рівні

$$n = \sqrt{N_d}$$

і напівпровідник набуває властивостей провідника.

При введенні домішок елементів третьої групи або акцепторних, в забороненій зоні поблизу стелі валентної зони утворюються незаповнені акцепторні енергетичні рівні. На них, при низьких, відносно ширини забороненої зони, енергіях, будуть переходити електрони з валентної зони і забезпечувати домішкову діркову провідність по валентній зоні без відповідної електронної, бо іони трьохвалентної домішки, що захопили електрон і сформували повний зв'язок з сусідніми атомами напівпровідника, залишаються у вузлах кристалічної ґратки. Дефекти, здатні захоплювати електрони з валентної зони напівпровідника, називаються *акцепторами*.

Основними носіями заряду у напівпровіднику у цьому випадку є дірки. Концентрація дірок у не виродженому дірковому напівпровіднику

$$p = \sqrt{N_a N_p} \exp(-\Delta W_a / 2kT),$$

де  $N_a$  - концентрація акцепторів;

$N_p$  - концентрація енергетичних рівнів у валентній зоні;

$\Delta W_a$  - відстань від стелі валентної зони до акцепторного рівня.

При підвищених температурах, коли всі акцепторні рівні заповнені, але температура ще недостатня для перекидання електронів з валентної зони в зону провідності, через заповнення всіх акцепторних рівнів у забороненій зоні концентрація дірок перестає залежати від температури і дорівнює

$$p = \sqrt{N_a},$$

а напівпровідник, як і у випадку електронної провідності, набуває провідникових властивостей.

Таким чином, при домішковій і електронній, і дірковій провідності концентрація носіїв заряду одного знаку, які у цьому випадку називаються *основними носіями заряду*, буде визначальною. Концентрацію *неосновних носіїв заряду*, дірок  $p$  при донорних домішках або електронів  $n$  при акцепторних, можна визначити з закону діючих мас

$$np = n_i^2 = p_i^2.$$

Таким чином, залежність питомої електропровідності напівпровідників від температури визначається шириною забороненої зони і температурою.

Температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідника, що характеризує температурну залежність питомої електропровідності напівпровідників, як впливає з формул для питомої електропровідності власних напівпровідників, прямо пропорційний ширині забороненої зони та обернено пропорційний квадрату температури:

$$TK\rho = -W_{зз} / 2 kT^2,$$

а для домішкових напівпровідників замість ширини забороненої зони потрібно брати глибини залягання донорних  $\Delta W_d$  або акцепторних  $\Delta W_a$  рівнів.

Значення  $TK\rho$  від'ємне і зменшується при зростанні температури, що є характерною ознакою того, що речовина є напівпровідником. Але при аналізі температурної залежності питомої провідності домішкових напівпровідників, окрім розсіювання рухливих заряджених часток на іонізованих домішках в області відносно низьких температур, необхідно враховувати також можливість фононного розсіювання при підвищених температурах. Зокрема, в області переходу від домішкової електропровідності до власної у невеликому інтервалі температур, що відповідають насиченню концентрації основних носіїв заряду, фононне розсіювання може спричинити позисторний ефект, тобто зростання питомого опору, що характерне для провідників.

Іонне розсіювання у домішкових напівпровідниках переважає. Рухливість носіїв заряду у домішкових напівпровідниках за низьких температур, де довжина їх вільного пробігу  $\lambda \sim T^2$ , пропорційна  $u \sim T^{3/2}$ , а в області високих

температур, де  $\lambda \sim T^{-1}$ ,  $u \sim T^{-3/2}$ . Але в області власної електропровідності напівпровідника на її значення основний вплив має експоненційна залежність від температури і впливом температурної залежності рухливості можна знехтувати.

Для домішкового напівпровідника в області низьких температур зростання електропровідності буде меншим, бо нахил прямої в напівлогарифмічних координатах визначається енергією активації електропровідності, тобто зазором між стелею валентної зони і акцепторними рівнями або між донорними рівнями і дном зони провідності, що значно менші, ніж ширина забороненої зони. Так, наприклад, для діркового кремнію, при  $W_{зз} = 1,12$  еВ, енергія активації  $W_a$  знаходиться в межах від 0,025 еВ (при введенні Тl) до 0,16 еВ (при введенні In).

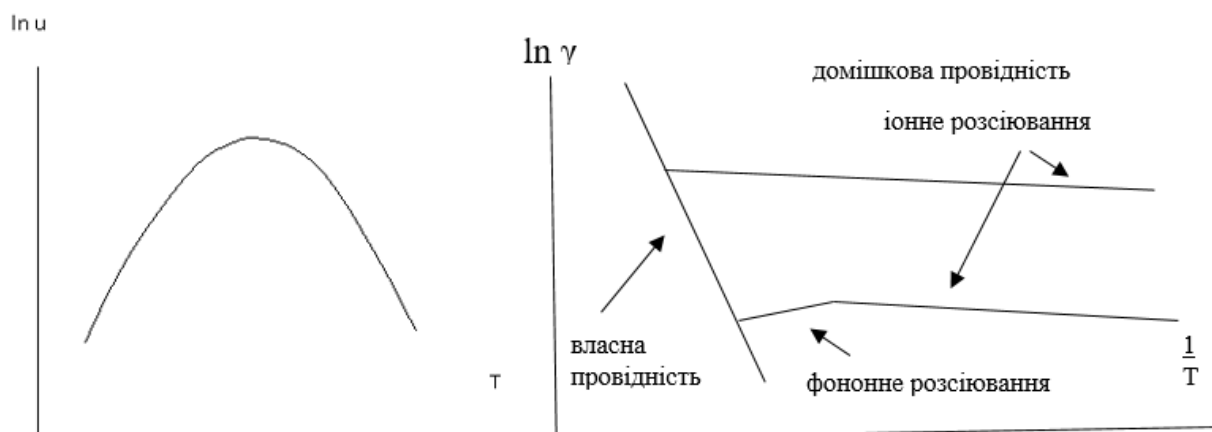


Рис. 15.2 Схематичні залежності рухливості і питомої провідності напівпровідника в області насичення домішкової провідності і власної провідності

Враховуючи, що температура вичерпання домішкових енергетичних рівнів суттєво нижча, ніж температура виродження електронів, на інтервалі температур, який називається областю насичення, в залежності від основного механізму розсіювання носіїв заряду питома електропровідність може злегка зростати (іонне розсіювання) або дещо зменшуватися (фононне розсіювання). При подальшому підвищенні температури відбудеться перехід до власної електропровідності.

Якщо домішка утворює в забороненій зоні напівпровідника глибокі рівні, розташовані поблизу середини забороненої зони, то ці рівні також можуть виконувати роль як донорних, так і акцепторних в залежності від валентності домішки і, через збільшений час життя електронів на них, називаються *пастками*, а домішка *амфотерною*.

## Явища, пов'язані з впливом зовнішніх факторів на напівпровідники

Область технічного застосування напівпровідникових матеріалів (без контактних явищ) визначається в основному характером їхньої реакції на вплив зовнішніх факторів. Як правило, вона полягає у зміні, іноді локальній, концентрації носіїв заряду, і тільки у магнітному полі більш істотною є зміна ефективної рухливості внаслідок впливу магнітного поля на напрям руху носіїв. Великий вплив на властивості напівпровідників мають закономірності дифузійних і рекомбінаційних процесів. Розглянемо явища в напівпровідниках, що зумовлені зовнішніми факторами, і їх використання в напівпровідникових приладах.

Перш за все відзначимо, що термістори з опорами від 1 до  $10^6$  Ом, які виготовляють з монокристалічних напівпровідників (*Si*, *Ge*, *SiC*, *GaP* тощо), мають відповідний негативний ТКО. Крім них, широке застосування знайшли дешеві термістори з напівпровідникової кераміки на основі оксидів металів перехідних груп (*Ti*, *V*, *Cr*, *Mn*, *Fe*, *Ni*, *Co*, *Cu*, *Zn*), електропровідність якої пов'язана з обміном електронами між однаковими іонами з різною валентністю. Найпоширенішими типами термісторів є мідномарганцеві (ММТ), кобальтомарганцеві (КМЦ і СТ1) і міднокобальтомарганцеві (СТ3).

Виготовляють термістори методом керамічної технології у вигляді стрижнів, трубок, шайб, дисків, намистин. Завершальною операцією технологічного циклу є штучне старіння на протязі кількох діб при температурі, що в подальшому буде визначати їх максимальну робочу температуру.

Вольт-амперна характеристика термістора, як напівпровідника, має вигляд

$$U = IA \exp\left(\frac{B}{T}\right).$$

Але в електричному колі, враховуючи наявність зовнішнього опору, вона буде мати вигляд, показаний на рис. 16.1. При малих струмах напруга на терморезисторі зростає, але нагрівання терморезистора і зменшення його опору приводить до перерозподілу напруги між терморезистором і зовнішнім опором і сповільнює цей процес, а коли опір терморезистора стає меншим зовнішнього опору, починається спад напруги на терморезисторі замість подальшого повільного зростання, бо все більша її частина падає на зовнішньому опорі.

Термістори застосовують в схемах вимірювання і контролю температури, для температурної стабілізації в електричних і електронних схемах і компенсації позитивного ТКр елементів в електровимірювальних пристроях, в пристроях автоматики і контролю, в схемах пуску електродвигунів, в пожежних датчиках, тощо.

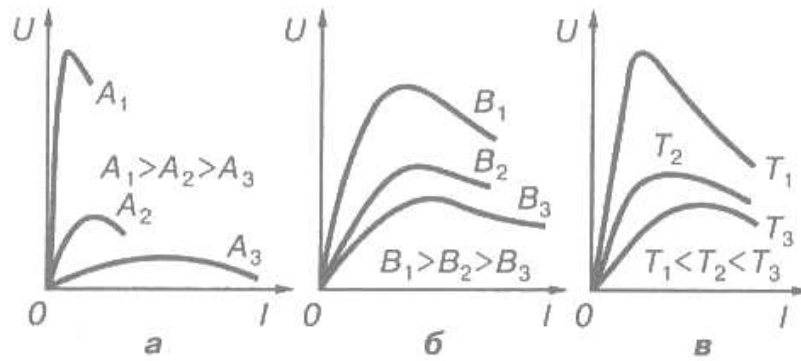


Рис. 16.1 Схематичне зображення вольт-амперної характеристики термістора в електричному колі з зовнішнім опором при зміні параметрів: а –  $A_1 > A_2 > A_3$ ; б –  $B_1 > B_2 > B_3$ ; в –  $T_1 < T_2 < T_3$ .

Терморезистори з позитивним ТКО на основі монокристалічних напівпровідників або легованих напівпровідникових сегнетоелектриків називають позисторами.

Напівпровідникові монокристалічні позистори з кремнію з невеликою концентрацією ( $10^{21} - 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ) добожок з ТКО  $= (0,7 - 1) \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$  використовують в інтервалі температур  $(20 - 100)^\circ\text{C}$ . Вони змінюють свій опір в цьому інтервалі температур в кілька разів.

Позистори типу СТ5 і СТ6 на основі напівпровідникової сегнетокераміки  $\text{BaTiO}_3$ , що при нагріванні змінюють опір в  $10^3 - 10^5$  раз. Позисторний ефект в таких матеріалах зв'язаний зі зменшенням опору міжзеренних бар'єрів, що утворюються при введенні  $0,2 - 0,3\%$  рідкісноземельних добожок, під впливом поляризованих доменів. При переході через температуру Кюрі домени руйнуються і опір кераміки зростає, поки не досягне рівня, характерного для неполяризованої кераміки, після чого почне спадати з температурою, як і властиво для напівпровідників..

Використовують позистори для безконтактних перемикачів, захисту апаратури від струмового перевантаження, для захисту електродвигунів, в апаратах запису і відтворення звуку.

*Термоелектричні явища* в напівпровідниках включають ефекти Зеебека (термоЕРС), Пельтьє і Томсона.

*Ефект Зеебека* полягає в тому, що в електричному колі з послідовно і нероз'ємно з'єднаних напівпровідників або напівпровідників і металів, що мають різну роботу виходу, може виникнути термоЕРС. Механізм виникнення термоЕРС був розглянутий в розділі "Емісійні явища, контактна різниця потенціалів і термоЕРС". ТермоЕРС, як і у випадку металів, дорівнює

$$U = \alpha(T_2 - T_1),$$



де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС для даної пари матеріалів (питома термоЕРС),  $T_2$  і  $T_1$  – температури контактів.

Використовують напівпровідникові термопари для вимірювання температури та для виробництва електроенергії термоелектрогенераторами.

*Явище Пельт'є* полягає в тому, що при проходженні струму через контакт, в якому існує термоЕРС, в тому ж напрямку, в якому протікає струм термоЕРС, контакт буде охолоджуватися, при протилежному - нагріватися. Кількість поглиненої (виділеної) теплоти пропорційна струму  $I$

$$Q_n = \Pi \cdot I \cdot t ,$$

де  $Q_n$  – теплота Пельт'є,  $\Pi$  – коефіцієнт Пельт'є, що залежить від температури, напрямку струму і контактуючих матеріалів.

За рахунок охолодження при пропусканні струму через контакт працюють мікрохолодильники. Недолік мікрохолодильників – потрібна значна сила струму для його роботи.

*Ефект Томпсона* відноситься до абсолютної термоЕРС. В напівпровіднику з градієнтом температури виникає абсолютна термоЕРС, і при пропусканні струму в напрямку поля термоЕРС градієнт температури буде зростати, при протилежному - зменшуватися. Теплота Томпсона дорівнює

$$Q_T = \tau \cdot I \cdot (T_2 - T_1) \cdot t ,$$

де  $\tau$  – коефіцієнт Томпсона.

Коефіцієнти термоелектричних явищ зв'язані співвідношенням

$$\alpha = \Pi \cdot \tau .$$

*Абсолютна термоЕРС* виникає у напівпровідниках, як і в провідниках, при нагріванні зразка матеріалу з однієї сторони і дифузії згенерованих носіїв заряду до іншої, холодної сторони (рис. 16.2, а).

За таким же механізмом в напівпровідниках утворюється і *фотоЕРС* при освітленні матеріалу з однієї сторони (рис. 16.2, б). Прилади, в яких використовують фотоЕРС в напівпровідниках називаються фотоелементами. Вони служать датчиками в приладах для вимірювання інтенсивності сонячної радіації. Зауважимо, що в енергетичних установках для перетворення сонячної енергії в електричну застосовують фотоЕРС не в простих напівпровідниках, а з р-п-переходом, при цьому дірки і електрони рекомбінують через зовнішнє коло.

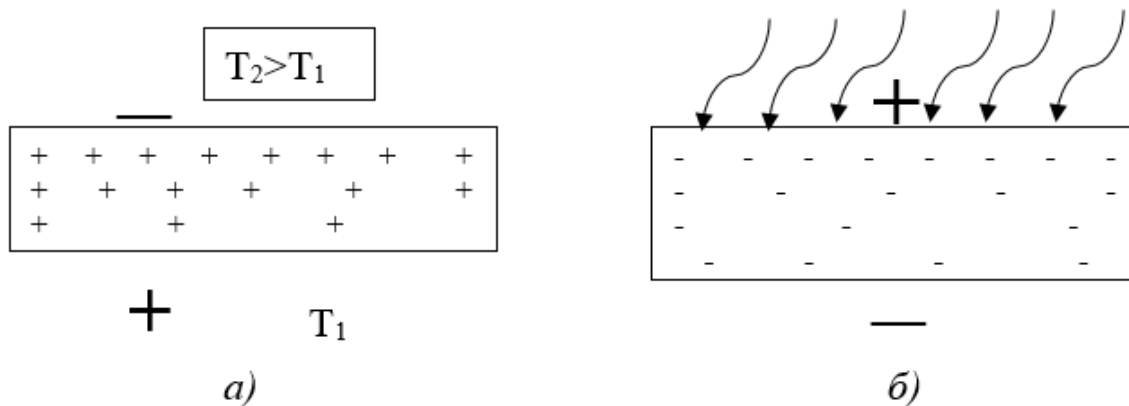


Рис. 16.2. Утворення: а) – термоЕРС при односторонньому нагріванні діркового; б) – фотоЕРС при односторонньому освітленні електронного напівпровідника

Термо- і фотоЕРС можна використати для *визначення типу носіїв заряду в напівпровідниках*. Носії заряду при термо- і фотоЕРС генеруються біля поверхні, що нагрівається або освітлюється, а потім дифундують в об'єм, доходячи до холодного кінця, і заряджають його. Знак заряду на холодній (темній) поверхні зразка буде негативним, якщо основними носіями заряду є електрони, і позитивним – у випадку дірок. Для власних носіїв заряду знак заряду буде відповідати носіям з більшою рухливістю.

Якщо знак заряду визначають з допомогою металевого термозонда, що під'єднаний до гальванометра або іншого приладу з достатньою чутливістю, то знак заряду, який він реєструє, буде протилежним знаку основних носіїв заряду.

*Фотопровідність* напівпровідників, тобто зростання електропровідності під впливом електромагнітного випромінювання, визначається властивостями самого напівпровідника, а також частотою і інтенсивністю випромінювання.

Як відомо, енергія фотона  $W(\text{eV})$  визначається його частотою або довжиною хвилі (мкм) згідно з формулою

$$W = h\nu = \frac{1,24}{\lambda}.$$

При малій частоті енергія фотона мала і напівпровідник прозорий для електромагнітного випромінювання, і лиш коли енергія фотона зрівняється з шириною забороненої зони, його поглинання різко зростає. Довжина хвилі  $\lambda_r$ , при якій починається зростання поглинання електромагнітного випромінювання називають довгохвильовою границею (рис 16.3, а). За довгохвильовою границею можна оптичним методом визначити ширину забороненої зони, для цього часто використовують довжину хвилі, що відповідає 50% спаду фотоструму. Значення оптичної ширини забороненої

зони, як правило, співпадає зі значенням, отриманим з даних по електропровідності.

Питома фотопровідність дорівнює різниці між питомою електропровідністю напівпровідника при освітленні і темною питомою електропровідністю

$$\gamma_{\phi} = \gamma - \gamma_0 = e(\Delta n \cdot u_n + \Delta p \cdot u_p),$$

де  $\Delta n$  і  $\Delta p$  – додаткова концентрація електронів і дірок, збуджених світлом.

Основними приладами, в якому використовують фотопровідність є фоторезистори, основні характеристики яких показані на рис. 16.3, б, в.

Фоторезистори трохи інерційніші за фотоелементи. Вони характеризуються темновим опором і струмом; фотострумом і світловим струмом, що визначається при освітленості 200 лк з колірною температурою 2850 К; кратністю зміни опору при освітленні; чутливістю, що є відношенням фотоструму при 200 лк і робочій напрузі до величини світлового потоку; постійною часу - часом, за який фотострум спадає до 0,63 початкової значення після вимкнення фоторезистора.

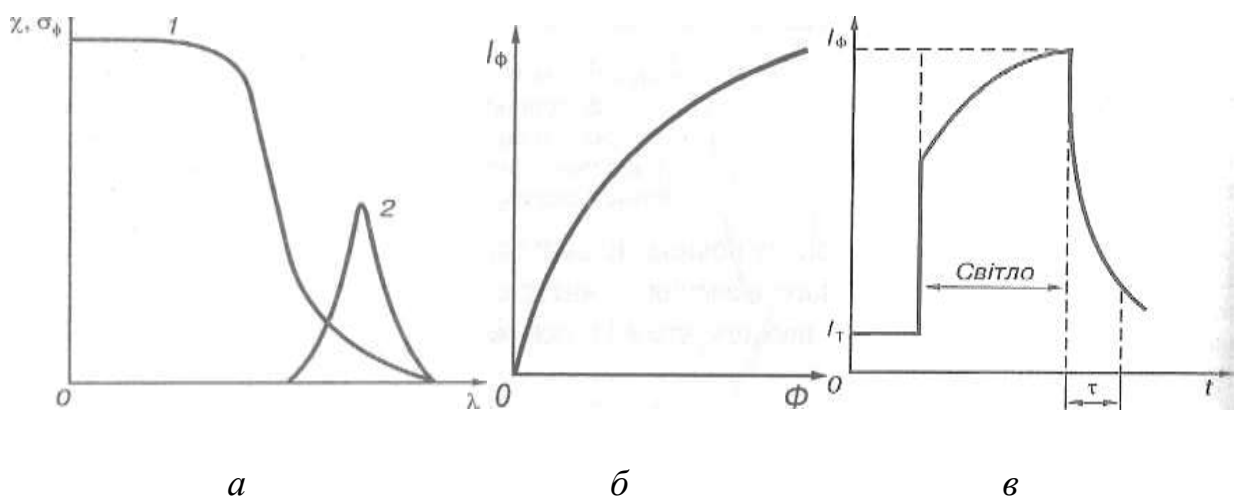


Рис. 16.3. Схематичні залежності: а) - оптичного поглинання (1) та фотопровідності (2); б) – світлової характеристики фотоопору; в) - релаксації сили фотоструму при ввімкненні та вимкненні випромінювання.

Інтенсивність випромінювання нелінійно впливає на електропровідність фоторезисторів. При даній напрузі фотострум  $I_{\phi}$ , що дорівнює різниці між темновим струмом і струмом, що проходить через фоторезистор при освітленні, світловим струмом, так залежить від густини світлового потоку (освітленості)  $E$ :

$$I_{\phi} = BE^x,$$

де  $B$  і  $x$  - сталі для даного напівпровідника величини, причому  $0 < x < 1$ .

Для виготовлення фоторезисторів, як правило за допомогою керамічної технології, використовують сульфіди, селеніди і телуріди кадмію, свинцю і

вісмуту як нелеговані, так і леговані різними елементами. Так, із сульфїду свинцю виготовляють фоторезистори марки ФСА, сульфїду кадмію – ФСК, селенїда кадмію – ФСД, сульфїду вісмуту – ФСБ тощо. Можна виготовляти фоторезистори з монокристалічних кремнію, германію та інших напівпровідникових матеріалів.

*Люмінісценція або фосфоренція*, тобто випромінювання світла деякий час після закінчення освітлення напівпровідника, в який введено активатори, як правило атоми важких металів. Найширше використовують як люмінісцентний матеріал ZnS, в якому роль активаторів можуть відігравати також надлишкові атоми цинку, які з'являються в матеріалі в процесі термообробки ZnS, що супроводжується видаленням атомів сірки і утворенням нестехіометричної речовини. Активатори утворюють в забороненій зоні напівпровідника відповідні рівні. Для люмінісценції в напівпровіднику повинні також бути рівні прилипання, що виникають, наприклад, за рахунок захоплення електрона вакантним вузлом, що був зайнятий атомом сірки. Час життя електронів в захопленому стані може бути досить довгим. Поступовий перехід електронів з рівнів прилипання після закінчення освітлення в зону провідності за рахунок флуктуацій енергії коливань кристалічної ґратки, а потім з зони провідності на рівні створені активаторами і супроводжується запізнілим випромінюванням фотонів з енергією, що дорівнює різниці енергії електрона в зоні провідності і енергії рівня активатора.

Люмінісценція широко використовується в лампах денного світла, де невидиме ультрафіолетове проміння перетворюється у видиме світло, спектральний склад якого залежить від матеріалу, нанесеного на стінки лампи, що часто називається фосфором. Також її застосовують для перетворення у видиме світло радіоактивного випромінювання в рентгенівських апаратах та лічильниках елементарних частинок, для візуалізації потоків швидких електронів в електронно-променевих трубках та в електронних мікроскопах.

*Тунельний ефект*, що полягає у проходженні нахиленої полем вузької забороненої зони електроном з енергією, яку він мав у валентній зоні, спостерігається у вузькозонних напівпровідниках при полях більше  $10^7$  В/м. Інтенсивність тунельного ефекту практично не залежить від температури.

*Термоелектронна та ударна іонізація* напівпровідника при перевищенні напруженості електричного поля певного значення  $E_k$  викликають нелінійне зростання електропровідності напівпровідника.

При термоелектронній іонізації, що може спостерігатися в полях  $10^4 - 10^6$  В/м, поле знижує бар'єр, що утримує електрон біля атома, і підвищує

ймовірність його переходу в зону провідності. Концентрація носіїв заряду згідно Френкелю зростає за експоненціальним законом

$$n = n_0 \exp(\beta\sqrt{E}),$$

де  $n_0$  – концентрація електронів у зоні провідності у відсутності електричного поля,  $\beta = \sqrt{e^3 / 4\pi\epsilon\epsilon_0 kT}$ . Слід відзначити, що рухливість носіїв заряду може і зростати і зменшуватися, але електропровідність завжди зростає, як і концентрація.

*Ударна іонізація* починає проявлятися в полях  $10^7 - 10^8$  В/м. При ударній іонізації електрон повинен після іонізуючого зіткнення не тільки перекинути електрон з валентної зони в зону провідності, але й залишитися з енергією, яка дозволяла б йому залишатися самому у зоні провідності. Для цього електрон, за розрахунками, повинен мати енергію  $1,5 W_{зз}$ .

Кількісно ударна іонізація характеризується коефіцієнтом ударної іонізації, що залежить від напруженості електричного поля так само, як і відповідний коефіцієнт у газах

$$a = A \exp(-B / E),$$

де  $A$  і  $B$  - апроксимаційні коефіцієнти. Для кремнію  $A=7,94 \cdot 10^7$  м<sup>-1</sup>,  $B=1,49 \cdot 10^8$  В/м.

На відміну від діелектриків, де електричний пробій швидко веде до руйнування матеріалу, напівпровідники можуть працювати в режимі лавинного пробію в певному діапазоні струмів, що використовують в напівпровідникових стабілізаторах напруги.

У низькоомних напівпровідниках може відбуватися тепловий пробій внаслідок термоелектронної емісії і порушення теплової рівноваги між енергією, що виділяється у напівпровіднику, і теплотою, що відводиться в навколишнє середовище. Тепловий пробій супроводжується руйнуванням напівпровідника.

*Тензорезистивний ефект* полягає також у зміні опору напівпровідника при його деформації. Величиною, що кількісно характеризує зміну опору внаслідок деформації є тензочутливість, що дорівнює відношенню відносної зміни опору до відносної деформації

$$d = \frac{\Delta\rho / \rho}{\Delta l / l}.$$



## Контактні явища в напівпровідниках: $p$ - $n$ перехід і прилади на його основі

Основним параметром зонної теорії напівпровідників, що відповідає за встановлення хімічної рівноваги, є рівень хімічного потенціалу або рівень Фермі - енергетичний рівень, імовірність заповнення якого електронами дорівнює 0,5. Положення рівня Фермі у забороненій зоні напівпровідника за фіксованої температури однозначно визначається співвідношенням концентрацій вільних носіїв заряду різного типу. У власних напівпровідниках рівень Фермі розташований приблизно посередині забороненої зони, в електронних напівпровідниках рівень Фермі знаходиться посередині між донорними рівнями і дном зони провідності, у діркових – між акцепторними рівнями і стелею валентної зони.

При легуванні кристала власного напівпровідника з однієї сторони донорними, а з іншої - акцепторними домішками виникає ситуація, коли з однієї сторони є надлишок електронів, з іншої дірок при збереженні електронейтральності. Відповідно зміщуються і рівні Фермі вгору і вниз від середини забороненої зони, що порушує хімічну рівновагу.

Відновлення хімічної рівноваги відбувається внаслідок взаємного дифузійного переходу<sup>8</sup> електронів з  $n$ -області в  $p$ -область, яку вони заряджають негативно. Дірки ж дифундують з  $p$ -області в  $n$ -область, заряджаючи її позитивно. Рівень Фермі по системі при цьому вирівнюється (установлюється термодинамічна хімічна рівновага), а між матеріалами виникає контактна різниця потенціалів. В процесі дифузії вона зростає, забезпечуючи в напрямку, протилежному дифузійному, зростаючий дрейфовий струм, що в рівноважному стані урівноважує дифузійний. На межі двох матеріалів утворюється стаціонарний потенціальний бар'єр для носіїв заряду, а між  $n$ -областю і  $p$ -областю встановлюється стаціонарний обмін електронами і дірками.

Електрони, основні носії заряду в  $n$ -області, переходячи в  $p$ -область, стають неосновними і нейтралізуються в приконтатній області з основними носіями заряду  $p$ -області - дірками. Опір напівпровідника поблизу контакту в  $p$ -області різко підвищується. Те ж саме відбувається і при переході дірок в  $n$ -область.

Таким чином, на межі між двома домішковими напівпровідниками з різним типом провідності встановлюється заряджена смуга з підвищеним опором (рис 16.5, а). Саме вона і називається  $p$ - $n$  переходом.

Потенціальний бар'єр  $p$ - $n$  переходу відіграє важливу роль в електропровідності між контактами напівпровідника, тому що його висота може змінюватися під впливом зовнішніх факторів. Зниження висоти потенціального бар'єра викликає збільшення, а ріст висоти бар'єра - падіння провідності напівпровідника. Тому контакт напівпровідникових матеріалів з

---

<sup>8</sup>Рушійною силою дифузії є градієнт (різниця) концентрації.

електронною і дірковою провідностями, що утворює  $p$ - $n$  перехід, має нелінійну асиметричну вольт-амперну характеристику.

Якщо підключити зовнішнє джерело напруги так, щоб його плюс був на  $p$ -області, то воно буде знижувати бар'єр, зменшувати ширину  $p$ - $n$  переходу і збільшувати потік електронів з  $n$ -області в  $p$ -область, при цьому виникає прямий струм, що експоненціально зростає з напругою, якщо навпаки – то через розширений  $p$ - $n$  перехід буде протікати невеличкий зворотній струм (рис 16.5, б). Підключивши електроди до протилежних контактів напівпровідника з  $p$ - $n$  переходом, ми отримуємо найпростіший напівпровідниковий прилад – діод (рис 16.5, в), що має випрямну характеристику для змінного струму, пропускаючи напівсинусоїду при прямому включенні і суттєво обмежуючи напівсинусоїду протилежної полярності при зворотному включенні.

Вольт-амперна характеристика діода має вигляд

$$I = I_s \left( \exp \left( \frac{eU}{kT} \right) - 1 \right),$$

де  $U$  – зовнішня напруга, прикладена до діода з урахуванням знаку,  $I_s$  – зворотний струм.

Подібні характеристики будуть мати також напівпровідники в контакт з деякими металами. В залежності від типу провідності напівпровідника і металу можна отримати інжекційний (приелектродна область напівпровідника буде мати менший опір, ніж основний матеріал), нейтральний (характеристики напівпровідника не зміняться) або запірний (опір приелектродної області напівпровідника стане більшим) контакт.

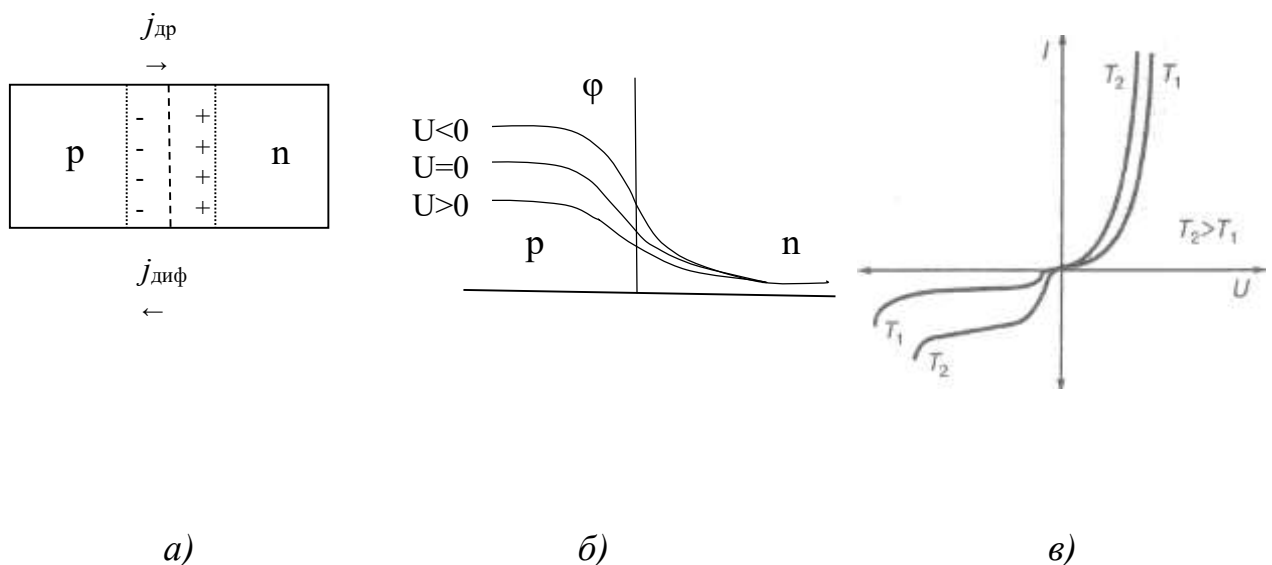


Рис. 16.5 Зображення: а) –  $p$ - $n$  переходу на контакті діркового і електронного напівпровідників, б) – потенціального бар'єру на  $p$ - $n$  переході і впливу на його форму зовнішньої напруги, в) – вольт-амперної характеристики діода при різних температурах



На високих частотах  $p$ - $n$  перехід можна розглядати як ємність, враховуючи його великий опір, а напівпровідникові частини з двох сторін  $p$ - $n$  переходу як обкладинки конденсатора. Зміна ширини  $p$ - $n$  переходу при прикладанні постійної напруги різної полярності приводить до того, що  $p$ - $n$  перехід можна у даному випадку розглядати як керований постійною напругою конденсатор. Спеціально спроектований для такого використання конденсатор називається *варикапом* (змінна ємність) і застосовується для управління у високочастотних трактах.

При великій зворотній напрузі в  $p$ - $n$  переході може початися ударна іонізація і відбутися *тунельний, лавинний електричний* і відомий з рогляду діелектриків *тепловий пробій*. (рис. 16.6, а). Як вже зазначалося,  $p$ - $n$  перехід може стабільно працювати в режимі лавинного електричного пробою. При цьому напруга на ньому стабільна в межах 14-18%, що дозволяє використовувати спеціально спроектовані діоди – стабілітрони для стабілізації напруги в електронних колах.

Пробивна напруга стабілітрона називається напругою стабілізації, зворотний струм пробою, що протікає при цьому через  $p$ - $n$  перехід, струмом стабілізації. Напруга стабілізації для кремнієвих стабілітронів може змінюватися від 3,3 до 180 В, максимальний струм стабілізації може досягати 0,2 А, мінімальний складає 2,5 мА, максимальна потужність розсіювання змінюється від 0,15 до 5 Вт.

*Тунельні діоди* виготовляють з напівпровідникових сильно легованих матеріалів, в яких донорна домішкова зона перекрита з зоною провідності в  $n$ -області напівпровідника, а акцепторна домішкова зона перекрита з валентною зоною в  $p$ -області, внаслідок чого ширина забороненої зони виявляється суттєво меншою, ніж в чистому напівпровіднику, при цьому дно зони провідності  $p$ -області розташовується нижче від верху валентної зони  $n$ -області. Частина електронів у зоні провідності електронної ділянки напівпровідника мають таку ж енергію, як і електрони у валентній ділянці. Через вузьку заборонену зону при прикладанні напруги і відбувається тунелювання електронів. Для того, щоб відбувалося тунелювання потрібно, щоб проти енергетичного рівня, зайнятого електроном з одного боку напівпровідника, був вільний енергетичний рівень з іншого боку. Внаслідок того, що концентрація електронів значно більша, ніж концентрація вільних рівнів, при прикладанні прямої напруги спочатку сильно зростає, але по мірі заповнення електронами вільних рівнів в  $p$ -області тунельний струм зменшується до тих пір, поки не почне зростати звичайний струм, пов'язаний з перекиданням електронів з валентної зони в зону провідності (рис. 16.6, б). Слід відзначити, що тунельні діоди не мають вентильних властивостей, на зворотній гілці вольт-амперної характеристики струм різко зростає, на відміну від звичайного діода.

Керамічні матеріали, в яких  $p-n$  переходи різної орієнтації з різними ширинами і вольт-амперними характеристиками  $p-n$  переходів утворюються на границі зерен, мають симетричну нелінійну вольт-амперну характеристику і називаються *варисторами*. ВАХ варистора (рис. 16.6,в) можна апроксимувати рівнянням

$$I = AU^\beta,$$

де  $A$  — коефіцієнт, залежний від типу варистора і температури;  $\beta$  — коефіцієнт нелінійності варистора

Випускають варистори на основі одного з найтермостійкіших матеріалів нестехіометричного карбиду кремнію  $SiC_x$  з різними неорганічними в'язучими речовинами. Недоліком тирітових, влітових, летінових, силітових карбідокремнієвих варисторів є низька нелінійність (порядка 6), що вимагає підключення послідовно з варистором іскрового проміжку. Зараз карбідокремнієві варистори відходять в минуле і замість них виробляють леговані вісмутом, кобальтом чи іншими хімічними елементами цинкооксидні варистори з великою нелінійністю, що досягає кількох десятків, Це дозволяє використовувати цинкооксидні варистори без іскрового проміжку, що суттєво підвищує надійність обмеження перенапруг в електричних мережах.

З'єднуючи кілька  $p-n$  переходів отримують і інші напівпровідникові прилади. Розглянемо побіжно деякі з них.

Для підсилення сигналу і генерування сигналів різної частоти використовують  $p-n-p$  і  $n-p-n$  транзистори (рис.16.7, а). В транзисторі розрізняють три електроди: крайні – емітер,  $p-n$  перехід якого ввімкнено в прямому режимі, тобто на емітер подається плюс джерела напруги в  $p-n-p$  транзисторі і мінус в  $n-p-n$  транзисторі, та колектор, який підключено до протилежного полюса джерела напруги, а також база, на яку подається керуючий сигнал. Транзистор може працювати, ввімкненим зі спільною базою, або зі спільним емітером (рис 16.7, б,в). У першому випадку можливе підсилення за напругою та потужністю, а в другому – також і за струмом.

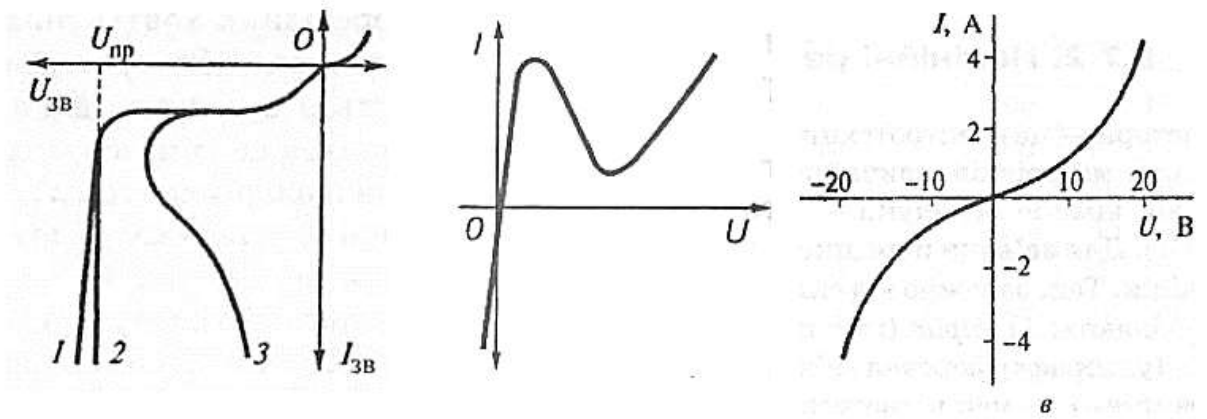


Рис. 16.6. Вольт-амперні характеристики: а) – діода (1-тунельний, 2-лавинний (стабілітрони), 3- тепловий пробій; б) – тунельного діода; в) – варистора.

Розглянемо спрощено механізм підсилення за струмом у схемі зі спільним емітером. Під час роботи транзистора на базу подається невелика постійна пряма напруга для  $p-n$  переходу емітер - база і значно більша зворотна напруга має місце для  $p-n$  переходу база – колектор.

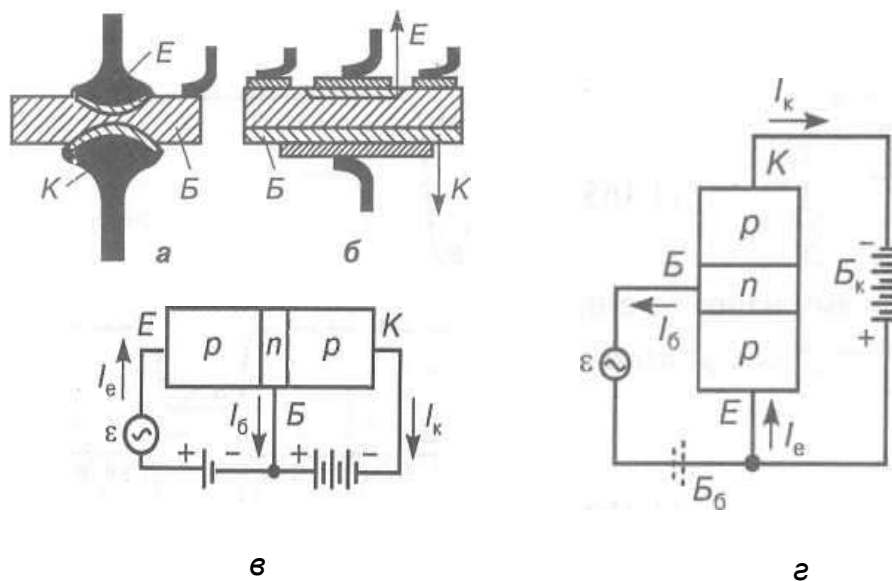


Рис. 16.7. Схематичні зображення конструкцій  $p-n-p$  (а) і  $n-p-n$  (б) транзисторів, а також схеми підключення транзисторів зі спільною базою (в) та зі спільним емітером (г)

Зміна потенціалу бази суттєво вплине на експоненційно залежний від напруги на базі струм емітера, що працює при прямому зміщенні. Якщо товщина бази мала у порівнянні з довжиною вільного пробігу носіїв заряду, емітованих емітером, то вони в основному будуть проскакувати базу і змінювати струм в колекторному переході більше, ніж зміниться струм бази. Саме відношення зміни струму колектора до зміни струму бази і буде

характеризувати коефіцієнт підсилення за струмом в схемі зі спільним емітером.

Таким чином, транзистор можна розглядати як керований резистор, струм через який залежить від напруги на базі. Робочий діапазон частот транзисторів обмежується рухливістю носіїв заряду та ємністю  $p-n$  переходу і сягає сотень мегагерц.

Як безконтактні керовані комутатори застосовують тиристори  $p-n-p-n$ , що складаються з трьох  $p-n$  переходів, і можуть при подачі імпульсу напруги переходити зі стану з високою загальною провідністю (ввімкнено) до стану з високим опором (вимкнено), а при наступній подачі імпульсу напруги повертатися в попередній стан. З допомогою тиристорів можна також формувати у відповідному частотному діапазоні сигнали довільної форми з врахуванням обмежена частотних характеристик тиристора.

# ЛЕКЦІЯ 17

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

### Прості напівпровідникові матеріали

З простих напівпровідникових матеріалів для виготовлення активних елементів електронної техніки найширше використовують кремній, особливо для інтегральних схем, як матеріал, що має хороші властивості та дуже широку сировинну базу. Менше застосовують германій та селен, що мають гірші експлуатаційні характеристики і значно менше поширені в природі.

**Кремній (Si)** – твердий, крихкий матеріал, темно-сірого кольору з характерним металевим блиском.

Кремній – другий, після кисню, по поширеності на Землі елемент. Масова частка кремнію в земній корі складає 27,6-29,5 % (пісок, кварц, силікати). Технічний кремній з домішками до 5 % отримують в електропечах відновленням його оксидів вуглецевими речовинами. Для подальшого очищення отримують рідкий трихлорсилан, потім разом з парами цинку або воднем подають його в камеру відновлення, де розміщені кремнієві стрижні – затравки, нагріті електрострумом до 1250 °С, на яких осідає чистий полікристалічний кремній.

Другий варіант отримання кремнію шляхом термічного розкладання проміжної речовини моносилан  $SiH_4$ . Порошок, що отримують при цьому, сплавляють в полікристалічні зливки.

Далі, використовуючи більшу розчинність домішок в рідкому кремнії полікристалічні зливки очищають методом зонної плавки, при якому локально розплавляють зливок, пересуваючи місце розплавлення і роблячи 15-20 проходів. Очищення кремнію проводять у кварцових тиглях з особливо чистого  $SiO_2$ . Чистота напівпровідникового кремнію настільки висока, що проконтролювати її хімічними методами неможливо, а тому про неї роблять висновки на основі даних по електропровідності.

З очищеного кремнію методом Чохральського витягують з розплаву повільним обертанням кристалічні злитки, які потім ріжуть на плоскі кристали, що йдуть на виготовлення електронних приладів на основі кремнію. Легування здійснюють в процесі вирощування монокристалів по Чохральському.

При нормальних температурах кремній з кислотами не взаємодіє. При температурах 200-700 °С взаємодіє з галогенами, вище 900 °С інтенсивно окислюється, при 1100-1200 °С з'єднується з азотом і вуглецем, а при 2000 °С з воднем, утворюючи отруйні речовини силани від газоподібного  $SiH_4$  до  $Si_8H_{18}$ .

Основні властивості кремнію:  $d=2,33 \text{ т/м}^3$ ,  $T_{\text{плав.}}=1417 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon =12,5$ ,  $W_{33}=1,12 \text{ eV}$ ,  $\rho=0,23 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , концентрація власних носіїв заряду  $n_i= 3 \cdot 10^1 \text{ м}$

<sup>3</sup>, рухливість електронів при 20°C  $u_n=0,145 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , рухливість дірок  $u_p=0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , робота виходу електронів  $W_\phi=4,3 \text{ eВ}$ , робоча температура до 120...200°C.

Температурні залежності питомого опору кремнію і германію в залежності від концентрації добавок наведені на рис.16.8.

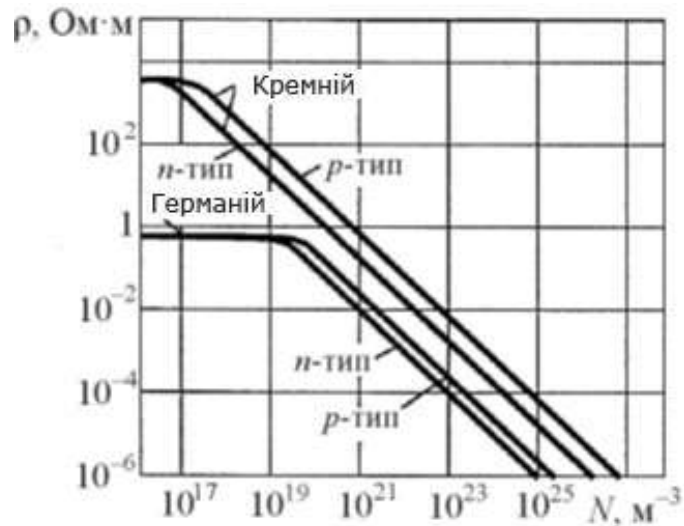


Рис. 16.8. Залежність питомого опору кремнію та германію від концентрації добавок при температурі 20 °С

Кремній дуже широко використовують для виготовлення різноманітних напівпровідникових приладів для електроніки, таких як діодів, транзисторів, тиристорів і інших, а також, як поки що найефективніший матеріал, для інтегральних схем. З кремнію виготовляють фотоелементи для фотопанелей сонячних електростанцій.

**Германій (Ge)** – дуже розсіяний елемент, твердий, крихкий, має сірувато-білий колір з характерним металевим блиском. Вміст його в землі орієнтовно  $7\cdot 10^{-4}\%$ . Сировинною базою служать відходи переробки цинкових і поліметалічних руд, а також продукти згорання бурого вугілля.

Технологія отримання полягає в наступному: спочатку отримують тетрахлорид германію, переробляють його в діоксид германію (порошок білого кольору), а потім відновлюють у водневій печі при температурі 600...700°C до елементарного германію (сірий порошок). Отриманий порошок травлять в суміші кислот і сплавляють в зливку. Чистий германій отримують із зливка методом зонної плавки або методом витягування з розплаву (метод Чохральського).

Германій хімічно значно активніший за кремній. При кімнатній температурі він реагує з сумішами кислот, взаємодіє з киплячими лугами. Окислюється при 600°C, в розплавленому стані реагує з воднем, галогенами і

сіркою. Крім кварцевих тиглів при роботі з германієм використовують графітні, оскільки германій не взаємодіє з вуглецем.

Основні властивості *германію*:  $d = 3,2 \text{ т/м}^3$ ,  $T_{\text{плав.}} = 937 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 16,3$ ,  $W_{33} = 0,72 \text{ eV}$ ,  $\rho = (6 \dots 6,8) 10^5 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , концентрація власних носіїв заряду  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , рухливість електронів при  $20^\circ\text{C}$   $u_n = 0,390 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , рухливість дірок  $u_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , робота виходу електронів  $W_e = 4,8 \text{ eV}$ , робоча температура  $-50 - +70^\circ\text{C}$ .

Використовують для виготовлення діодів, фотодіодів, транзисторів, фототранзисторів і фотоелементів (з внутрішнім фотоефектом), модуляторів світла, перетворювачів Холла. Германієві прилади, на відміну від кремнієвих, повинні бути надійно захищені від вологи.

**Селен (Se)** – рідкісний і розсіяний елемент, різного кольору, власних руд не утворює. Його вміст в земній корі не перевищує  $6 \cdot 10^{-5}\%$ . Основні джерела селену - відходи електроочищення міді і виробництва сірчаної кислоти. Буває аморфним і кристалічним моноклінним або гексагональним. Кристалічний селен анізотропний. Отруйний.

Для виготовлення напівпровідникових приладів використовують гексагональний селен діркової провідності.

Основні властивості селену:  $d = 0,8 \text{ т/м}^3$ ,  $t_{\text{плав.}} = 1217 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 6,3$ ,  $\rho = 10^{10} \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  залежно від роду і концентрації домішок, температури, освітленості. Застосовується для виготовлення фотоелементів, випрямлячів, у ксерографії, але зараз використання суттєво скоротилося.

### **Бінарні з'єднання**

**З'єднання  $A^{IV}B^{IV}$ .** Чистий кубічний карбід кремнію ( $\text{SiC}$ ) зі складом 70,045 % Si і 29,955 % C – безбарвний. Легований донорними домішками SiC має зелений колір, акцепторними – блакитний і чорний.

Виготовляють в електропечах при відновленні кварцового піску вуглецем при  $2000^\circ\text{C}$ . Отримані друзи при необхідності розмелюють в порошок. Монокристалічний карбід кремнію отримують осадженням з газової фази при  $2500\text{-}2600^\circ\text{C}$ , або з розчину карбіду кремнію в розплавленому кремнії, чистому або з домішками Co, Cr чи рідкісноземельних елементів.

Карбід кремнію характеризується високою твердістю, термічною, хімічною і радіаційною стійкістю.

Основні властивості карбіду кремнію:  $d = 3,1 \text{ т/м}^3$ ,  $W_{33} = 2,39 \text{ eV}$ , рухливість електронів при  $20^\circ\text{C}$   $u_n = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , рухливість дірок  $u_p = 0,02 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , робоча температура  $(-60 - 400)^\circ\text{C}$ .

З карбіду кремнію виготовляють варистори для іскрових вентильних розрядників, що мають нелінійну залежність між струмом і напругою, а також

світлодіоди<sup>9</sup> різного кольору, силові напівпровідникові прилади, тунельні діоди, лічильники часток високої енергії, терморезистори, фоторезистори тощо.

**З'єднання  $A^{III}B^V$**  – фосфіди ( $AlP$ ,  $GaP$ ,  $InP$ ), арсеніди ( $AlAs$ ,  $GaAs$ ,  $InAs$ ), антимоніди ( $AlSb$ ,  $GaSb$ ,  $InSb$ ). Всередині кожної групи зі зростанням сумарного атомного номера елементів знижується температура плавлення, зменшується твердість і ширина забороненої зони і зростає рухливість носіїв заряду.

Основні властивості напівпровідників  $A^{III}B^V$  наведені в табл. 16.1.

Таблиця 16.1

Основні властивості хімічних з'єднань типу  $A^{III}B^V$

Група	Хімічні сполуки	Сумарний атомний номер	Постійна ґратки, нм	Густина, Мг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Показник заломлення	Температурний коефіцієнт лінійного розширення, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	Діелектрична проникність (низькочастотна)	Ширина забороненої зони при 20°С, еВ	Рухливість, м <sup>2</sup> /(В·с)	
										електронів	дірок
Фосфіди	AlP	28	0,544	2,42	2550	3,4	-	9,8	2,45	0,008	0,003
	GaP	46	0,545	4,13	1467	-	5,30	10,0	2,2	0,019	0,012
	InP	64	0,588	4,79	1070	-	4,75	12,1	1,35	0,46	0,015
Арсеніди	AlAs	46	0,566	3,60	1750	3,3	5,20	10,9	2,16	0,028	-
	GaAs	64	0,565	5,32	1238	-	6,00	13,8	1,43	0,95	0,045
	InAs	82	0,606	5,69	943	-	5,20	14,55	0,356	3,30	0,046
Антимоніди	AlSb	64	0,614	4,22	1060	3,4	4,88	11,21	1,62	0,02	0,055
	GaSb	82	0,610	5,62	712	-	6,70	15,69	0,70	0,40	0,14
	InSb	100	0,648	5,78	525	-	5,04	17,72	0,18	7,80	0,075
Нітриди	AlN	20	0,311	3,26	2400	2,2	4,03	8,5	5,88	0,008	-
			0,498								
	GaN	38	0,319	6,09	1700	2,29	5,59	12,3	3,39	0,044	0,0003
			0,519								
	InN	56	0,353	6,88	1200	2,56	-	5,5	1,95	0,0035-0,0050	-
			0,569								

Примітка: У чисельнику вказані значення постійних ґраток  $a$ , в знаменнику -  $c$ .

<sup>9</sup> Світлодіоди випромінюють світло, фотодіоди – поглинають.



Арсенід галію  $GaAs$  – найширше використовуваний зі сполук  $A^{III}B^V$  напівпровідниковий матеріал сірого з фіолетовим відтінком кольору і робочою температурою до 300-400 °С. З нього виготовляють епітаксціальні структури, фотоелементи (ККД біля 7%), дозиметри рентгенівського випромінювання, напівпровідникові лазери, тунельні діоди, генератори ВЧ коливань з частотою до  $10^{11}$  Гц. Прилади на  $GaAs$  перевершують за частотою германієві та за температурою кремнієві прилади.

Фосфід галію  $GaP$  - напівпровідниковий матеріал сірого кольору з широкою забороненою зоною і малою рухливістю носіїв заряду, має діркову провідність до 700°С. Використовують для виготовлення світлодіодів червоного та зеленого випромінювання (голубого – нітрид галію), а також сонячних батарей.

Антимонід індію  $InSb$  – має малу заборонену зону і найнижчу температуру плавлення (525°С) з усіх напівпровідників  $A^{III}B^V$ . З нього виготовляють фотоелементи високої чутливості, датчики Холла, оптичні фільтри, термоелектричні генератори і холодильники.

### **З'єднання $A^{II}B^{VI}$ – сульфіди, селеніди, телуриди, оксиди (табл. 16.2)**

– сульфіди ( $ZnS$ ,  $PbS$ ,  $Bi_2S_3$ ,  $CdS$ ) використовують для виготовлення фоторезисторів, електролюмінофорів осцилографічних і телевізійних електронно-променевих трубок (сульфід індію активується міддю), вхідних вікон і лінз в оптикоелектронних приладах;

– селеніди ( $PbSe$ ,  $Bi_2Se_3$ ,  $CdSe$ ,  $HgSe$ ) вживають для виготовлення фоторезисторів, напівпровідникових термоелементів і джерел когерентного випромінювання (лазерів);

– телуриди ( $PbTe$ ,  $Bi_2Te_3$ ,  $CdTe$ ,  $HgTe$ ) застосовують для виготовлення фоторезисторів, термоелементів випромінювальних приладів.  $CdTe$  – чутливий до рентгенівського випромінювання;

– оксиди ( $Cu_2O$ ) – перший тип напівпровідника ( $p$ -тип), що почав використовуватися, перші випрямлячі та фотоелементи.  $ZnO$  застосовують для виготовлення терморезисторів (термісторів), люмінофорів та варисторів.

Таблиця 16.2

Хімічні сполуки	Густина, Мг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Показник заломлення	Температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	Діелектрична проникність	Ширина забороненої зони при 20°С, еВ	Рухливість, м <sup>2</sup> /(В·с)	
							електронів	дірок
ZnS	4,15	1830	2,23	6,5	8-8,5	3,6-3,7	0,016	0,0005
ZnSe	5,42; 5,23	1515	2,43	7,7	8,1-9,1	2,7-2,8	0,07	0,0015
ZnTe	5,68	1295	3,12	8,3	10,0	2,1-2,3	0,034	0,010
CdS	4,82	1750	2,26	5,4	9,0	2,4-2,6	0,035	0,005
CdSe	5,68	1258	2,44	-	9,5-10,5	1,6-1,8	0,08	0,005
CdTe	5,86	1098	2,67	4,2	9,6-11	1,3-1,6	0,10	0,006
HgS	8,10; 7,70	1450	2,63	-	31,0	2,0	0,005-0,02	-
HgSe	8,26	800	-	-	26,0	0,2-0,6	1,0-1,8	-
HgTe	8,42	670	3,80	4,8	20-48	0,02-0,1	1,0-3,0	0,01
PbS	7,61	1114	4,1	-	17	1,17; 0,36*	0,061	0,062
Bi2S3	7,39	720	-	-		1,3*	-	0,02
Cu2O	5,9	~1230	-	-	-	~1,5	-	0,005
ZnO	5,67	2250	1,96	-	8,5	3,2	0,05	-
TiO2	4,2	1640	-	-	-	2,9	0,001	-
CdO	8,2	1636	-	-	22,0	2,2	0,01	-

\*Діелектрична проникність виміряна оптичним методом

## МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

### Основні характеристики магнітного поля

*Магнітне поле* характеризується *індукцією магнітного поля або магнітною індукцією  $B$*  і *напруженістю магнітного поля  $H$* . Зв'язок між цими величинами забезпечується у вакуумі *магнітною сталою  $\mu_0$* <sup>10</sup>, а в магнітному матеріалі *абсолютною магнітною проникністю  $\mu_a$* , що дорівнює добутку магнітної сталої та *відносної магнітної проникності  $\mu_r$* :

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 H + \mu_0 M .$$

Таким чином, магнітна індукція в матеріалі більша від магнітної індукції у вакуумі на добуток магнітної сталої на *намагніченість матеріалу  $M$* .

Напруженість магнітного поля, що визначається струмом, не залежить від магнітних властивостей середовища по аналогії з електричною індукцією, яка просто дорівнює густині зарядів на електродах. Саме в аналогії, що історично сформувалася, між електричною індукцією і напруженістю магнітного поля, а не магнітною індукцією, і полягає відмінність між описаннями електричного і магнітного полів.

Якщо джерелом електричного поля є заряди, що можуть бути позитивними і негативними, то джерелом магнітного поля є електричний струм, що може тільки змінювати напрям, і разом з тим напрям дії магнітного поля.

На відстані  $d$  від прямого провода зі струмом  $I$  напруженість магнітного поля дорівнює

$$H = \frac{I}{2\pi d} ,$$

а в центрі колового струму радіусом  $r$

$$H = \frac{I}{2\pi r} .$$

Крім цих, основних величин, використовують також магнітний момент, що дорівнює векторному добутку струму на площу, охоплену ним,

$$m = [I \times S] ,$$

а також намагніченість, що фактично є питомим магнітним моментом

$$M = \frac{m}{V} = \chi H ,$$

де  $\chi$  - магнітна сприйнятливість.

Легко бачити, що по аналогії з  $\epsilon_r$  відносна магнітна проникність  $\mu_r = 1 + \chi$ . Але на відміну від діелектричної сприйнятливості, що завжди більша нуля, магнітна сприйнятливість може мати різний знак, а тому відносна магнітна проникність може бути як більшою, так і меншою одиниці, в той час як відносна діелектрична проникність завжди більша одиниці.

---

<sup>10</sup> Магнітна стала є абсолютною магнітною проникністю вакууму. В СІ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

## Класифікація магнітних матеріалів

*Магнітними*, як зазначалося при класифікації електротехнічних матеріалів, називаються матеріали, що під дією зовнішнього магнітного поля здатні намагнічуватися, тобто набувати особливих магнітних властивостей.

Якщо розглядати магнітні властивості атома, то атом це складна магнітна система, магнітний момент якої є векторною сумою магнітних моментів електронів і ядра, причому магнітний момент ядра суттєво ( $\sim$  в  $10^3$  раз) менший за магнітний момент електрона<sup>11</sup>. Тому магнетизм речовини в основному має електронну природу та зумовлюється рухом електронів в атомах. Обертальний рух електрона навколо ядер утворює орбітальні магнітні моменти, які часто взаємно компенсуються при утворенні хімічних зв'язків. Але сам електрон має власний спіновий магнітний момент, що є чисто квантовомеханічною величиною і якому в класичній фізиці немає відповідників. Власне саме спіновий магнітний момент електрона і зумовлює магнітні властивості речовини. Тому магнітні властивості найбільш виражені в перехідних елементах, які мають на внутрішніх оболонках електрони з неспареними спінами.

Розглянемо реакцію матеріалів на зовнішнє магнітне поле та проведемо їхню класифікацію на п'ять основних видів магнітних матеріалів: діа-, пара-, феро-, антиферо- та феримагнетики.

*Діамагнітний ефект* проявляється в усіх речовинах. У результаті взаємодії з зовнішнім магнітним полем в будь-якій речовині спостерігається прецесія (як у дзиги при спробі відхилити її вісь від вертикального напрямку обертання) орбіт електронів, в результаті чого індукується магнітний момент, який направлений *проти* зовнішнього магнітного поля і зменшує його напруженість.

*Магнітна сприйнятливість* (величина, що характеризує властивість намагнічуватися у магнітному полі)  $\chi$  для *діамагнетиків* в результаті того, що наведене магнітне поле направлене проти зовнішнього поля, негативна, і за абсолютним значенням становить приблизно  $10^{-5}$ , а відносна магнітна проникність  $\mu_r$ , трохи менша за одиницю (табл 17.1). Значення  $\chi$  та  $\mu_r$  не залежать від температури і напруженості магнітного поля, тому що внутрішньоатомні енергія і напруженість магнітного поля значно більші зовнішніх.

Характерною є поведінка діамагнетика в магнітному полі. Діамагнетик *виштовхується* з нерівномірного магнітного поля, а в рівномірному - прагне розміститися *перпендикулярно до напрямку силових ліній*.

В зв'язку з незначною величиною діамагнітного ефекту до *діамагнетиків* належать тільки речовини, всі спінові та орбітальні магнітні моменти частинок

---

<sup>11</sup> Магнітний момент електрона складається з орбітального, мінімальне значення якого дорівнює магнетону Бора  $eh/(4\pi mc)$ , і спінового, в два рази більшого за магнетон Бора.

яких у відсутності зовнішнього поля взаємно скомпенсовані, і магнітні властивості яких визначаються наведеним магнітним моментом. До таких речовин відносяться водень, аміак, азот, хлор, всі інертні гази, більшість органічних сполук, камінна сіль, деякі метали (мідь, цинк, срібло, свинець, золото, ртуть), металоїди (фосфор, сірка, кремній), деякі неорганічні речовини (скло, мрамур, вода, нафта, віск, деревина) а також галій, графіт, сурма, вісмут (підвищений діамагнітний ефект) та надпровідники, що є ідеальними діамагнетиками (наддіамагнетиками).

Якщо ж повної компенсації магнітних моментів немає, то атом має властивості магнітного диполя і відноситься до інших типів магнетиків.

*Парамагнетик* - речовина, атоми, іони чи молекули якої у відсутності зовнішнього магнітного поля мають не скомпенсовані хаотично орієнтовані результуючі магнітні моменти. Під дією зовнішнього магнітного поля магнітні моменти частинок речовини орієнтуються *у напрямі* магнітного поля та посилюють його, що і називають *парамагнітним ефектом*. Таким чином, у результаті орієнтації магнітних моментів парамагнетиків у зовнішньому магнітному полі для парамагнетиків  $\chi > 0$  і знаходиться у межах  $10^{-8} \dots 10^{-2}$ , при цьому відносна магнітна проникність  $\mu_r \geq 1$  (табл. 17.1).

На відміну від діамагнетиків парамагнетики *втягуються* в нерівномірне магнітне поле, а в рівномірному - прагнуть розміститися *уздовж силових ліній*.

Обидві величини  $\chi$  та  $\mu_r$  для парамагнетиків, крім металевих, залежать від температури, оскільки тепловий рух порушує упорядкованість магнітних моментів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Температурна залежність магнітної сприйнятливості у цьому випадку описується законом Кюрі-Вейса

$$\chi = \frac{C}{T - \Delta},$$

де  $C$  – стала Кюрі,  $\Delta$  - стала Вейса, що може приймати як позитивне, так і негативне значення.

Для металів, тобто для електронного газу в металах, магнітна сприйнятливість менша, ніж для інших парамагнетиків, і не залежить від температури, тому що електрони в металі вироджені і їх концентрація практично не змінюється з температурою, а магнітний момент електрона фіксований, бо залежить тільки від фундаментальних сталих.

В залежності від напруженості магнітного поля при кімнатній температурі в області  $H \approx 10^{11}$  А/м має місце насичення намагніченості. При температурі 1 К насичення проявляється вже при  $H \approx 3 \cdot 10^5$  А/м.

До парамагнетиків відносяться кисень, оксид азоту, лужні метали, перехідні метали (Ti, V, Cr, Mn й ін.), солі заліза, кобальту, нікелю, рідкісноземельні елементи від церію до лютецію, алюміній, платина.

Зважаючи на слабе проявлення магнітних властивостей, використання як діамагнетиків, так і парамагнетиків в електротехніці суттєво обмежене.

*Феромагнетик* – як правило, кристалічна речовина, у якій магнітні моменти атомів або іонів знаходяться у стані самодовільного магнітного упорядкування, утворюючи домени – локальні макрообласті, що мають просторово однорідне упорядкування магнітних моментів атомів або іонів. Застереження "як правило" у визначення введено тому, що коли навчилися отримувати аморфні метали, охолоджуючи розплавлений метал зі швидкістю  $10^6$  К/с, впевнилися, що феромагнітні метали в аморфному стані теж мають яскраво виявлені феромагнітні властивості.

Таблиця 17.1

Значення магнітної сприйнятливості  $k_m$  і магнітної проникності  $\mu$  деяких діамагнетиків і парамагнетиків

Речовина	$\chi$	$\mu = 1 + \chi$
Діамагнетики		
Вісмут	$-1,7 \cdot 10^{-4}$	0,99983
Вода	$-0,88 \cdot 10^{-5}$	0,9999912
Мідь	$-0,94 \cdot 10^{-5}$	0,9999906
Кремній	$-0,3 \cdot 10^{-5}$	0,999997
Водень	$-0,208 \cdot 10^{-8}$	0,9999999979
Парамагнетики		
СаО	$5,8 \cdot 10^{-3}$	1,0058
Платина	$2,93 \cdot 10^{-4}$	1,000293
Алюміній	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,000214
Повітря	$3,65 \cdot 10^{-7}$	1,000000365

Намагнічування феромагнетиків і утворення доменів є наслідком обмінної взаємодії, подібної до моделі миттєвих іонів, що розглядалася раніше як один з варіантів теоретичного пояснення утворення ковалентних молекул. При утворенні ковалентного зв'язку можна виходити з уявлення про утворення миттєвих іонів, коли при перекриванні хвильових функцій один з усупільнених електронів, що забезпечують зв'язок, переходить, враховуючи наявність молекулярної орбіталі, до чужого атома, перетворюючи його на негативний іон, що притягується до позитивного іона, який утворився внаслідок втрати електрона. Потім електрон повертається до свого атома і взаємодія зникає, але відновлюється знову при переході електрона до чужого атома. Таким чином, атоми, обмінюючись електронами, при достатній енергії взаємодії миттєвих іонів, або обмінній енергії, що обчислюється через обмінний інтеграл, забезпечують існування молекули.

При взаємодії атомів з неспареними електронами електрон, переходячи до чужого атома, може орієнтуватися так, що його спін буде паралельним спіну електрона в цьому атомі (ферромагнетик), чому відповідає додатне значення обмінного інтеграла, або протилежно направленим (антиферромагнетик, феримагнетик) відносно нього, що приведе до від'ємності обмінного інтеграла. Встановлено, що через нуль обмінний інтеграл проходить при умові, що відношення  $a/d$ , де  $a$  – відстань між вузлами кристалічної ґратки,  $d$  – діаметр недобудованої електронної оболонки ( $3d$  або  $4f$ ), дорівнює 1,5.

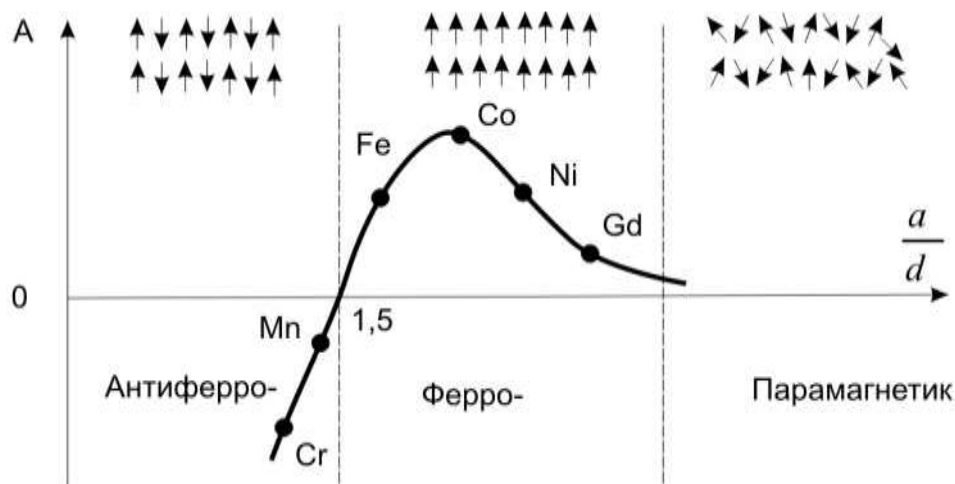


Рис. 17.1 Залежність обмінного інтеграла  $A$  від ступеня перекривання електронних оболонок сусідніх атомів (відношення  $a/d$ ):  $a$  – відстань між атомами;  $d$  – діаметр оболонки, що містить некомпенсовані спіни.

Таким чином, для виникнення ферромагнітних доменів потрібна наявність в речовині неспарених електронів на  $3d$  або  $4f$  оболонці при відношенні  $a/d > 1,5$ .

Як відзначалося, ферромагнетик у відсутності зовнішнього поля розбивається на невеликі, однорідно намагнічені області – домени. У межах домену матеріал намагнічується до насичення без дії зовнішнього магнітного поля, в результаті чого  $\chi$  та  $\mu_r$  можуть досягати значень  $10^6$ . Але хоча результуючі магнітні моменти кожного з доменів відмінні від нуля, через хаотичність орієнтації окремих доменів магнітний момент не намагніченого ферромагнетика дорівнює нулю.

Слід враховувати, що магнітні властивості ферромагнетиків зумовлені саме доменною структурою. Існування доменів доведено експериментально – на полірованій поверхні осад тонкого порошку показує контури доменів (фігури Акулова-Біттера).

В зовнішньому полі ферромагнетика сильно намагнічуються за рахунок орієнтації магнітних доменів та в значній мірі зберігають намагнічування при вилученні з поля. Намагнічування ферромагнетиків у зовнішньому полі пов'язане з рухом доменних границь і орієнтацією домена за полем. За температур, що руйнують доменну структуру (вищих за температуру Кюрі),

феромагнетики поводять себе, як парамагнітні матеріали. Особливості намагнічування феромагнетиків, враховуючи їх широке застосування в електротехніці та енергетиці, ми розглянемо трохи пізніше більш детально.

*Антиферомагнетик* - кристалічна речовина, у якої магнітні моменти атомів або іонів в обмеженій області простору – домені знаходяться в стані самодовільного магнітного упорядкування, причому результуючі магнітні моменти кожного з доменів рівні нулю завдяки антипаралельному розташуванню некомпенсованих магнітних моментів сусідніх атомів. Таким чином, антиферомагнетик можна розглядати як систему двох підґраток з однаковими магнітними моментами, що повністю компенсуються. Тому антиферомагнетики не мають магнітного моменту до певної критичної температури (точка Нееля), коли антипаралельна орієнтація зникає і матеріал, як і феромагнетик за точкою Кюрі, починає вести себе, як парамагнетик. Причиною виникнення парамагнетизму, як і феромагнетизму, є електростатичні сили обмінного характеру. Магнітна взаємодія у феримагнетику слабка.

До антиферомагнетиків відносяться рідкісноземельні елементи, Cr, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCr, Mn, MnO<sub>2</sub>, MnO, MnS<sub>2</sub>, MnF<sub>2</sub>, VO<sub>2</sub> і досить велика кількість оксидів, хлоридів, фторидів, сульфідів, карбонатів перехідних елементів, таких як Fe, Cu, Ni, Co та ін.

*Феримагнетик* - кристалічна речовина, магнітну структуру якої можна уявити у вигляді двох або більше феромагнітних підґраток з деякою перевагою однієї з них. Можна також визначити феримагнетик, як не повністю скомпенсований антиферомагнетик.

*Ферити* - це феримагнітна кераміка, що представляє собою складні системи оксидів металів із загальною хімічною формулою MeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, де Me – двовалентний метал: Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg тощо. Тому питомий опір феритів, що знаходиться в межах 10<sup>-3</sup> – 10<sup>11</sup> Ом·м, робить можливим їх використання на високих і НВЧ.

Як магнітні матеріали, що набули найбільшого технічного значення в електротехніці, феро- та феримагнетики класифікують за магнітними характеристиками матеріалів (табл. 17.2) і за областями технічного застосування з врахуванням їхніх основних магнітних характеристик (табл. 17.3).



Таблиця 17.2

## Класифікація феро- і феримагнетиків

Ознака класифікації	Тип феро- і феримагнетиків
Значення $H_c$	Магнітом'які Магнітотверді
Робоча частота	Низькочастотні Високочастотні Надвисокочастотні
Вплив температури	Термомагнітні
Об'ємний ефект намагнічування	З великою магнітострикцією
	З високою магнітною проникністю і індукцією насичення
Характер реакції на магнітне поле	З високою початковою магнітною проникністю З прямокутною петлею гістерезису

Таблиця 17.3

## Застосування магнітних матеріалів

Основні властивості матеріалів	Технічне застосування
Мала коерцитивна сила	Магнітопроводи, трансформатори, реле, електромагніти, електричні машини, осердя котушок індуктивності та магнітних антен, магнітні головки запису та відтворення інформації
Велика коерцитивна сила	Постійні магніти, матеріали для запису та зберігання інформації
Прямокутність петлі гістерезису	Елементи зберігання та переробки цифрової інформації
Магнітострикція	Осердя електромеханічних перетворювачів для ультразвукової техніки та електроакустики
Зміна магнітної проникності від температури	Термомагнітні сплави для компенсування похибок, викликаних зміною індукції постійних магнітів і зміною опору дротів у магнітоелектричних приладах

## Намагнічування феромагнітних матеріалів

Намагнічування феромагнетика описується залежністю  $B=f(H)$  ( $B$  - магнітна індукція;  $H$  - напруженість магнітного поля всередині речовини), що є багатозначною функцією. Значення індукції, що відповідає даному значенню напруженості магнітного поля, залежить від магнітної історії матеріалу. В залежності  $B=f(H)$  прийнято розрізняти криві намагнічування, петлі окремих циклів та граничну петлю гістерезисного циклу.

### *Крива початкового намагнічування і основна крива намагнічування*

Якщо матеріал повністю розмагнічений, то при накладанні монотонно зростаючого поля  $H$  індукція  $B$  буде змінюватися по кривій початкового намагнічування. Через гістерезисні явища в феромагнетикі крива початкового намагнічування не відповідає умові доброї відтворюваності. Тому для характеристики магнітних матеріалів використовують близьку до неї основну криву намагнічування (рис. 17.2, а) - геометричне місце вершин симетричних петель магнітного гістерезису, що їх одержують при кількох послідовних перемагнічуваннях феромагнетика шляхом зміни полярності магнітного поля. Кожній новій петлі гістерезису відповідає послідовно зростаюче максимальне значення напруженості магнітного поля. При цьому кожен цикл перемагнічування повинен закінчуватися при одній і тій же полярності магнітного поля.

На основній кривій виділяються чотири характерні ділянки, пов'язані з процесами намагнічування феромагнетика.

В області слабких полів (зона I) за рахунок зменшення об'єму сусідніх доменів і переходу частинок феромагнетика від доменів, що утворюють значний кут між вектором намагнічування домена та напрямком поля намагнічування, до доменів, що утворюють незначний кут між вектором намагнічування домена та напрямком поля намагнічування, відбувається *зворотне зміщення меж між доменами та збільшення об'єму тих доменів, вектор намагніченості яких утворює найменший кут з напрямком поля намагнічування  $H$* . Процес оборотний та при зменшенні поля намагнічування до нуля розміри всіх доменів відновлюються.

У області середніх значень полів (зона II) відбувається *необоротне зміщення границь доменів з орієнтацією векторів намагніченості вздовж тієї осі легкого намагнічування, напрямком якої складає найменший кут з напрямком зовнішнього поля*.

В області сильних полів (зона III) відбувається *процес повороту векторів намагніченості з напрямків вздовж осі легкого намагнічування до напрямку паралельного зовнішньому полю*.

Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються вздовж поля, настає *технічне насичення намагніченості* (зона IV).

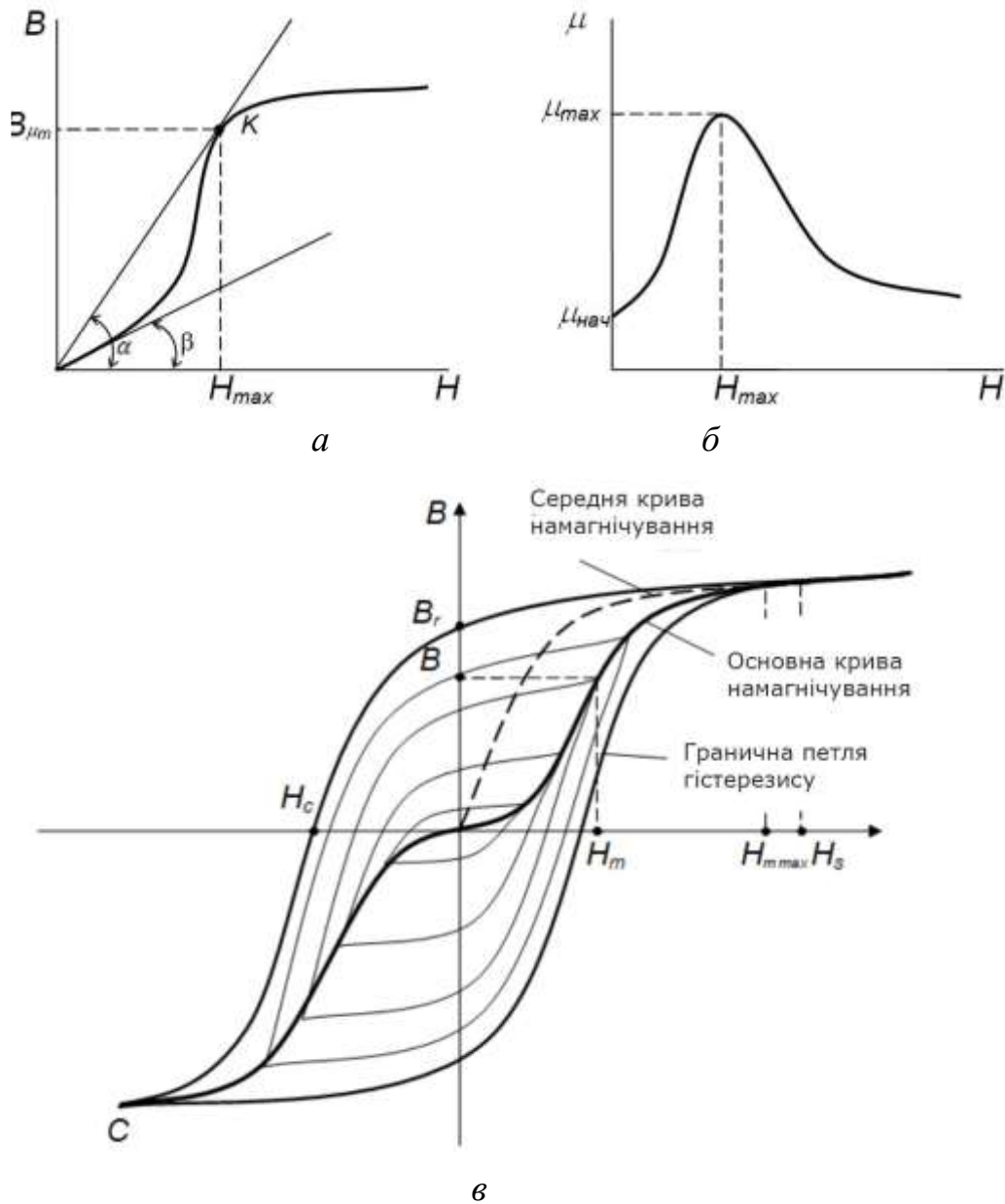


Рис. 17.2. Основна крива намагнічування – а); залежність відносної магнітної проникності – від напруженості магнітного поля – б); петлі гістерезису феромагнетика – в).

Основна крива намагнічування також використовується для практичного визначення ряду технічних параметрів феромагнетиків. По ній можна визначити початкову і максимальну магнітні проникності, що характеризують здатність феромагнетика намагнічуватися в слабких магнітних полях. Початкова магнітна проникність визначається за нахилом дотичної в точці, яка відповідає початку координат:

$$\mu_{п} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{H=0},$$

а максимальна - за максимальним нахилом прямої, проведеної з початку координат і дотичної до основної кривої намагнічування:

$$\mu_{\text{макс}} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{H=H_{\text{max}}},$$

де  $\mu_0$  - магнітна постійна ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Значення  $\Delta B$  і  $\Delta H$  можна брати з будь-яких, побудованих на відповідних дотичних, трикутників (не забувайте про масштабний фактор!).

Між цими двома значеннями будуть лежати значення диференціальних магнітних проникностей при напруженості магнітного поля  $H_x$

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{dB}{dH} \right)_{H_x} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\Delta B}{\Delta H} \right),$$

що характеризують магнітні властивості феромагнетика в точці з координатами  $(B, H_x)$  і на практиці визначаються через **дотичну до основної кривої** намагнічування у цій точці і побудований на ній трикутник довільного розміру, як і у випадку графічного обчислення температурних коефіцієнтів відносної діелектричної проникності.

Нелінійність основної кривої намагнічування приводить до екстремальної залежності відносної магнітної проникності  $\mu_r$  від напруженості магнітного поля  $H$  (рис. 17.2, б).

При намагнічуванні змінним струмом із збільшенням частоти через інерційність магнітних процесів феромагнетик намагнічується менше і магнітна проникність знижується. Основній кривій намагнічування у змінному магнітному полі відповідає динамічна крива намагнічування. Магнітні проникності, визначені з допомогою динамічної кривої намагнічування називаються *динамічними*.

Якщо намагнічувати феромагнетик в зовнішньому магнітному полі, а після цього починаючи з будь-якої точки основної кривої намагнічування зменшувати напруженість магнітного поля, то значення індукції також буде зменшуватися, але не за основною кривою, а вище, внаслідок явища гістерезису (відставання). При збільшенні поля протилежної напруженості тій, що використовувалася при намагнічуванні, зразок спочатку буде розмагнічений, а потім перемагнічений, а при новій зміні напрямку поля індукції він знову може повернутися у вихідну точку, тобто буде описана замкнута крива, яка називається петлею гістерезисного циклу перемагнічування. При збільшенні напруженості магнітного поля розміри петлі гістерезису зростають, поки не буде досягнутий максимальний розмір петлі гістерезису, яка вже не змінюється при подальшому збільшенні напруженості магнітного поля. Ця петля називається граничною петлею гістерезису.

**Граничну петлю гістерезису**, при якій намагнічування матеріалу досягає насичення (рис. 17.2, в), використовують для визначення властивостей

ферромагнетика: *індукції технічного насичення*  $B_S$ , за яку приймають індукцію, при якій закінчується розходження прямого і зворотного ходу петлі гістерезису, *залишкової індукції*  $B_r$  - *індукції*, що зберігається у магнітному матеріалі після намагнічування його до технічного насичення та зменшення напруженості магнітного поля до нуля; *коерцитивної сили*  $H_c$  - величини, рівній напруженості магнітного поля, необхідної для зміни магнітної індукції від залишкової індукції до нуля.

### ***Магнітом'які і магнітотверді ферромагнітні матеріали***

Основним критерієм при класифікації ферромагнітних матеріалів є значення коерцитивної сили. За коерцитивною силою ферромагнітні матеріали, що використовуються у техніці, прийнято ділити на дві основні групи: магнітом'які та магнітотверді.

Магнітом'які матеріали ( $H_c < 4$  кА/м) відрізняються здатністю намагнічуватися до насичення навіть у слабких полях, що супроводжується малими втратами на перемагнічування, і великою магнітною проникністю. Магнітотверді матеріали ( $H_c > 4$  кА/м) мають велику питому енергію, що накопичується в магнітному матеріалі при його намагнічуванні, яка тим більша, чим вище значення  $B_r$  та  $H_c$ , і порівняно малу відносну магнітну проникність.

Магнітні властивості ферромагнетиків залежать від розміру зерен структури. При дрібнозернистій структурі сумарна площа зерен в одиниці об'єму більша, а тому більша і  $H_c$ , ніж при крупнозернистій. Домішки, які змінюють параметри кристалічної ґратки, теж впливають на магнітні характеристики матеріалів.

### ***Магнітна анізотропія***

Монокристалічні ферромагнетики мають кристалографічні напрямки легкого намагнічування, коли насичення має місце при меншій напруженості магнітного поля, ніж при намагнічуванні у напрямках важкого намагнічування. Наприклад, для  $\alpha$ -заліза, що має об'ємноцентровану кубічну ґратку, віссю легкого намагнічування є напрям ребра куба, важкого – діагоналі. Втрати енергії, наприклад в залізі, при прикладанні магнітного поля у напрямку, що відповідає легкому намагнічуванню, в 5-10 разів менші, ніж коли поле прикладене у напрямку важкого намагнічування, що дає можливість використовувати орієнтовані матеріали для зменшення магнітних втрат.

Магнітна анізотропія не проявляється в полікристалічних ферромагнетиках. Тому для покращення магнітних властивостей полікристалічних ферромагнетиків в них шляхом прокатки в холодному стані створюють текстуру, коли кристалічні зерна орієнтуються переважно в одному напрямку. Наприклад, в електротехнічній сталі зерна орієнтують на ребро, забезпечуючи

реброву текстуру і поліпшуючи магнітні властивості електротехнічної сталі для використання в трансформаторах.

### ***Температурна залежність відносної магнітної проникності***

Температурні залежності відносної магнітної проникності  $\mu_r$  для феромагнетиків аналогічні температурним залежностям відносної діелектричної проникності сегнетоелектриків  $\epsilon_r$ .

Магнітна проникність феромагнетиків з підвищенням температури зростає і при температурі, що дорівнює точці Кюрі ( для заліза – 768<sup>0</sup>С, нікелю – 358<sup>0</sup>С, кобальту – 1131<sup>0</sup>С), досягає максимальних значень. Вище точки Кюрі доменна структура речовини руйнується та матеріал стає парамагнетиком.

Для характеристики залежності магнітної проникності від температури користуються температурним коефіцієнтом магнітної проникності:

$$\alpha_{\mu} = \frac{1}{\mu_r} \frac{d\mu_r}{dt^{\circ}},$$

що є функцією температури.

### ***Магнітні втрати у магнітом'яких феромагнетиках***

Магнітом'які феромагнетики використовують для виготовлення магнітних осердь, магнітопроводів в трансформаторах тощо, де вони працюють у змінних магнітних полях і постійно перемагнічуються. Тому важливою характеристикою магнітом'яких феромагнітних матеріалів є втрати потужності на процеси перемагнічування, які викликають небажане нагрівання матеріалу. Розрізняють втрати на гістерезис, на вихрові струми та додаткові.

Магнітом'які матеріали, що використовуються в електротехнічному устаткуванні, внаслідок малого значення коерцитивної сили мають і малі *питомі втрати енергії на гістерезис*, що визначаються площею петлі гістерезису

$$w_{\Gamma} = \oint B dH$$

а *питомі втрати потужності на гістерезис* з врахуванням частоти і маси дорівнюють

$$w_{\Gamma} = f \oint \frac{B dH}{d} = \eta f B_{max}^n / d,$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу;  $n$  беруть рівним 1,6 при магнітній індукції від 0,1 до 1Тл і 2 при  $B > 1$ Тл.

*Втрати на вихрові струми* залежать не тільки від магнітних і електричних властивостей феромагнетика, а і від форми зразка. Для листового зразка *питомі магнітні втрати* дорівнюють

$$p_{вс} = \frac{1,64 B_{max}^2 f^2 h^2}{\rho d}$$

де  $B_{max}$  – амплітуда магнітної індукції;

$f$  - частота змінного струму;  $h$  – товщина листа;  $d$  - густина матеріалу;  $\rho$  - питомий електричний опір.

Таким чином, як випливає з формули, основними способами боротьби з магнітними втратами на вихрові струми є підвищення питомого опору магнітного матеріалу і шихтування<sup>12</sup>.

Для підвищення питомого опору і зменшення магнітних втрат на вихрові струми в магнітом'яку електротехнічну сталь (сплав заліза і кремнію), що масово використовується в електротехніці, вводять кремній, що підвищує питомий опір заліза, а також набирають осердя і магнітопроводи з окремих, ізольованих один від одного, листів. При такому шихтуванні, тобто виготовленні осердь з тонких, товщиною порядку 1 мм і менше, листів, руйнуються шляхи протікання вихрових струмів, а інтенсивність вихрових струмів різко знижується.

Низькі втрати на вихрові струми, крім того, мають місце у феритах, в склад яких входять оксиди перехідних металів, що за електропровідністю близькі до діелектриків. Дуже ефективно вихрові струми також подавляються в магнітодіелектриках, що є композиційними матеріалами з діелектричною матрицею та феромагнітним наповнювачем. І ферити, і магнітодіелектрики, на відміну від електротехнічної сталі, можуть використовуватися на підвищених і високих частотах.

При певній частоті втрати на вихрові струми, що залежать від частоти в квадраті, почнуть переважати втрати на гістерезис, що є лінійною функцією частоти. Враховуючи, що магнітні втрати залежать і від товщини магнітом'якого матеріалу, для кожної частоти необхідно використовувати листи феромагнетиків різної товщини: наприклад при частоті 50 Гц використовують листи 0,3-0,5 мм, при 400 Гц – 0,08-0,2 мм, при частотах від 1 до 20 кГц – 0,05 мм і при частоті 100 кГц – 0,001 мм.

*Товщину ізоляції магнітного листа* намагаються зробити якомога тоншою для збільшення коефіцієнта заповнення

$$\kappa_3 = \frac{V_f}{V},$$

де  $V_f$  – об'єм, зайнятий феромагнетиком,  $V$  - загальний об'єм магнітного виробу. Зі збільшенням товщини магнітного листа чи стрічки товщина його ізоляції, дещо зростає і може становити від 1 до 5 мкм.

Для *додаткових магнітних втрат*, пов'язаних з магнітною післядією, немає надійних розрахункових формул. На практиці вони обчислюються як різниця між повними магнітними втратами  $p$  та сумою магнітних втрат на гістерезис і вихрові струми

---

<sup>12</sup> Шихтування – заміна монолітного осердя чи магнітопровода спресованим набором окремих, ізольованих один від одного, листів.

$$P_0 = P - P_{\text{вс}} - P_2.$$

В схемотехніці магнітні втрати потужності в котушках індуктивності інколи характеризують тангенсом кута магнітних втрат. Якщо моделювати реальну котушку індуктивності послідовним з'єднанням ідеальної індуктивності  $L$  і активного опору  $r$ , то тангенс кута магнітних втрат на частоті  $\omega$  дорівнює

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{\omega L}.$$

### **Магнітострикція**

Намагнічування феромагнетиків супроводжується їх деформацією – магнітострикцією. Кількісно її характеризують константою магнітострикції

$$\lambda_s = \frac{\Delta l}{l_0} |_{B_s},$$

що фактично дорівнює відносному подовженню зразка при намагніченні до стану технічного насичення. Константа магнітострикції мала за значенням:  $10^{-6}$  –  $10^{-4}$  і, крім того, залежить від напруженості магнітного поля, причому може змінювати знак. Найбільше значення  $\lambda_s$  має для рідкісноземельних феромагнетиків (гігантська магнітострикція), наприклад, для монокристалічного тербію  $\lambda_s = 2 \cdot 10^{-2}$ .

Магнітострикція – зворотне явище – механічна деформація феромагнетика викликає зміну стану його намагніченості. Зворотність магнітострикції застосовують при виготовленні реле, вібраторів, перетворювачів, тощо в приладобудуванні.

Взагалі, у магнітних матеріалах має місце кілька десятків термомагнітних, магнітооптичних та інших різноманітних явищ, що використовуються в електронній техніці, приладобудуванні, лазерній техніці, техніці зв'язку, в обчислювальній техніці тощо. Але в даному посібнику ми обмежимося тільки розглянутими явищами, що широко використовуються саме в електротехніці та електроенергетиці.



## ЛЕКЦІЯ 18

### МАГНІТОМ'ЯКІ МАТЕРІАЛИ

Вимоги до властивостей магнітом'яких матеріалів формуються відповідно до сфери їх використання: магнітопроводи і осердя трансформаторів, обертових електричних машин, дроселів і електромагнітів, магнітні екрани, вимірювальні прилади і інші випадки, коли необхідно при найменших витратах енергії досягти найбільшої індукції. Саме тому магнітом'які матеріали повинні мати високу індукцію насичення і магнітну проникність, малу коерцитивну силу, малі втрати на гістерезис і високий питомий опір.

Для зменшення коерцитивної сили і, відповідно, втрат на гістерезис, магнітом'які матеріали ретельно очищають від домішок, особливо кисню, вуглецю, сірки і фосфору, що утворюють нерозчинні в металі хімічні сполуки, такі як оксиди, карбіди, сульфіди, фосфіди. Для цього виплавляють магнітом'які матеріали у вакуумі або інертному середовищі, а вироби з них для збільшення розміру зерен, що приводить до зменшення коерцитивної сили, відпалюють при 900-1200°C у вакуумі або водні.

Для зменшення втрат на вихрові струми в феромагнетиках, як вже говорилося вище, використовують магнітом'які матеріали з підвищеним питомим електроопором, а, також застосовують шихтування, тобто осердя набирають з окремих ізольованих один від одного тонких листочків.

В залежності від частоти розрізняють низькочастотні магнітом'які матеріали з питомим опором  $10^{-7}$  Ом·м на основі заліза, і високочастотні: магнітодіелектрики і ферити (питомий опір до  $10^8$  Ом·м). При ультразвукових частотах використовують тонколистові (25-30 мкм) і рулонні холоднокатані електротехнічні сталі, а також тонкі плівки пермалою (до 2-3 мкм).

Деякі властивості основних магнітом'яких матеріалів наведені в табл. 18.1

### Магнітні матеріали на основі технічно чистого заліза

*Технічно чисте залізо* може виготовлятися у вигляді *низьковуглецевої електротехнічної нелегованої сталі, електролітичного і карбонільного заліза.*

*Сталь низьковуглецева електротехнічна нелегована* – це різновид технічно чистого заліза, що містить вуглецю менше 0,035%, інших домішок, в тім числі *Mn, Si, P, S, Cu* – не більше 0,95...1%. За кордоном має назву „армко-залізо”. Отримують шляхом рафінування чавуну в мартенівських печах або в конверторах. Поставляють без термообробки. Покращити магнітні властивості сталі можна шляхом багатократних переплавлень у вакуумі або у водні, термообробкою для збільшення розміру зерен, легуванням кремнієм, титаном або алюмінієм, що зменшує швидкість старіння (зростання  $H_c$ ) або попереднім старінням при 120°C на протязі 120 годин. Негативно на магнітні властивості

сталі впливають деформації і механічні напруження, що виникають при виготовленні виробів.

Характеристики низьковуглецевої електротехнічної сталі наведені в табл. 18.1

Таблиця 18.1

Магнітні властивості деяких магнітом'яких матеріалів

Матеріал	$\mu_n$	$\mu_m$	$B_s$ , Тл	$H_c$ , А/м	$\rho$ , мкОм·м
Технічно чисте залізо (армко залізо)	250-400	3500-4500	2,18 50 кА/м	40-100	0,1
Сталь сортова електротехнічна нелегована	-	3000-5000	1,54-1,62 2,5 кА/м	50-95	0,1
Електролітичне залізо	600	15000	2,18	30	0,1
Карбонільне залізо	2000-3000	20000-21500	2,18	6,4	0,1
Особливо чисте залізо, ретельно відпалене у водні	60000	200000	2,18	2,4	0,1
Монокристал найчистішого заліза, відпалений у водні	-	1430000	-	0,8	-
Сталь кремениста електротехнічна	200-600	3000-8000	1,89 30 кА/м	10-65	0,25-0,6
Пермалої: низьконікелеві (Ni~40-50%)	2000-4000	15000-60000	1,3-1,6	5-32	0,45-0,9
високонікелеві (Ni~79%)	15000-100000	70000-300000	0,7-0,75	0,65-4	0,16-0,85
Суперпермалої (склад: Ni~79%, Fe 15%, Mo~5% і Mn~0,5%)	100000	600000-1500000	0,79	0,3	0,6
Альсифер (сплав оптимального складу: Si 9,6%, Al 5,4%, і Fe)	35400	117000	1,0	1,76	0,8
Магнітодіелектрики на основі: карбонільного заліза, альсифера, молібденового пермалою	10-20 20-94 60-250	- - -	- - -	- - -	- - -
Ферити: нікель-цинкові марганець-цинкові	10-2000* 700-20000*	40-7000 1800-35000	0,2-0,35 0,15-0,46	1700-8 28-0,25	$10 \cdot 10^8$ Ом·м $10^{-3}$ -20 Ом·м

П р и м і т к а: \* при частоті  $f = 100$  кГц

Низьковуглецеву електротехнічну сталь випускають гарячевальцьовану або ковану. Марки сталей складаються з п'ятизначних чисел, в яких окремі цифри означають наступне:

- перша цифра — клас за видом оброблення тиском (1 – гарячевальцьована і кована, 2 – калібрована);
- друга – тип за вмістом кремнію (0 – сталь нелегована, без нормування коефіцієнта старіння, 1 – сталь нелегована з заданим коефіцієнтом старіння);
- третя – група по основній нормованій характеристиці (8 – коерцитивна сила);
- четверта і п'ята – кількісне значення основної нормованої характеристики (коерцитивна сила в цілих одиницях А/м).

Наприклад, марка 10895 означає сталь низьковуглецева гарячевальцьована, нелегована, без нормування коефіцієнта старіння, з кількісно нормованим значенням  $H_c$ , яке не повинно перевищувати 95 А/м.

В залежності від призначення гарячевальцьована і кована сталі діляться на підгрупи:

*a* – для гарячого оброблення тиском;

*б* – для механічного оброблення (точіння, стругання і т.п.) по всій поверхні.

Максимальна відносна магнітна проникність і значення магнітної індукції не є контрольованими параметрами і визначаються за вимогою замовника. Перед вимірюванням магнітних параметрів проводиться відпалювання сталі при температурі не вище 950°C в безповітряному середовищі, потім її охолоджують в ньому ж до 600°C протягом 10 годин, і тільки після цього можна продовжувати охолодження на повітрі.

Низьковуглецева електротехнічна сталь має низький питомий опір і використовується, в основному, для виготовлення полюсних наконечників електромагнітів, магнітопроводів реле, екрануючих корпусів і ін., тобто тоді, коли не суттєві втрати на вихрові струми, а також є основним компонентом при виготовленні багатьох магнітних матеріалів.

*Електролітичне залізо* отримують електролізом розчину сульфідів або хлоридів заліза, де анодом є чисте залізо, а катодом – пластина м'якої сталі. Осаджене на катоді залізо (2-6 мм) після ретельної промивки знімають і подрібнюють в порошок в кульових млинах, з наступною переплавкою у вакуумі для позбавлення від домішок водню. В переплавленому залізі домішок менше 0,02%.

Оброблене в такий спосіб електролітичне залізо характеризується такими магнітними властивостями:  $H_c = 30$  А/м,  $\mu_{\text{макс}} = 15000$ .

Через високу вартість електролітичне залізо застосовують рідко.

*Карбонільне залізо* (табл. 17.4) одержують за допомогою термічного розкладання при 250°C пентакарбонілу заліза  $Fe(CO)_5$  (жовтувата рідина, яку отримують дією оксиду вуглецю на залізо при температурі 200°C та тиску 15 МПа).

При цьому в залежності від умов розкладання можна одержати залізо різного виду порошкоподібне, губчате і т. п. Для одержання високих магнітних властивостей карбонільне залізо повинне бути термічно оброблене у водні.

Тонкий порошок (0,5-20 мкм) карбонільного заліза застосовують як феромагнітну фазу магнітодіелектриків для виготовлення пресованих високочастотних магнітних осердь.

### **Кремениста електротехнічна сталь**

Основним магнітом'яким матеріалом масового використання для осердь трансформаторів та електричних машин є кремениста електротехнічна сталь, що представляє собою розчин кремнію в залізі.

Введення кремнію підвищує питомий опір заліза, що супроводжується зниженням втрат на вихрові струми, сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту (розкислює сталь), що збільшує  $\mu_r$ , і зменшує  $H_c$ , знижуючи, таким чином, втрати на гістерезис. Але при кількості кремнію більше 5% сталь стає дуже крихкою і витримує тільки один перегин на 90°. Тому максимальний вміст кремнію, що забезпечує більш-менш задовольні механічні властивості, в кременистій електротехнічній сталі складає 4,8%.

Для поліпшення властивостей кременисту електротехнічну сталь вальцюють, для зняття вальцювальних механічних напружень її відпалюють при 900°C, забезпечуючи реброву текстуру рекристалізації.

Таблиця 18.2

*Питомий опір  $\rho$  і густина кременистої електротехнічної сталі залежно від вмісту кремнію*

Ступінь легування сталі кремнієм	Вміст кремнію, %	Питомий опір $\rho$ , мкОм·м	Густина, Мг/м <sup>3</sup>
Нелегована	0-0,4	0,1-0,14	7,85
Слаболегована	0,4-0,8	0,17	7,82
Нижчесередньолегована	0,8-1,8	0,25	7,80
Середньолегована	1,8-2,8	0,40	7,75
Підвищеннолегована	2,8-3,8	0,50	7,65
Високолегована	3,8-4,8	0,60	7,55

Випускають кременисту електротехнічну сталь у вигляді рулонів, листів (товщина 0,1-1 мм без покриття і з ізоляційним покриттям) і холодновальцьованих стрічок (товщина від 0,05 до 0,2 мм, ширина від 5 до 240 мм, без і з покриттям). Маркують її чотирма цифрами: четверта – порядковий номер типу сталі, перші три – тип сталі, що означає класифікацію:

*за структурним складом і видом вальцювання на класи (перша цифра маркування):*

1 – гарячевальцьована ізотропна (ізотропність – незалежність властивостей від напрямку);

2 – холодновальцьована ізотропна;

3 – холодновальцьована анізотропна з ребровою текстурою для магнітопроводів трансформаторів;

5 – холодновальцьована ізотропна з площинною кубічною текстурою для обертових електричних машин з круглою формою статора і ротора.

*за вмістом кремнію (друга цифра маркування):*

0 – до 0,4% Si (нелегована);

1 –  $0,4 < Si \leq 0,8\%$ ;

2 –  $0,8 < Si \leq 1,8\%$ ;

3 –  $1,8 < Si \leq 2,8\%$ ;

4 –  $2,8 < Si \leq 3,8\%$ ;

5 –  $3,8 < Si \leq 4,8\%$ .

*за основними характеристиками, що нормуються, на групи (третьа цифра маркування):*

0 – питомі магнітні втрати при магнітній індукції 1,7 Тл і частоті 50 Гц;

1 – питомі магнітні втрати при 1,5 Тл і частоті 50 Гц ;

2 – питомі магнітні втрати при 1 Тл і частоті 400 Гц;

4 – питомі втрати при 0,5 Тл і частоті 3000 Гц;

6 – магнітна індукція в слабких магнітних полях при напруженості 0,4 А/м;

7 – магнітна індукція в середніх магнітних полях при напруженості 10 А/м.

Основні характеристики кременистої електротехнічної сталі наведені в таблицях 18.2 - 18.4.

При виготовленні осердя трансформатора намоткою, зменшується маса і габарити сталі на 20...25%, а радіотрасформаторів – на 40%.

Таблиця 18.3

Граничні значення питомих втрат і магнітної індукції кременистої електротехнічної сталі класу 2

Марка	Товщина, мм	Питомі втрати, Вт/кг, не більше		Магнітна індукція, Тл, при напруженості магнітного поля, А/м, не менше				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10000	30000
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2112	0,65	3,5	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02
	0,50	2,6	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблиця 18.4

Граничні значення питомих втрат і магнітної індукції кременистої електротехнічної сталі класу 3

Марка	Товщина, мм	Питомі втрати, Вт/кг, не більше			Магнітна індукція, Тл, при напруженості магнітного поля, А/м, не менше		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	-	-	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	-	-	1,75
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90

## Пермалої

Це залізонікелеві сплави з малою коерцитивною силою, великою початковою магнітною проникністю і практично відсутніми анізотропією та магнітострикцією. Розрізняють високонікелеві (70...83% нікелю) та низьконікелеві (45...50% нікелю) пермалої.

Значний вплив на властивості пермалоїв мають добавки. Добавка молібдену та хрому до пермалою підвищує питомий опір і знижує індукцію насичення. Мідь збільшує температурну стабільність магнітної проникності і питомий опір, покращує можливість механічної обробки. Кремній і марганець збільшують питомий опір.

Магнітні властивості пермалоїв чутливі до зовнішніх механічних напружень, залежать від хімічного складу та домішок, особливо тих, що утворюють розчинні в металі сполуки, різко змінюються при термообробці в залежності від її режимів. Тому при виготовленні вироби з пермалою не можна піддавати ударам, вигинам, рихтуванню, шліфуванню, надмірному тиску і здавлюванню обмоткою.

Про кількісні магнітні характеристики пермалоїв можна отримати уявлення з табл. 18.5. Пермалої дуже легко намагнічуються в слабких полях. У високонікелевих пермалоїв індукція насичення в 2 рази нижча ніж в електротехнічної сталі та в 1,5 рази нижча ніж в низьконікелевих пермалоїв. Магнітна проникність високонікелевих пермалоїв в декілька раз вища ніж у низьконікелевих і набагато переважає електротехнічну сталь. Найбільшу магнітну проникність має сплав з 78,5% нікелю, який називають класичним пермалоєм.

Таблиця 18.5

Властивості холоднокатаної пермалоєвої стрічки 0,5 мм (після термообробки)

Марка сплаву	$\mu_{\text{поч}}$	$\mu_{\text{макс}}$	$B_s$ , Тл	$\rho$ , мкОм·м	$H_c$ , А/м
	не менше				не більше
45Н	2800	25000	1,5	0,45	16
50Н	3000	35000	1,5	0,45	10
50Н-У	4000	45000	1,5	0,45	10
50НХС	3200	30000	1,0	0,90	8
79НМ	25000	150000	0,75	0,55	1,6
79НМ-У	30000	220000	0,75	0,55	1,0
80НХС	35000	150000	0,65	0,62	1,0
76НХД	18000	150000	0,75	0,57	1,6
Суперпермалой	100000	1500000	0,8	0,6	0,3

Питомий опір високонікелевих пермалоїв майже в 3 рази менший ніж у низьконікелевих, тому вони погано працюють при високих частотах (виникають вихрові струми).

Маркування пермалоїв складається з цифр, що вказують вміст нікелю в % і літер, що вказують на добавку: *H* – нікель; *K* – кобальт; *X* – хром; *M* – марганець; *C* – кремній; *D* – мідь.

Додаткові: *У* – покращені властивості; *П* – з прямокутною петлею гістерезису.

Всі магнітні вироби з пермалою відпалюють при 1300°C у водні і тривало відпускають при 400-500°C.

До недоліків пермалоїв слід віднести високу вартість, що визначається кількісним вмістом нікелю.

Високонікелеві пермалої використовують для виготовлення осердь малогабаритних трансформаторів, імпульсних трансформаторів, магнітних пускачів, дроселів, реле, що працюють у слабких магнітних полях, голівок апаратури магнітного запису, магнітних екранів.

Низьконікелеві пермалої застосовують для магнітопроводів малогабаритних силових трансформаторів, дроселів і деталей магнітних кіл, що працюють при підвищеній індукції без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням,

### **Альсіфери**

Сплави заліза з кремнієм та алюмінієм. Оптимальний склад альсіферів 9,5% кремнію, 5,6% алюмінію. Властивості:  $\mu_{гн} = 35500$ ;  $\mu_{макс} = 120000$ ;  $H_c = 1,8$  А/м;  $\rho = 0,8$  мкОм·м. Не поступаються високонікелевим пермалоєм. Відрізняються твердістю та крихкістю, але з них можна виготовляти фасовані відливки.

Завдяки крихкості альсіфери розмелюють в порошок і використовують, поряд з карбонільним залізом, як наповнювач для виготовлення високочастотних пресованих осердь. З них виготовляють також магнітні екрани та корпуси приладів, але через крихкість товщина стінок повинна бути не меншою 2...3 мм.

### **Спеціальні феромагнетики**

1. *Сплави з незначною зміною магнітної проникності при зміні магнітної напруженості поля.*

*Пермінвари* – склад 29,4% заліза, 45% нікелю, 25% кобальту, 0,6% марганцю. Спікають при температурі 1000°C, витримують при 400...500°C і повільно охолоджують. Мають невелику коерцитивну силу, початкова магнітна



проникність 300 і зберігають постійне значення до  $H=240$  А/м при  $B=0,1$  Тл. Чутливі до температурних і механічних навантажень.

*Ізонерм* – сплав заліза, нікелю, алюмінію, міді. Відносна магнітна проникність 30-80. При зміні  $H$  до декількох сот А/м зберігає стабільні магнітні властивості.

## **2. Сплави з сильною залежністю магнітної проникливості від температури.**

Застосовують в установках для компенсації температурної похибки, що викликається зміною індукції постійних магнітів або зміною опору проводів магнітоелектричних приладів порівняно з тими значеннями, при яких проводилось градування. Точка Кюрі для них лежить між  $0^{\circ}\text{C}$  і  $100^{\circ}\text{C}$ . Так сплав нікель-мідь при 30% міді компенсує температурну похибку в межах  $(+20\dots+80)^{\circ}\text{C}$ , а при 40% вмісту міді –  $(-50\dots+10)^{\circ}\text{C}$ . Найбільш поширені сплави залізо-нікель-кобальт, що працюють як компенсатори в діапазоні  $(-70\dots+70)^{\circ}\text{C}$ . Використовують також сплави на основі заліза–нікелю та заліза–нікелю–хрому.

## **3. Сплави з високою магнітострикцією.**

В сплавах залізо-платина, залізо-кобальт, залізо-алюміній зміна лінійних розмірів ( $\Delta l/l$ ) при повздовжній магнітострикції позитивна і лежить в межах  $(40\dots120)\cdot 10^{-6}$ .

Явище магнітострикції використовується в генераторах звукових і ультразвукових коливань. Магнітострикційні вібратори застосовуються в технологічних установках з обробки крихких і твердих матеріалів, в дефектоскопах, а також в перетворювачах механічних коливань в електричні.

## **4. Сплави з особливо високою індукцією насичення (до 2,4 Тл).**

До них відносяться *пермендюр* – сплави заліза і кобальту (50...70% кобальту). Питомий електричний опір *пермендюрів* невеликий. Застосовують в спеціальних апаратах, в динамічних репродукторах, осцилографіях, телефонних мембранах. Мають високу вартість.

## **Високочастотні магнітні матеріали**

### ***Магнітодіелектрики***

Для виготовлення магнітодіелектриків використовують порошки з розмеленого карбонільного заліза, альсіферу, їх суміші або молібденового пермалою. Як матричну зв'язку застосовують фенолоформальдегідну смолу, полістирол, скло. Зв'язка утворює електроізоляційну плівку однакової товщини на зернах порошка а тому магнітодіелектрики мають великий питомий електричний опір і малий тангенс кута магнітних втрат.

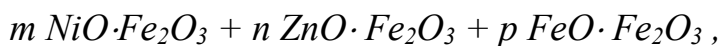
У магнітодіелектриків відносна магнітна проникність через наявність зв'язки нижча ніж у ферромагнетиків і практично не залежить від зовнішнього магнітного поля.

Застосовують магнітодіелектрики для виготовлення осердь індуктивних котушок при підвищеній і високих частотах.

### *Магнітом'які ферити*

За хімічним складом *ферити* (оксифери, феррооксидути) являють собою систему із оксидів заліза і оксидів дво- та тривалентних (рідше одновалентних) металів. В природі ферити зустрічаються у вигляді магнітного залізняку  $FeO \cdot Fe_2O_3$  з магнітними властивостями. Наявність магнітних властивостей у феритів визначається кристалічною структурою матеріалу, наприклад з'єднання  $ZnO \cdot Fe_2O_3$ ,  $CdO \cdot Fe_2O_3$  зі структурою шпінелі не мають магнітних властивостей, а при структурі, що відповідає оберненій шпінелі - мають.

В техніці широко застосовуються ферити, до складу яких входить кілька простих сполук, наприклад нікель-цинковий ферит типу:



де  $m, n, p$  – коефіцієнти кількісних співвідношень компонентів.

Технологія виготовлення: феритовий порошок із попередньо зпечених оксидів з добавкою полівінілового спирту (пластифікатор) запресовують під тиском в певну форму. Потім обпікають в повітрі, щоб виключити вплив вільного водню та запобігти відновленню оксидів, при температурах  $1100 \dots 1400^\circ C$ , при яких полівініловий спирт вигорає. Усадка – до 20%.

Ферити крихкі, тверді матеріали, тому обробляються шліфівкою та поліровкою.

Феритна кераміка має незначну електронну електропровідність. Питомий опір її в  $10^6 \dots 10^{11}$  раз перевищує питомий опір заліза, тобто феритна кераміка має високі магнітні властивості, а також невеликі втрати енергії в області підвищених і високих частот.

Найбільш широкого застосування набули нікель–цинкові ( $NiZn$ ), марганець–цинкові ( $MnZn$ ), літій–цинкові ( $LiZn$ ) ферити.

*Нікель-цинкові* ферити розбивають на чотири групи за значенням магнітної проникності і застосовують до температур, що обмежені точкою Кюрі, і до таких частот:

*I група*  $\mu_r \geq 10000$  – в декілька сот кГц;

*II група*  $\mu_r = 2000 \dots 6000$  – в декілька МГц;

*III група*  $\mu_r = 1000 \dots 1600$  – до декількох десятків МГц;

*IV група*  $\mu_r = 100 \dots 500$  – до 200 МГц.

*Марганець–цинкові* ферити випускають з  $\mu_r = 5500 \dots 6000$  і застосовують як осердя імпульсних трансформаторів і для апаратури дальнього зв'язку при частоті до декілька сотень кГц.

*Літій–цинкові* ферити –  $\mu_r = 3000 \dots 6000$ , точка Кюрі більше  $300^\circ C$ .

Ферити з прямокутною петлею гістерезу характеризуються коефіцієнтом прямокутності:

$$k_n = B_r/B_{max}$$

Бажано, щоб  $k_n \approx 1$  з метою забезпечення швидкого перемагнічування.

Використовують ферити з прямокутною петлею гістерезу для запису інформації в запам'ятовуючих пристроях.

Взагалі магнітом'які ферити розбивають в залежності від сфери застосування на такі групи: загального користування, термостабільні, з високою відносною магнітною проникністю, для телевізійної техніки, для імпульсних трансформаторів, для перестроюваних контурів, для широкодіапазонних трансформаторів, для магнітних головок, для температурних датчиків, для магнітного екранування і для пристроїв, що працюють на ефекті ядерного спінового еха. Таким чином, область застосування магнітом'яких феритів в основному не відноситься до електроенергетики та електротехніки, а тому розглянемо тільки властивості феритів загального користування.

Відносна магнітна проникність феритів загального користування залежить від напруженості магнітного поля (рис. 18.1), його частоти (рис. 18.2), температури (рис. 18.3) та механічних напружень (рис. 18.4).

Тому при використанні магнітом'яких феритів необхідно враховувати ці залежності, особливо від температури, бо їх  $\mu_r$  при перевищенні температур 60-100°C катастрофічно падає.

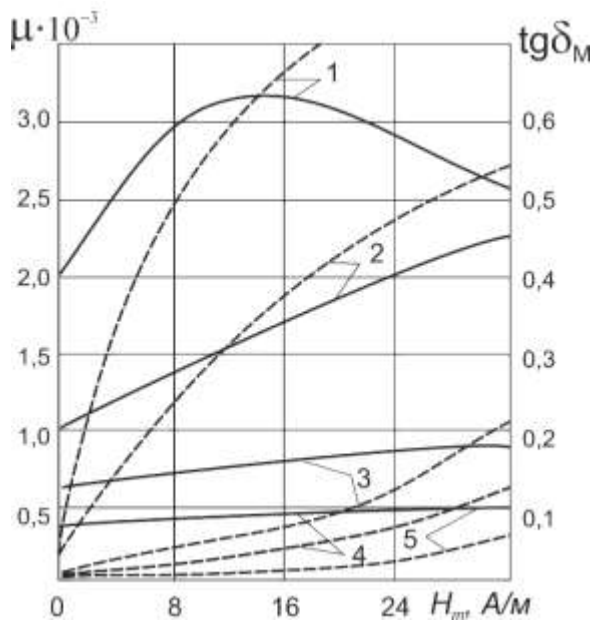


Рис. 18.1 Залежність  $\mu_r$  (суцільна крива) і  $tg\delta_{\text{магн}}$  (пунктир) від напруженості магнітного поля для нікель-цинкових феритів (НН): 1 – 2000НН, 2 – 1000НН, 3– 600НН, 4 – 400НН, 5 – 400НН1.

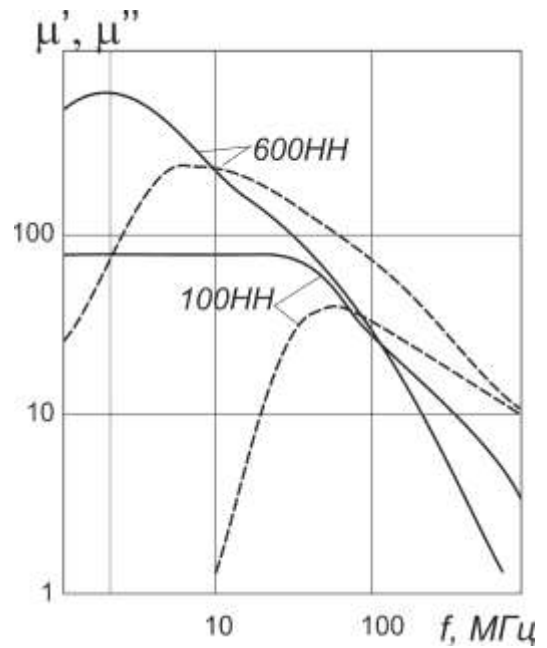


Рис. 18.2 Залежність  $\mu_r'$  (суцільна крива) і  $\mu_r'' = \mu_r' tg\delta_{\text{магн}}$  (пунктир) від частоти магнітного поля

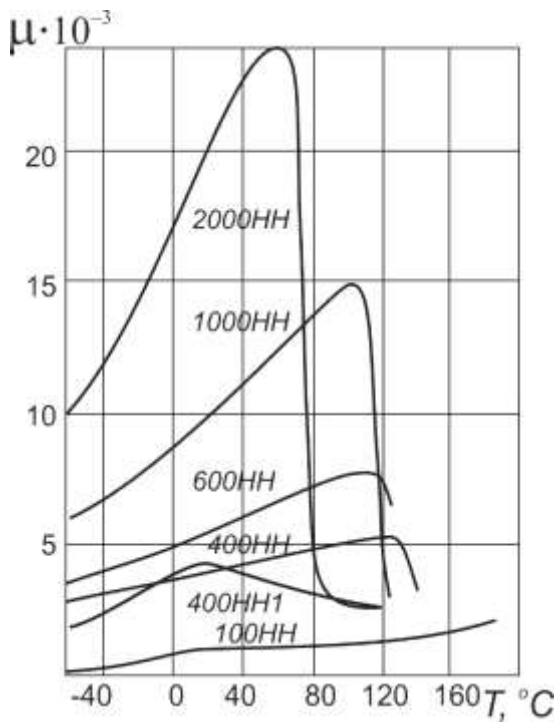


Рис. 18.3 Температурна залежність  $\mu_r$  для нікель-цинкових феритів

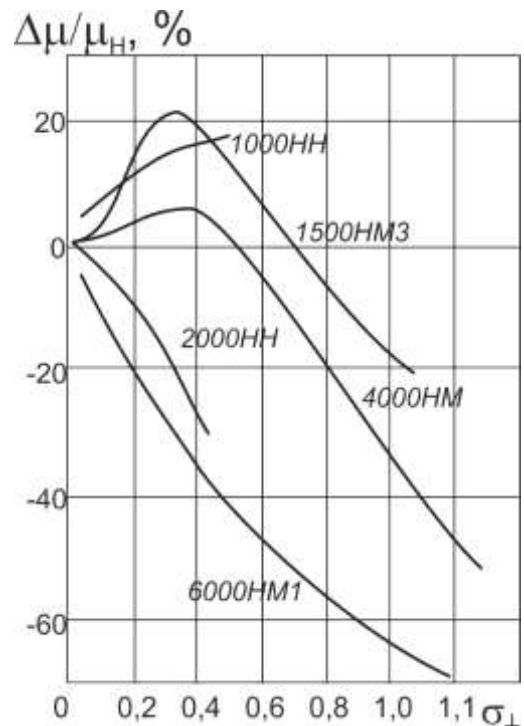


Рис. 18.4 Вплив механічних напружень на відносну магнітну проникність деяких феритів (НМ – марганцево-цинкові ферити):

## МАГНІТОТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ

Магнітотвердими називають магнітні матеріали, що мають коерцитивну силу не менше 4 кАм·м і використовуються для виготовлення постійних магнітів. Магнітні матеріали з коерцитивною силою  $> 4$  кАм·м, що не використовуються для виготовлення постійних магнітів, до магнітотвердих магнітних матеріалів, як правило, не відносяться.

Виходячи з призначення магнітотвердих матеріалів їх основними характеристиками магнітотвердих матеріалів є залишкова індукція  $B_r$ , коерцитивна сила  $H_c$  по індукції, коерцитивна сила  $H_c$  по намагніченості і максимальна питома енергія магнітного поля, що віддається в зовнішній простір  $W_{\text{макс}}$ .

Коерцитивна сила магнітотвердих магнетиків на 1-4 порядки більша, ніж у магнітом'яких, при цьому потрібно мати на увазі, що чим вона більша, тим менша відносна магнітна проникність  $\mu_r$ . Для магнітотвердих матеріалів коерцитивна сила по індукції  $H_{cB}$  і по намагніченості  $H_{cM}$  можуть відрізнятися в кілька разів (рис. 18.5).

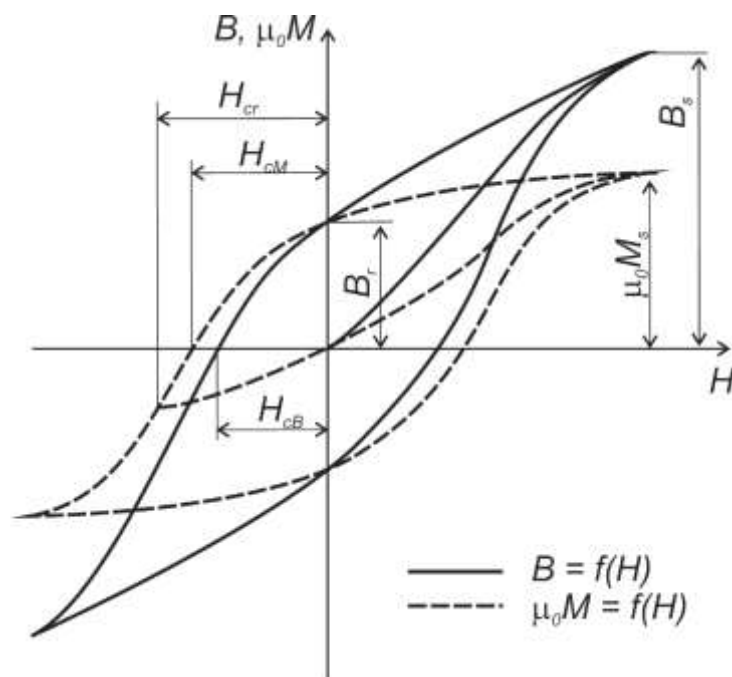


Рис. 18.5. Гістерезисні криві для магнітотвердого магнітного матеріалу по індукції (суцільна крива) і по намагніченості (пунктир).

Петля магнітного гістерезису строго може бути виміряна на зразку замкнутої форми (тороїд) або в замкнутому магнітному колі при дії на зразок зовнішнього магнітного поля. В той же час постійний магніт (рис. 18.6), що є не замкнутою конструкцією з проміжком, де власне і зосереджене магнітне поле постійного магніту, що є предметом практичного використання, і працює в

розімкненому магнітному колі, де немає зовнішнього магнітного поля. При замкненому магнітному проміжку  $B_d=B_r$ , а  $H_d=0$ , при великому проміжку  $B_d=0$ , а  $H_d=H_c$ . І в першому, і в другому випадку енергія магнітного поля в проміжку дорівнює нулю, а тому ці випадки не заслуговують на увагу.

В проміжку постійного магніта створюється його власне магнітне поле, а магнітний потік закорочується через матеріал постійного магніту в напрямку проти намагніченості, що приводить до виникнення власного розмагнічуючого поля. Внаслідок цього робоча тока постійного магніту характеризується координатами  $H_d$  і  $B_d$  (або  $H_d$ ,  $\mu_0 M_d$ ) що визначаються геометрією магнітної системи.

Питома магнітна енергія в повітряному проміжку між полюсами магніту у вигляді замкнутого кільця дорівнює:

$$W_d=0.5 B_d H_d.$$

Найкраще використання магніту досягається при деяких проміжних значеннях, що дорівнюють значенням  $H_{max}$  і  $B_{max}$ , питома магнітна енергія при яких має максимальне значення

$$W_{max} = \frac{H_{max} B_{max}}{2}.$$

Максимальна енергія, що віддається магнітом у зовнішній простір  $W_{max}$  є однією з найважливіших характеристик магнітотвердих матеріалів для постійних магнітів. Вона залежить від типу магнітного матеріалу і може змінюватися від 1 кДж/м<sup>2</sup> для мартенситних сталей до 80 кДж/м<sup>2</sup> для інтерметалічних сплавів кобальта з рідкоземельними елементами.

Для характеристики властивості кільцевих магнітних виробів з порівняно невеликою коерцитивною силою максимально зосереджувати магнітне поле в проміжку використовують поняття коефіцієнта випуклості кривої розмагнічування матеріалу:

$$\gamma=B_d' H_d' /2B_r H_c,$$

який при збільшенні прямокутності петлі гістерезису прямує до одиниці. Для висококоерцитивних магнітних матеріалів, він буде знаходитися в інтервалі 0,25 – 1, тобто не характеризує випуклість кривої розмагнічування, і тому використовується.

При використанні постійних магнітів необхідно мати на увазі старіння магніту, в результаті якого магнітний потік з часом зменшується.

Магнітотверді матеріали за складом, станом і способом отримання поділяються на:

- леговані сталі, загартовані на мартенсит;
- відливні магнітотверді висококоерцитивні сплави;
- магніти з порошків;
- сплави, що пластично деформуються;

- дифузійно твердіючі сплави на основі системи залізо-нікель-алюміній-кобальт (ЮНДК)
- сплави на основі рідкоземельних металів.

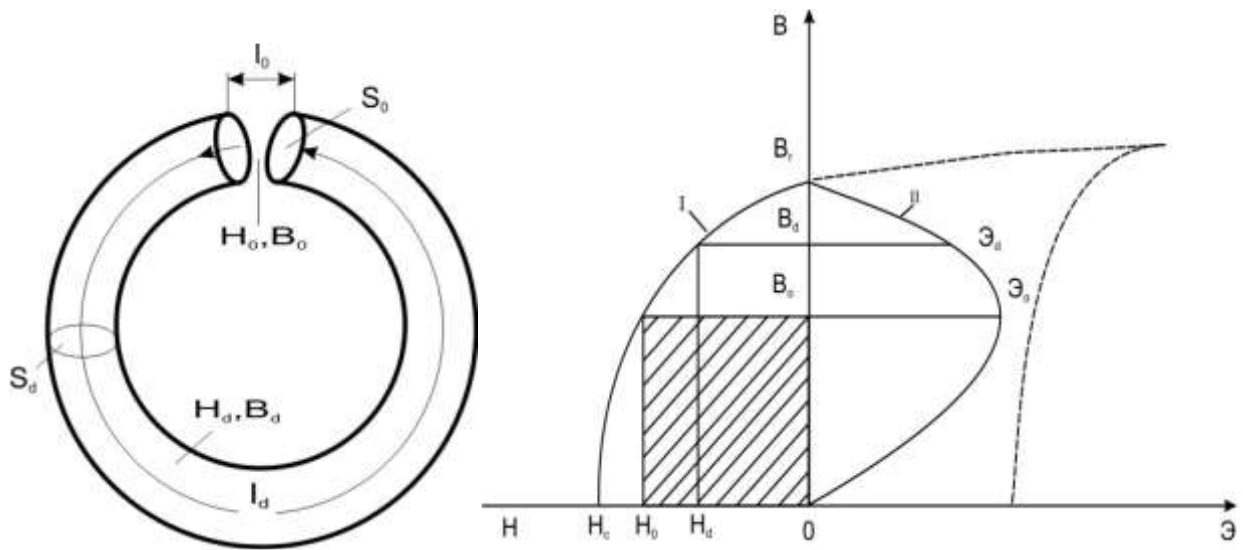


Рис. 18.6 Схема кільцевого магніту і магнітні характеристики кільця з магнітного матеріалу: 1 – магнітна енергія в повітряному проміжку; 2 – крива розмагнічування.

### Леговані мартенситові сталі

Найбільш доступні для виготовлення постійних магнітів. Для легування легованих мартенситних сталей використовують вольфрам, хром, молібден, кобальт. Максимальна енергія магнітного поля  $W_{max}=1...4$  кДж/м<sup>3</sup>. Магнітні властивості гарантуються після термообробки та п'ятигодинної стабілізації в киплячій воді. На сьогодні мають обмежене застосування.

### Відливні магнітотверді сплави

*Альні* – сплави системи алюміній-нікель-залізо. Поділяються на наступні типи:

- альнісі – легують кремнієм;
- альніко – додають кобальт;
- магніко – вміст кобальту більше 24%.

Мають  $W_{max}=3,6...40$  кДж/м<sup>3</sup>.

Сплави, що містять кобальт, використовують, коли вимагаються підвищені магнітні властивості і ізотропність матеріалу.

Недолік – важко виготовити вироби точних розмірів внаслідок крихкості. Через високу твердість механічний обробіток можливий тільки шліфуванням.

## Магніти з порошків

Металокерамічні магніти виготовляють по керамічній технології пресуванням тонкодисперсних порошків магнітних сплавів при подальшому їх спіканні при високих температурах. Отримують точні розміри виробів, що не потребують подальшого оброблення. У металокерамічних магнітів магнітна енергія на 10...20% нижча ніж у відливних, але за механічною міцністю вони в 3...6 раз перевищують останні. Максимальна енергія магнітного поля  $W_{max}=3...16 \text{ кДж/м}^3$ .

## Сплави, що пластично деформуються

Вікалой (34% заліза, 52% кобальту, 14% ванадію) має  $H_c=36 \text{ А/м}$  при  $B_r=1 \text{ Тл}$ . Магнітні властивості проявляє тільки після холодної деформації на 70-90% та наступного відпалювання. До кінцевої термічної обробки вікалой за пластичністю наближається до міді, а після – до сталі. Його пластичність дозволяє виготовляти стрічку і дріт, дрібні магніти складної конфігурації, осердя гістерезисних двигунів, що практично неможливо виготовити з інших магнітних матеріалів через малу пластичність і невелику міцність. Використовують для звукозапису, але в обмеженому діапазоні частот. Для більш широкосмугового запису використовують *магнетит*. Його наносять на ацетилцелюлозну стрічку і отримують магнітну стрічку з параметрами  $H_c=6,4...20 \text{ А/м}$ ,  $B_r=0,8...0,4 \text{ Тл}$ .

До менш використовуваних магнітних матеріалів цієї групи відносять сплави залізо-нікель-мідь (куніфе), залізо-нікель-кобальт (куніко), залізо-кобальт-молібден (комоль), залізо-марганець-нікель, залізо-хром-кобальт. Вони втратили своє значення внаслідок впровадження сплавів ЮНДК, що є більш високоякісними матеріалами.

## Дифузійно твердіючі сплави на основі системи ЮНДК

Дифузійно твердіючі сплави на основі системи залізо-нікель-алюміній-кобальт (ЮНДК) серед магнітотвердих матеріалів виділяються такими особливостями:

1. Їх властивості набагато кращі, ніж властивості магнітних матеріалів, що використовувалися раніше.
2. На цих матеріалах досягнуті неможливі раніше параметри: максимальна магнітна енергія  $W_{max} \geq 40 \text{ кДж/м}^3$  і коерцитивна сила  $H_c \geq 145 \text{ кА/м}$ .
3. Надзвичайно висока стабільність серед магнітотвердих матеріалів: при температурі 500°C на протязі року структурні зміни не зафіксовані, при температурі 600 °C вони можуть працювати не менше 2000 годин, при цьому степiнь старіння не перевищує 1 %.



4. Сплави ЮНДК мають мінімальні температурні залежності магнітних характеристик: ТК залишкової магнітної проникності знаходиться на рівні  $-0,02\%/K$ , а коерцитивної сили –  $0,02-0,04\%/K$ . Різний знак температурних коефіцієнтів дозволяє конструювати магнітну систему майже з нульовим температурним коефіцієнтом в проміжку.

Таким чином, не дивлячись на розробку більш енергоємних і більш висококоерцитивних матеріалів, що витіснили сплави ЮНДК в деяких застосуваннях, незважаючи на дефіцитність кобальта і високу вартість, сплави ЮНДК щироко використовуються, особливо в точному приладобудуванні.

Основним недоліком сплавів ЮНДК є висока твердість і крихкість, внаслідок чого вони можуть механічно оброблятися тільки шліфуванням. Неможливість виконання отворів та різьби вимагають розробки спеціальних рішень при монтажі магнітних систем. До деякої міри недоліки усуваються при виготовленні виробів із сплавів ЮНДК методами порошкової металургії.

### Сплави на основі рідкоземельних металів

Сплави металів групи заліза з рідкісноземельними елементами утворюють інтерметалічні сполуки, що мають найкращі для магнітотвердих матеріалів на даний час магнітні властивості:  $H_c$  до  $2000 \text{ кА/м}$ ,  $B_r = 0,77 - 0,9 \text{ Тл}$ ,  $W_{max} = 75,6 - 112,4 \text{ кДж/м}^3$  (табл. 18.5 ).

Таблиця 18.5

Магнітні властивості сплавів на основі рідкоземельних елементів

	Сплави				
	YCO	CeCO <sub>5</sub>	SuO <sub>5</sub>	YMM	CeMM
$W_{max}, \text{кДж/м}^3$	112.4	75.6	90.4	90.4	79.2
$H_c, \text{кА/м}$	1032	1680	2000	1200	1440

Y – ітрій; Ce – церій; Su – самарій; MM – мішметал (суміш рідкоземельних металів з перевагою одного з них)

### Магнітотверді ферити

Барієві ферити ( $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ) або *фероксдюри* відрізняються від магнітом'яких феритів гексагональною кристалічною ґраткою. Випускають барієві ферити марок *БІ* (барієвий ізотропний) і *БА* (барієвий анізотропний).

Технологія виготовлення *БІ* така ж як і магнітом'яких феритів. *БА* виготовляють у вигляді шайб і дисків в орієнтованому магнітному полі з  $H = 650...800 \text{ кА/м}$ ,  $W_{max} = 12,4 \text{ кДж/м}^3$  при  $B_r = 0,38 \text{ Тл}$  і  $H_c = 240 \text{ кА/м}$ .

Фероксдюри відносно легкі, Їх питомий опір складає  $\rho = 10^4 \dots 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , тобто в  $10^6$  вище, ніж у відливних металів. До переваг фероксдюрів можна віднести і те, що вони в 10 раз дешевші відливних металів. Їх можна використовувати при високих частотах. Крім того, вони не бояться струсів і ударів.

Недоліки фероксдюрів: низька механічна міцність, крихкість, залежність магнітних властивостей від температури, незворотність змін властивостей при зниженні температури до  $-60^\circ\text{C}$  і наступному нагріванні до початкової.

*Кобальтові магніти* характеризуються більшою температурною стабільністю порівняно з барієвими, але мають високу вартість.

Магнітотверді ферити застосовуються в електродинамічних гучномовцях, мікродвигунах, вимірювальних приладах.

## СТАБІЛЬНІСТЬ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Однією з основних вимог до постійних магнітів є стабільність магнітного поля в проміжку як в часі, так і при дії різних зовнішніх факторів, таких як зовнішні магнітні поля, механічні навантаження, температура, радіація, зміна магнітного опору кола тощо. Інколи, навпаки, магнітна система повинна змінювати магнітне поле заданим чином при зміні якогось зовнішнього фактора, найчастіше температури. Таким чином, питання стабільності постійних магнітів є важливою їх характеристикою.

Нестабільність постійних магнітів може бути структурною і магнітною.

Структурна нестабільність зумовлена зі змінами кристалічної будови, фазовими перетвореннями, релаксацією внутрішніх напружень тощо. Зміни магнітного поля постійного магніту в результаті структурної нестабільності можуть сягати кількох відсотків за рік при нормальних умовах. Підвищення температури різко пришвидшує структурне старіння. Тому перед налаштуванням і експлуатацією магнітної системи магніти піддають штучному старінню. Наприклад, магніти з мартенситних сталей витримують при  $100^\circ\text{C}$  на протязі 10-15 год, що еквівалентно природньому старінню на протязі 10-15 років.

Магнітні властивості постійних магнітів, що змінилися внаслідок структурного старіння можна усунути тільки регенерацією структури, наприклад термообробкою матеріалу.

Магнітна нестабільність зумовлена зміною магнітної (доменної) структури матеріалу магніта, що намагається досягти стійкої термодинамічної рівноваги як в часі, так і при зміні зовнішніх умов. Магнітна нестабільність може бути зворотною і незворотною. Як зворотна, так і незворотна магнітна нестабільність залежать не тільки від властивостей матеріалу, але і від конструкції магнітної системи і умов її експлуатації (рис. 18.7).

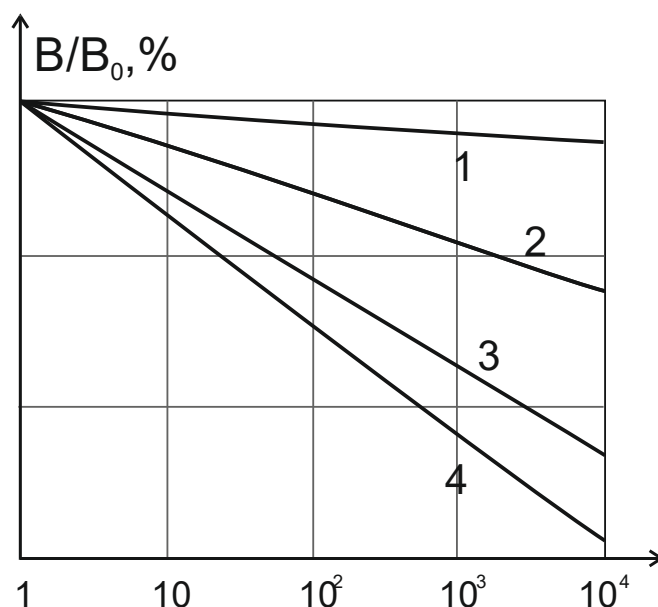


Рис. 18.7. Природне старіння магнітного сплаву ЮН14ДК24 при кімнатній температурі і різному навантаженні: 1 -  $B/H = 4,3 \cdot 10^6$  Гн/м; 3-  $B/H = 28 \cdot 10^6$  Гн/м; 5 -  $B/H = 16 \cdot 10^6$  Гн/м; 6 -  $B/H = 6 \cdot 10^6$  Гн/м;

Наведемо тнапруженості зовнішнього магнітного поля для намагнічування різних типів магнітотвердих матеріалів (табл 18.6).

Тип магнітотвердого матеріалу	Напруженість намагнічуючого поля, кА/м
Сталь, загартована на мартенсит	30 – 120
Сплави, що пластично деформуються	50 – 300
Дифузійно твердіючі сплави (ЮНДК)	240 – 560
Сплав платина-кобальт	1000 – 1800
Магнітотверді ферити	1000 – 1400
Сплави кобальта з рідкоземельними елементами	3000 – 10000
Композиційні матеріали	В залежності від матеріалу наповнювача

Незворотну магнітну нестабільність можна усунути повторним нагнічуванням постійного магніту.

Одним з основних методів магнітної стабілізації є часткове розмагнічування магніта. Зменшення індукції при розмагнічуванні залежить не тільки від напруженості розмагніуюого поля, але і від характеристик матеріалу і положення робоої точки.

Часткове розмагнічування зменшує незворотні зміни не тільки внаслідок дії зовнішніх магнітних полів, але і при зміні температури, магнітного опору кола, механічних навантажень у вигляді ударів і вібрацій тощо. Якщо до стабільності магніту висуваються більш жорсткі вимоги, то, крім часткового розмагнічування, магніти піддають додатковій стабілізації шляхом дії на магнітну систему у зібраному вигляді кількох температурних циклів і циклів навантаження в діапазоні, що дещо перевищує зміни цих факторів в процесі експлуатації. В результаті такої стабілізації зміни магнітної індукції магнітної системи зменшуються до сотих долей відсотка на рік. Крім того, зміни магнітної індукції стабілізованого магніта в деякому діапазоні змін зовнішніх умов будуть зворотними.

## Перелік рекомендованої літератури

1. Поплавко, Ю. М. Фізичне матеріалознавство [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 15,8 Кбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 838 с. – Назва з екрана. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/14029>
2. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство: підручник. – К.: «Видавництво Дельта», 2008. – 516 с.
3. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003. – 344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.
4. Електротехнічні матеріали: навч. посібн. / А.С. Головченко, Д.В. Циценков, А.А.Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» - Дніпро: НТУ «ДП», 2012. – 184 с.
5. Василенко І.І., Василенко Ю.І., Широков В.В. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник (рекомендовано МОН України) - Львів: «Магнолія-2006», 2018. – 242 с.
6. ДСТУ 2843–94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. (Діючий)
7. ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення. (Діючий)
8. ДСТУ 2725–94. Матеріали магнітні. Терміни та визначення. (Діючий)