

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет
Навчально-науковий Аерокосмічний інститут
Механіко-енергетичний факультет
Кафедра машинознавства

В.Ф. Лабунець

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Конспект лекцій

Київ – 2016

Курс лекцій містить необхідний навчальний матеріал, розрахований на студентів інженерних спеціальностей і призначений для науково-педагогічних, наукових та інженерно-технічних працівників у галузі технології електротехнічних матеріалів та суміжних спеціальностей, студентів та аспірантів технічних спеціальностей університетів.

Укладач: Лабунець В.Ф.

ЗМІСТ

Лекція №1. Предмет та структура навчальної дисципліни. Елементи теорії твердого тіла

Лекція №2. Основні фізико-хімічні властивості діелектриків.

Лекція №3. Електрична міцність діелектриків.

Лекція №4. Провідникові матеріали.

Лекція №5. Напівпровідники.

Лекція №6. Напівпровідникові матеріали

Лекція №7. Класифікація магнітних матеріалів.

Лекція №1. Предмет та структура навчальної дисципліни. Елементи теорії твердого тіла

Класифікація металів. Ефективність використання матеріалів залежить від факторів, що впливають на їх властивості. Більшість матеріалів, які використовуються в техніці, є металічними.

Метали, як тверді, та і рідкі мають ряд специфічних властивостей: металевий блиск, високі тепло та електро- провідність, непрозорість, висока відбивна здатність та підвищена здатність до пластичної деформації. В періодичній системі Д. І. Менделєєва метали складають більше 80%.

Як відомо, в першу чергу властивості кожного хімічного елемента визначається електронною будовою атому, а саме, по заповненню електронами зовнішніх електричних рівнів метали поділяють на дві групи:

— прості, в яких d- підрівень вільний від електронів (літій, кальцій, натрій, алюміній) або повністю заповнений електронами (мідь, кадмій, срібло, цинк);

— перехідні, в яких заповнення d- підрівня починається при частково заповненому s- підрівні наступного рівня. Це найважливіші метали, які використовують для утворення конструкційних матеріалів—залізо, нікель, кобальт, молібден, марганець, хром, ванадій, ніобій, титан, церій.

Кожний метал відрізняється від інших властивостями та будовою, але по ряду ознак їх можна об'єднати в два класи—чорні та кольорові метали.

До групи чорних металів належать:

— залізні метали – залізо, нікель, кобальт і до них близький за властивостями марганець;

— тугоплавкі метали – вольфрам, молібден та інші, що мають температуру плавлення вищу, ніж у заліза;

— уранові метали – актиніди, що використовуються в атомній енергетиці;

— рідкоземельні метали або лантаніди;

— лужноземельні метали.

До кольорових металів належать:

— легкі метали, що мають низьку питому густину, а саме: берилій, магній, алюміній;

— благородні метали – золото, срібло, мідь, платина і метали платинової групи;

— легкоплавкі метали – цинк, кадмій, олово, свинець та інші.

Будова твердого тіла. Кожна речовина має три агрегатних стани – твердий, рідкий і газоподібний.

В газах відсутня закономірність розташування атомів і молекул. Вони хаотично рухаються, відштовхуються одне від одного, намагаючись зайняти якомога більший об'єм.

В рідинах атоми і молекули зберігають лише ближній порядок, тобто в середовищі закономірно розташована невелика кількість часток. Ближній порядок нестійкий, він то виникає, то зникає під дією теплових коливань.

В твердих тілах існує дальній порядок розташування атомів і молекул, а саме визначений, закономірний, завдяки чому тверде тіло зберігає свою форму.

Кристалічними називають тіла, що мають правильне, закономірне розташування атомів і молекул в середовищі. Кристалічні тіла – це метали, сплави і деякі види кераміки та полімерів. На відміну від них аморфні тіла мають неупорядковане (хаотичне) розташування атомів і молекул. Такий стан мають скло, смоли, більшість полімерів. Аморфні речовини можна вважати дуже переохолодженими рідинами з високим коефіцієнтом в'язкості.

Різниця між кристалічними та аморфними речовинами виявляється в процесах плавлення та кристалізації. Кристалічні тіла мають строго визначену температуру плавлення, при цьому температура тіла, що нагрівається, не змінюється доки не розплавиться весь об'єм. Аморфні тіла в процесі нагрівання розм'якшуються поступово, в інтервалі температур, і не мають визначеної температури плавлення.

В свою чергу потрібно пам'ятати, що межа між кристалічним і аморфним станами дещо умовна. При надвисоких швидкостях охолодження з рідкого стану (коли не встигає відбутися утворення і зростання зародків кристалів) можна отримати аморфну будову в традиційно кристалічних металах і сплавах. Структурні зміни суттєво покращують властивості, наприклад, аморфні метали мають втричі більшу довговічність, ніж звичайні матеріали.

Типи міжатомних зв'язків. В твердих речовинах розрізняють чотири типи хімічних зв'язків між атомами: іонний, ковалентний, молекулярний та металевий.

Іонні кристали утворюються внаслідок електростатичної взаємодії іонів з протилежними зарядами.

Ковалентні кристали мають локалізований міжатомний зв'язок, утворений парами спільних електронів.

Молекулярний зв'язок утворюють сили Ван-дер-Ваальса, що виникають внаслідок миттєвої поляризації молекул.

Металевий зв'язок виникає в металах і сплавах завдяки усупільненню валентних електронів, що оточують закономірно розташовані в кристалі позитивно заряджені іони. Зв'язок здійснюють електростатичні сили тяжіння між іонами та усупільненими електронами провідності.

Сили зв'язку в металах визначаються кулонівськими силами відштовхування між іонами, електронами і силами тяжіння між іонами та електронами. Атоми розташовуються на такій відстані один від одного, при якій рівнодіюча цих сил дорівнює нулю, що відповідає рівноважному стану. Тому в металах атоми розташовані закономірно, утворюючи правильну кристалічну будову, що відповідає мінімальній енергії взаємодії атомів.

Кристалічна будова металів. Розуміння фізичних властивостей металів базується на особливостях їх кристалічної будови.

Закономірне розташування атомів в кристалі описує кристалічна

решітка, тобто трьохмірне, що періодично повторюється, розташування атомів в усьому об'ємі кристалу, рис. 1.1.

Найменший комплекс атомів, що багаторазово повторюючись в середовищі, утворює кристалічну решітку,

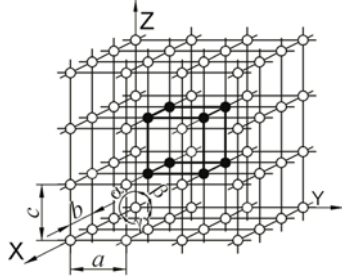


Рис. 1.1. Схема кристалічної решітки: в центрі – елементарна кристалічна комірка

називається елементарною кристалічною коміркою (рис. 1.1). Довжини ребер елементарної комірки називають параметрами або періодами решітки, вони позначаються буквами a , b , c і можуть бути однаковими або різними залежно від форми комірки. Куты між ребрами – α , β , γ – також є характеристиками елементарної комірки.

Різноманіття просторових решіток можна розділити на сім систем або сингоній в залежності від співвідношення між параметрами решітки і її кутами: триклинну, моноклінну, ромбічну, гексагональну, ромбоєдричну, тетрагональну і

кубічну.

Кристалічні решітки, в яких атоми розташовані тільки в верхівках, називаються простими (рис. 1.2 а). Решітки, в яких атоми розташовані в верхівках, всередині комірок і на їх гранях, називаються складними (мал. 1.2 б, в, г).

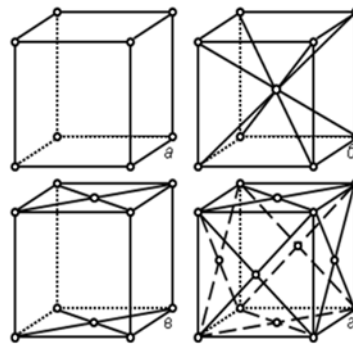


Рис. 1.2 Види кристалічних решіток: а – проста кубічна; б – об'ємноцентрована кубічна; в - базоцентрована кубічна; г – гранецентрована кубічна.

В існуючих кристалах розрізняють 14 типів елементарних кристалічних решіток. Найбільш поширені складні високо симетричні решітки з щільним упакуванням атомів: кубічна об'ємноцентрована (рис. 1.2 б), кубічна гранецентрована (рис. 1.2 г) і гексагональна (рис. 1.3).

Залізовуглецеві сплави. Основними конструкційними матеріалами в приладовому і електрообладнанні є залізовуглецеві сплави.

В системі залізо-вуглець знаходяться два сплаву: **сталь** і **чавун**. У більшості випадків застосування знаходиться сталь.

Сталь- це сплав заліза з вуглецем (менш 2,14%). Мінімальна кількість вуглецю знаходиться в чистому залозі, яке може перебувати в двох

модифікаціях- Fe_2 (об'ємноцентрована кубічна решітка), Fe_3 (гранецентрована кубічна решітка). Температура плавлення заліза- 1539°C . Вище, ніж температура 91°C існує Fe_3 , нижче- Fe_2 . При 768°C залізо відчуває магнітне перетворення; вище 768°C воно стає немагнітним.

Залізо з багатьма елементами утворює розчини: з металами - розчини заміщення, з вуглецем, азотом і воднем - розчини впровадження.

Твердий розчин вуглецю та інших елементів в 2-залізі називається **феритом**, а в 3-залізі - **аустенітом**.

Розчинність вуглецю в фериті мізерно мала (менше $0,02\%$) і в сто разів більше (до $2,1\%$) в 2-залізі. Залізо з вуглецем може утворювати хімічну сполуку, яка називається **цементит**, що має високу твердість і крихкість. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі пластичність її знижується, а міцність, твердість і крихкість - зростають.

В залежності від групи сталі маркуються літерами Ст, МСт, КСт, БСт, ВСт, за якими стоять цифри 0,1,2,3,4,5,6, що позначають десяті частки відсотка вуглецю. Наприклад, Ст3 містить $0,3\%$ вуглецю. Це, так звані мало- і середньовуглецеві сталі. Високовуглецеві сталі маркуються буквою У. Наприклад, У8, що містить $0,8\%$ С.

Леговані сталі. Для отримання необхідних фізико-механічних, електричних, магнітних та інших властивостей, у сталь вводять легуючі елементи. Ці сталі називаються **легованими** (іноді їх називають спеціальними).

Кожен легуючий елемент позначається буквою: Н – нікель, Х - хром; К - кобальт, М – молібден, Г – марганець, Д – мідь, Р – бор, Б – ніобій, Ц – цирконій, З – кремній, П – фосфор, Ч - рідкоземельні метали, В – вольфрам, Т – титан, А – азот, Ф-ванадій, К - алюміній.

Перші цифри в позначенні показують середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Цифри, що йдуть після букви, вказують на приблизний вміст даного легуючого елемента (при вмісті елемента менше 1% цифра відсутня, при вмісті близько 1% стоїть цифра 1, близько 2% - цифра 2 і т.д).

Для того, щоб показати, що в сталі присутній обмежений вміст сірки і фосфору ($\text{S} < 0,03\%$; $\text{P} < 0,03\%$), а також, що дотримані всі умови металургійного виробництва високоякісної сталі, в кінці позначення марки ставлять букву А.

Леговані сталі використовують в якості як конструкційних, так і магнітотвердих матеріалів.

До пружинних сталей відносяться наступні марки: 30ХГС, Ст35, Ст70, 65Г, 50С, 55С2, 55СГ, 60СГ і ін.

Серед корозійностійких сталей найбільшого поширення набули хромисті нержавіючі сталі (0Х13, 1Х13, 2Х13 і ін.) і хромонікелеві, що містять 18% Cr і 10% N (08Х18Н10, 08Х18Н10Т та ін.).

Лекція №2. Основні фізико-хімічні властивості діелектриків

Поляризація - це спрямоване, але обмежене зміщення зв'язаних зарядів в діелектрику під дією електричного поля. Ступінь поляризації

характеризує відносна діелектрична проникність, яка показує у скільки разів ємність конденсатора з діелектриком більша, ніж ємність конденсатора з вакуумом або повітрям в зазорі.

За типом зарядів розрізняють: електронну, іонну і дипольну поляризації.

Електронна поляризація — це пружне зміщення або деформація електронних оболонок відносно позитивно зарядженого ядра. Час встановлення електронної поляризації $10^{-14} \dots 10^{-15}$ с, тому її умовно вважають миттєвою. Електронна поляризація спостерігається у всіх видів діелектриків.

Іонна поляризація - це пружне зміщення різнойменно заряджених іонів щодо положення рівноваги. Час встановлення цієї поляризації складає $10^{-13} \dots 10^{-14}$ с. Вона спостерігається в іонних кристалах.

Дипольна поляризація — орієнтація диполів в зовнішньому полі. Час її встановлення $10^{-6} \dots 10^{-12}$ с. Дипольна поляризація спостерігається в твердих і рідких полярних діелектриках.

У твердих тілах неоднорідної структури спостерігається міграційна поляризація. Це накопичення зарядів на межі поділу нерівномірностей. Час встановлення цієї поляризації 10^{-3} с.

Поляризація може відбуватися з витратами енергії зовнішнього поля і без витрат.

Пружні види поляризації — електронні та іонна — відбувається без витрат енергії. Релаксаційні поляризації — дипольна і міграційна — відбуваються витратами енергії.

Поляризація діелектриків залежить від температури, частоти електричного поля, тиску, вологості.

Залежність діелектричної проникності діелектриків від температури показана на рис. 2.1, а.

Електронна поляризація діелектриків від температури практично не залежить, вона зменшується на фазових переходах через збільшення об'єму діелектрика, що призводить до зниження концентрації електронів.

Іонна поляризація діелектриків при нагріванні збільшується, так як хімічні зв'язки між іонами зменшуються, що викликає більший зсув іонів.

Дипольна поляризація з підвищенням температури спочатку, аналогічно іонній, збільшується, а потім зменшується, так як при подальшому підвищенні температури тепловий хаотичний рух диполів руйнує орієнтацію диполів, створену полем.

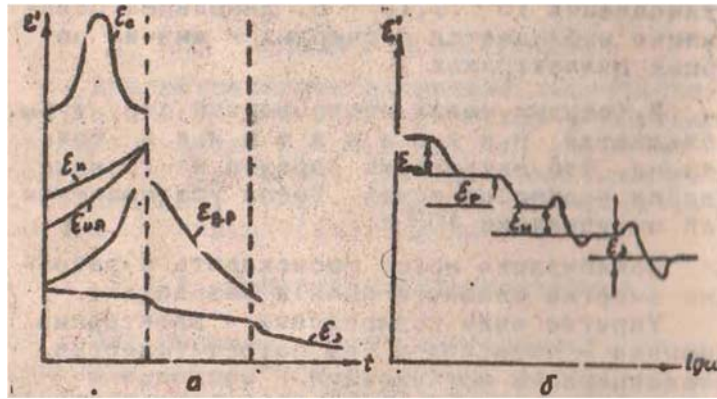


Рис. 2.1. Залежність діелектричної проникності від температури діелектрика (а) і частоти електричного поля (б): при електронній поляризації E_e ; при іонній — безгістеризній поляризації E_n ; при дипольній або іоннорелаксаційній поляризації $E_{др}$, $E_{п.р}$; при спонтанній поляризації E_c .

Кожен вид поляризації характеризується своїм часом встановлення поляризації, а змінне поле — величиною переходу його зміни. Залежність поляризації від частоти поля визначається співвідношенням часу встановлення поляризації та півперіодом зовнішнього поля.

Якщо час встановлення поляризації менший півперіоду, поляризація встигає встановитися, тобто не залежить від частоти. Якщо час встановлення поляризації більший її піврозпаду, поляризація не встигає відбутися, тому відсутня. Якщо час встановлення поляризації сумісно з півперіодом, відбуваються перехідні процеси, при яких поляризація або монотонно зменшується (міграційна, дипольна), або зменшується через резонанс (іонна, електронна).

З підвищенням тиску збільшується кількість частинок в обсязі матеріалу, тому поляризація збільшується.

Зі збільшенням вологості діелектрична провідність змочуваних діелектриків збільшується, так як діелектрична проникність води дорівнює 80.

Лекція №3. Електрична міцність діелектриків

Матеріали характеризуються електропровідністю. Електропровідність — властивість речовини проводити під дією електричного поля електричний струм. Електропровідність оцінюється такими параметрами як питома провідність і питомий електричний опір. До діелектриків відносяться матеріали зі значенням питомого опору більше $10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

В діелектриках під дією електричного поля виникає два струми: струм наскрізної провідності і струм абсорбції.

Наявність в технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів призводить до появи малих по величині наскрізних струмів.

Струми абсорбції обумовлені зміщенням пов'язаних зарядів, тобто поляризацією. При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрям, протікають тільки в моменти увімкнення і вимкнення напруги. При

зміннійчом напрузі вони мають місце протягом усього часу перебування матеріалу в електричному полі.

Повна щільність струму в діелектрику, яка називається струмом витоку, дорівнює сумі щільності струмів абсорбції і наскрізного. Після завершення процесів поляризації через діелектрик протікає тільки наскрізний струм. Провідність діелектрика при постійній напрузі визначається за наскрізним струмом. При змінній напрузі активна провідність визначається за наскрізним струму і за активними складними абсорбційних струмів.

Носіями заряду в діелектриках в основному є іони, так як енергія дисоціації — енергія, необхідна для розпаду молекули на іони, набагато менша, ніж енергія іонізації — енергія необхідна для відриву електрона від молекули.

Питома електропровідність пропорційна концентрації носіїв заряду і їх рухливості. Підвищення температури викликає збільшення концентрації вільних носіїв заряду і їх рухливість, тому з підвищенням температури електропровідність діелектриків зростає, а опір відповідно зменшується.

Наявність домішок в діелектрику збільшує кількість носіїв заряду, а отже, збільшує і провідність.

Для твердих електроізоляційних матеріалів необхідно розрізняти об'ємну і поверхневу провідність, для порівняльної оцінки яких користуються значеннями питомо-об'ємного і питомого поверхневого опору. Про провідність діелектрика судять за опором постійному струму. Струм витоку вимірюють через одну хвилину після ввімкнення напруги, щоб виключити вплив абсорбційних струмів.

Вплив вологості на електропровідність діелектриків визначається характером взаємодії матеріалу з полярними молекулами води. Вода є джерелом іонів і сприяє дисоціації домішок. Питома поверхнева електропровідність збільшується з підвищенням вологості у полярних діелектриків, поверхня яких змочується водою, а такі як у тих, на поверхні яких утворюється плівка електроліту. Підвищення питомої об'ємної електропровідності під впливом вологи спостерігається у пористих матеріалах, найбільш помітно — у діелектриків, що містять розчинні у воді домішки.

Електропровідність рідких неполярних діелектриків обумовлена дисоціацією домішкових молекул. Тому очищені від домішок неполярні рідини мають низьку провідність. Електропровідність рідких полярних діелектриків обумовлена дисоціацією власних молекул, тому їх електропровідність більше, ніж у неполярних.

Зростання діелектричної проникності призводить до зростання провідності. Тому високополярні рідини розглядаються як провідники з іонною провідністю.

Електропровідність газоподібних діелектриків обумовлена процесами іонізації газу під дією зовнішніх іонізуючих факторів (випромінювання, термічний вплив) або електричного Поля (область сильних полів).

Лекція №4. Провідникові матеріали.

Класифікації провідникових матеріалів. До металів високих провідностей відносяться мідь, алюміній, золото, срібло, платину, нікель.

Мідь з питомою Опором $0,017 \text{ мк ом*м}$ має високу пластичність, достаточну міцність, корозійну стійкість відносно легкої пайки і зварювання. Виготовляється 5-ти видів: М1, М0, М00, ММ, МТ. Окрім чистої міді, використовують її сплави - бронза і латунь, з високими механічними властивостями при достатній провідності. Бронзи використовують в струмопровідних пружинах, контактах, мембранах і в багатьох інших електротехнічних виробках.

Алюміній (удільний опір 0.0028 мк ом*м) має високу корозійну стійкість, малу платність, але низьку механічну міцність, випускається декількох марок (в залежності від степені очищення), використовується в виробництві фольги, кабелів, електролітичних конденсаторів.

Золото, срібло і платина - благородні метали, стійкі до корозії, технологічні. Золото використовують в мікросхемах, контактах, покриттях. Срібло використовують для того самого тільки ще й в приладах для ВЧ і СВЧ. Платина використовується в термopарах, термометрах опору, контактах.

Нікель – матеріал анодів, теплових екранів і електровакуумної техніки.

Матеріали контактів. В зв'язку з характером роботи контакти можуть бути нерухомими і рухливими, а останні - роз'ємними і легкими. Матеріали контактів повинні бути зносостійкими, корозійностійкими, технологічними і створювати малий перехідний опір.

Нерухомі контакти бувають затискні ("клеми", болтові з'єднання) і суцільнометалеві (зварні, спаяні). При пайку використовують припої і флюси. За температури плавлення розрізняють м'які (до 400 C) і тверді (вище 500 C) припої. М'які припої олов'яно-свинцеві сполуки (ПОС), тверді - мідно-цинкові (ПМЦ). Флюси використовують перед пайкою для очищення поверхонь і поліпшення їх змочуваності припоєм. Основні флюси! при пайку м'якими припоями - каніфоль, твердими - бура, борна кислота.

Ковзаючі контакти (реостати,потенціометр) виконують з холоднотягнутої міді марки МТ, берилієвою і кадмієвою бронз, керамічного сплава срібла з оксидом кадмія.

Розривні контакти бувають малопотужні (до 100 Вт) і потужні. Для перших застосовують сплави благородних металів - платина з осмієм, іридію, а також міді з золотом, міді з сріблом. Інші виконують з металокерамічних матеріалів - мідь-вольфрам, мідь-молібден, мідь-графіт, срібло-нікель.

Матеріали термopар. У термopарах знайшли застосування провідники з високим значенням коефіцієнта термоЕРС. Це сплави: копель, (мідь-нікель), алюмель (нікель, алюміній і інші елементи), хромель (хром-нікель), платино-родій. Для вимірювання температури широко застосовують такі термopари: хромель-алюмель до 1000 градусів , вольфрам-вольфрамрений від 1000 до 2500 C , платина-платинородій до 1600 C - еталонна термopара для

градування інших, залізо-золото - для криогенних температур.

Сплави високого опору. Резистивні сплави повинні мати високий питомий опір, малий коефіцієнт термоЕРС, малий температурний коефіцієнт питомої опору. Цим вимогам задовольняють манганин (мідь-нікель-мз.ргансц) для про зразкових резисторів і вимірювальних приладів; радіоманганін (з підвищенниг утриманні їм марганцю) для елементів ланцюгів, констант (мідь-нікель) для реостатів і електронагрівальних елементів. Пускові і регулювальні реостати виготовляють з нікеліна (мідь-нікель-марганець) і нейзильберу (мідь-нікель-цинк). Тяжконагружені реостати та нагрівальні елементи виконують з ніхрому (нікель-хром), ферроніхрому (з підвишеним змістом заліза), фехралі (залізо-хром-алюміній).

Матеріали мікросхем. У мікросхемах з провідникових матеріалів виконують струмопровідні і резистивні плівкові елементи. Для струмоведучих елементів застосовують плівки золо та, алюмінію, платини, нікелю. Срібло не застосовують, так як воно має малий атомний радіус, легко проникає в підкладку і замикає схему. Резистивні плівки виконують з титану, танталу, хрому, ренію, ніхрому, деяких сплавів, що містять кремній, а також з керметів. Кермети - металодіелектричні композиції з неорганічним сполучником - хром монооксид кремнію, срібло, паладій - скло.

Контактоли використовують для створення контакту між металами, металом і провідником. Це пасти з синтетичних смол з струмопровідним наповнювачем з мілкодисперсних порошків срібла, золота, паладію, нікелю.

Матеріали електровакуумної техніки - сплави заліза з нікелем, так звані інварні сплави, мають малий температурним коефіцієнт лінійного розширення. Окрім інвара, застосовують суперінвар, ковар і платиніт, добре зварюваний і спаювальний зі склом.

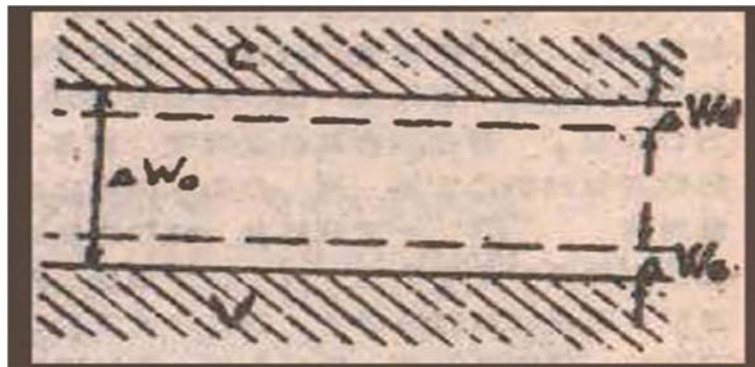
Лекція №5. Напівпровідники.

Напівпровідникові матеріали. До класу напівпровідникових матеріалів належить ряд хімічних елементів, які знаходяться в другій (берилій), третій (бор, галій, індій), четвертій (вуглець, кремній, германій, олово), п'ятій (фосфор, миш'як, сурма), шостій (сірка, селен, телур) і сьомій (хлор, бром і йод) групах періодичної таблиці елементів Д. І. Менделєєва. Крім них до напівпровідників відносяться всі оксиди металів, сульфіді, а також деякі органічні речовини. Питомий електроопір займає проміжне становище між діелектриками і провідниками. Те ж характерно і для інших властивостей напівпровідникових матеріалів. Їх особливість - наявність двох типів провідності.

Електропровідність напівпровідників. У власному (без домішок) полупровіднику електрон, якому повідомлена енергія, рівна або більша, ніж енергія забороненої ЗОНИ, переходить із валентної ЗОНИ в зону провідності і здійснює в ній електронну або p - типу провідність. У Валентній зоні утворюється порожнє місце - дірка і його відразу займає електрон сусіднього атома, залишаючи після себе дірку. Процес повториться і в результаті

виникне протилежно спрямований рух електронів і дірок. Характер руху електронів в валентній зоні відрізняється від його руху в зоні провідності, тому що створюється і..і провідність домовилися називати дирочною або Р-типу.

Домішки в напівпровіднику. Тип провідності визначають домішки. Донорні домішки або просто донорні елементи з валентністю вище, ніж у основного матеріала створюють електронну провідність, акцепторні домішки (акцептори) - елементи з валентністю нижче, ніж у основного матеріалу - діркову провідність. Причому додаткові енергетичні рівні донорної домішки розташовані на дні зони провідності, а акцепторної домішки - у стелі валентної зони (рис. 5.1).



Мал. 5.1. Елементарна зонна структура напівпровідника

Вплив температури на електропровідність напівпровідників. Особливістю напівпровідників є висока чутливість до зовнішніх впливів - температури, освітленості, електричного і магнітного полів. Залежність провідності напівпровідників від температури пояснюється зміною концентрації і рухливості носіїв заряду при нагріванні; вона має експонентний характер. При нагріванні до невисоких температур провідність зростає за рахунок іонізації молекул домішок, при високих температурах - за рахунок іонізації молекул основного матеріалу. Властивість напівпровідників змінювати провідність при нагріванні покладено в основу роботи терморезисторів і болометрів. Для виготовлення терморезисторів використовують суміші оксидів, сульфідів, нітридів, карбідів. Терморезистор застосовують для вимірювання температури, температурних компенсацій, стабілізації напруги.

Вплив освітленості на електропровідність напівпровідників. Провідність напівпровідників можна збудити не тільки нагріванням, а й освітленням. Для цього необхідно, щоб енергетична кванта світла дорівнювала або більше енергії забороненої зони або енергії іонізації домішок. Під дією світла в напівпровіднику виникає додаткова провідність – фотопровідність, і струм - фотострум. Напівпровідникові прилади, що працюють на цьому явищі, називаються фоторезисторами. Їх застосовують у багатьох схемах автоматики. Матеріали фоторезисторів - з'єднання металів сіри, сурьми і телуrom, так звані хелькогеніди. Існує залежність між довжиною хвиль світла

і енергією забороненої зони у підлозі провідника. У довгохвильовій частині спектра працюють напівпровідники з малою енергією забороненої зони і навпаки в короткохвильовій - з великою енергією забороненої зони .

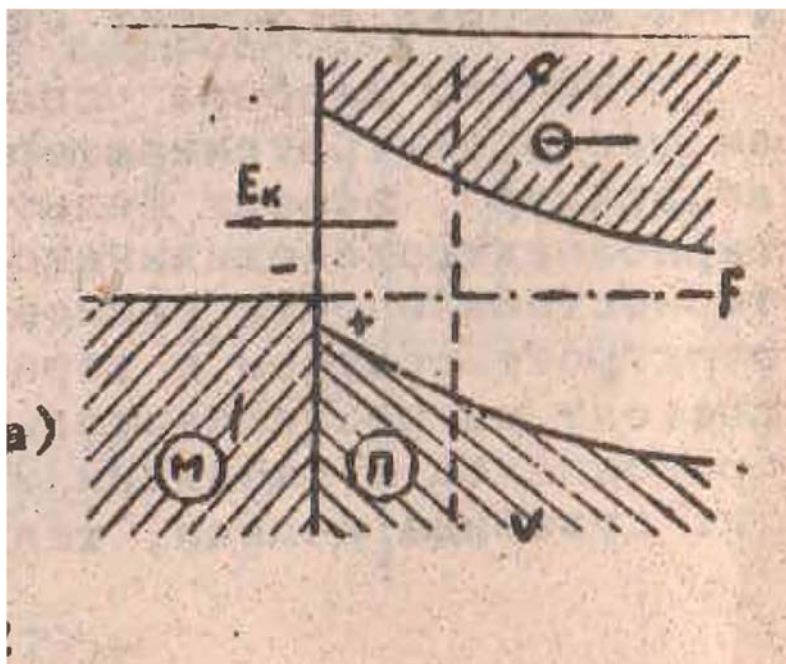
Варистори застосовують в контактах, для захисту малопотужної і низьковольтної апаратури від перевантажень, для посилення чутливості приладів.

Ефект Холла. Пояснення залежності провідності напівпровідників від напруженості зовнішнього магнітного поля дає ефект Холла. Прилади, робота яких заснована на цьому ефекті, називаються датчиками Холла. Їх використовують для вимірювання і перетворення струму, вимірювання напруженості магнітного поля, модуляції сигналів. Основні матеріали датчиків - арсенід галію, германій, арсенід індію, антимонід індію, фосфід індію і антимоніди - з'єднані з сурмою, фосфіди - з фосфором).

Контактні явища, р-п-переходи. Особливий інтерес представляють собою властивості контактів напівпровідників з діелектриками, металами та один з одним. При поясненні контактних явищ оперують поняттями "рівень Фермі" і "робота виходу електрона".

Рівень Фермі металів - це вищий "рівень", повністю заповнений електронами при абсолютному нулі, рівень Фермі напівпровідників - рівень з вірогідністю заповнення електронами 1/2 при тих же умовах. Положення рівня Фермі напівпровідників залежить від температури і концентрації носіїв заряду.

Робота виходу електрона - енергія, необхідна для видалення електрона з рівня Фермі, у вільний стан. Різна робота виходу електрона є причиною виникнення різниці потенціалів на контакті двох матеріалів. У приконтактній області, метало напівпровідників в залежності від співвідношення робіт виходу електрона обох матеріалів і типу провідності напівпровідника, можуть виникати запірний шар (з високим опором), тобто будівник контакт (рис.5.2) і анти запірний шар (з малим опором). оскільки не випрямляючий контакт.



Мал. 5.2. Творення випрямляючого контакту на кордоні метало напівпровідника n-типу, робота виходу електрона з металу більше, ніж напівпровідника; E_k контактна різниця потенціалів

Електронно-дірковий перехід в приконтактній області напівпровідників з різним типом провідності має ємність і опір, якими можна управляти над зовнішнім полем. Це явище називають вентиляним ефектом і використовують в напівпровідникових випрямлячах, які виготовляють із селену, діоксиду титану, германію, кремнію і т.д.

Під впливом світла на електронно-дірковий перехід (вентильний фотоефект) можна перетворювати світлову енергію в електричну. Прилади, засновані на цьому явищі, називаються вентиляними фотоелементами або фотодіодами (окремий випадок фотоелементу - сонячна батарея). В даний час їх роблять з арсеніду галію з ККД 23%.

Лекція №6. Напівпровідникові матеріали.

Деякі напівпровідникові матеріали. Германій - енергія забороненої зони 0,68 еВ, застосовують для виготовлення різних діодів, транзисторів, тиристорів, фотодіодів. Діапазон робочих температур цих приладів від мінус 60 до плюс 80. С.

Кремній - енергія забороненої зони 1,12 еВ, застосовують для виготовлення діодів, транзисторів, тиристорів, фотодіодів, датчиків Холла, інтегральних схем. Верхня межа робочих температур приладів на кремній - плюс 200 С.

Арсенід галлія - найбільш перспективний матеріал з енергією забороненої зони 1,4 еВ, застосовується майже у всіх напівпровідникових приладах з широким діапазоном робочих температур (до 400 С) і частот (1011 Гц).

Напівпровідники складають велику область матеріалів, що відрізняються один від одного великим різноманіттям електричних і фізичних властивостей, а також великим різноманіттям хімічного складу, що і визначає різні призначення при їх технічному використанні.

За хімічною природою Сучасні Напівпровідникові матеріали можна розділити на наступні Чотири основні групи:

Кристалічні Напівпровідникові матеріали, побудовані з атомів або молекул однієї елемента.

Такими матеріалами є широко використувані в Данії годину германій, кремній, селен, бор, карбід кремнію та ін

Окисні кристалічні Напівпровідникові матеріали, тоб матеріали з окислів металів.

Головні з них: закис міді, окис цинку, окис кадмію, двоокис титану, окис нікелю та ін У Цю ж групу входять матеріали, що виготовляють на Основі титанаті барію, стронцію, цинку, та Інші неорганічні Сполука з різними малімі добавками.

Кристалічні Напівпровідникові матеріали на Основі Сполука атомів третьої и п'ятої груп системи ЕЛЕМЕНТІВ Менделєєва .

Приклада таких матеріалів є антимоніди індію, галію і алюмінію, тобто сполуки сурми з індієм, галієм і алюмінієм.

Смороду здобули найменування інтерметалічних сполук.

Кристалічні напівпровідникові матеріали на основі сполук сірки, селену і телуру з одного боку і міді, кадмію та свинцю з іншого.

Такі сполуки називаються відповідно: сульфідами, селеніди і телуриду.

Всі напівпровідникові матеріали, як уже говорилося, можуть бути розподілені по кристалічній структурі на дві групи.

Одні матеріали виготовляють у вигляді великих одиночних кристалів (монокристалів), з яких вірізають за П'єв'єв кристалічними напрямками різні розміри для використання їх у випрямлячах, підсилювачах, фотоелементах.

Такі матеріали складають групу монокристалічних напівпровідників.

Найбільш поширеними монокристалічними матеріалами є германій і кремній.

Розроблені методи виготовлення монокристалів та з карбідів кремнію, монокристалів з інтерметалічних сполук.

Інші напівпровідникові матеріали являються собою суміш безлічі малих кристаликів, безладно спаяні один з одним.

Такі матеріали називаються полікристалічними.

ПРЕДСТАВНИК полікристалічних напівпровідникових матеріалів є селен і карбід кремнію, а також матеріали, що виготовляють з різних окислів методами керамічної технології.

Розглянемо широко вживані напівпровідникові матеріали.

Германій - елемент четвертої групи періодичної системи ЕЛЕМЕНТІВ Менделєєва.

Германій має яскраве-сріблястий колір.

Температура плавлення германію 937,2 °С. У природі він зустрічається часто, але в дуже малих кількостях.

Присутність германію виявлено у цинкових рудах і в золах різних вугілля.

Основним джерелом отримання германію є зола вугілля і відходи металургійних заводів.

Лекція №7. Класифікація магнітних матеріалів.

Рух електрона навколо ядра утворює орбітальний магнітний момент, а в результаті обертання електрона навколо власної осі - спіновий магнітний момент. Результуючий магнітний момент атома - векторна сума спінових моментів всіх електронів. Магнітні властивості матеріалу характеризує величина сумарного магнітного моменту всіх атомів в одиниці обсягу - намагніченість (I), в слабких полях пропорційна напруженості зовнішнього магнітного поля (H): $I = \chi H$, де χ - магнітна сприйнятливість.

За величиною і знаком магнітної сприйнятливості всі матеріали

поділяються на діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, феримагнетики і антиферомагнетики.

У діамагнетиків (золото, срібло, мідь, цинк, кремній, германій та ін.) магнітна сприйнятливість дуже мала (-10), нижче нуля і не залежить від температури.

У парамагнетиків (алюміній, платина, кисень, лужні метали) магнітна сприйнятливість близько $10 \dots 100$, більше нуля, і слабо залежить від температури.

У феромагнетиків магнітна сприйнятливість досягає великих значень (тисяч і мільйонів) більше нуля, і має складну залежність від температури. До них відносяться залізо, кобальт, нікель, деякі рідкоземельні елементи, наприклад, гадоліній.

Антиферомагнетики в своїй структурі мають дві підґратки, магнітні моменти яких антипаралельні та є рівними, тобто сумарний магнітний момент дорівнює нулю. До антиферомагнетиків належать оксиди металів - нікелю, марганцю та ін.

Феримагнетики також мають підґратки, магнітні моменти антипаралельні і не рівні, оскільки сумарний магнітний момент відмінний від нуля. Це характерно для сплаву оксиду заліза з оксидами інших металів (феритів).

Причини феромагнетизму:

- у феромагнетиках передостання електронна і оболонка не повністю заповнена електронами і спінові магнітні моменти в ній не скомпоновані;

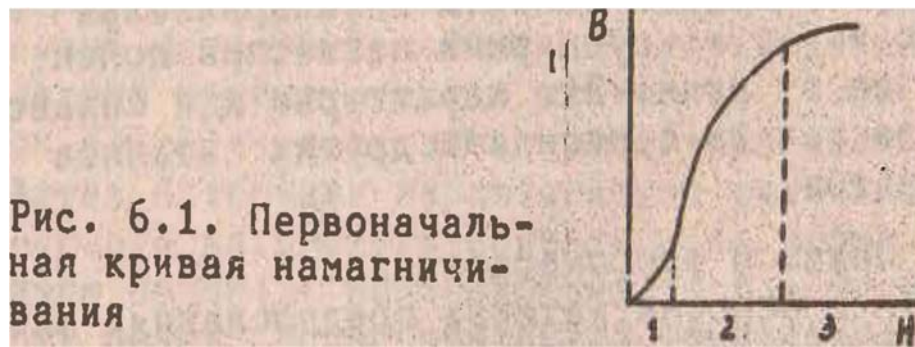
- Завдяки малій міжатомній відстані виникає велика енергія обмінної взаємодії, спінові моменти сусідніх атомів шикуються в одному

напрямку, утворюючи області однакової намагніченості - домени. Доменна структура утворює замкнутий магнітний ланцюг в матеріалі, тому сумарний момент дорівнює нулю. Доменна структура зберігається в феромагнетик до певної температури - точки Кюрі. Вище точки Кюрі феромагнетик перетворюється в парамагнетик.

У кристалічній решітці феромагнетиків існують напрямки легкої і важкої намагніченості. Різниця енергій важкої і легкої намагніченості називається енергією магнітної анізотропії.

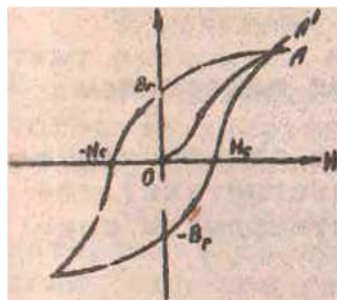
Здатність деяких магнітних матеріалів змінювати лінійні розміри під дією зовнішнього магнітного поля називається магнітострикцією.

Основна крива намагнічування. Процес намагнічування матеріалу описує крива намагніченості - залежність індукції (β) від напруженості поля (H) (рис. 6.1). У дуже слабких полях (до $0,08 \text{ A / m}$) індукція зростає лінійно при збільшенні напруженості.



Мал. 6.1. Крива намагнічування

В матеріалі орієнтуються і ростуть домени, магнітний момент яких становить найменший кут з напрямком напруженості зовнішнього поля. Цей процес зворотній, йде без витрат енергії. У середніх полях (приблизно до 800 A / м) індукція зростає нелінійно. Відбувається орієнтація інших доменів і інтенсивне зростання тих, магнітний момент яких збігається з напрямком зовнішнього поля за рахунок ломки стінок сусідніх доменів. Процес незворотній, оскільки мають місце втрати енергії. У сильних полях з напруженістю вище 800 A / м відбувається остаточна орієнтація доменів і настає насичення. В середині доменів окремі спінові моменти можуть мати протилежні напрямки. У сильних полях відбувається їх орієнтація, що називається парапроцес. Якщо після намагнічування до насичення (B_s) зменшувати напруженість поля, матеріал частково збереже намагніченість, так як при тому ж значенні напруженості індукція повинна бути вище. Це явище називається магнітним гістерезисом. В процесі розмагнічування при нульовому значенні напруженості поля в матеріалі зберігається індукція, яка називається залишковою (B_r). Щоб її прибрати, змінюють напрямок зовнішнього поля. Напруженість магнітного поля, необхідна для повного розмагнічування, називається коерцитивною силою (H_c). Продовжуючи намагнічувати матеріал в зворотному напрямку, отримують індукцію насичення зворотного знаку ($-B_s$), зменшуючи напруженість поля до нуля, отримують залишкову індукцію ($-B_r$), прибрати яку можна полем з напруженістю $+H_c$. При подальшому збільшенні напруженості крива опише петлю, яка називається петлею магнітного гістерезису (мал. 6.2). Площа петлі гістерезису пропорційна втрат енергії в магнітному полі.



Мал. 6.2. Петля гістерезису, отримана при одному циклі намагнічування

Втрати енергії в магнітних матеріалах. Слід розрізнити втрати енергії в постійному і змінному полях. У постійному полі енергія витрачається на ріст і поворот доменів, і називається втратами на гістерезис. При намагнічуванні в змінному полі, крім втрат на гістерезис виникають втрати на вихрові струми, на наслідки (магнітну в'язкість) і резонанс. У змінному полі втрати на гістерезис зростають пропорційно до частоти, а втрати на вихрові струми - квадрату частоти. Втрати на наслідки аналітичного розрахунку не піддаються, їх визначають як різницю між загальними втратами і сумою втрат на гістерезис і вихрові струми. Резонансні втрати мають місце при збігах частоти зовнішнього поля з однією із власних частот обертально-коливального руху частинок матеріалу.

Класифікація магнітних матеріалів. За властивостями і застосуванням сильномагнітні матеріали (феро і феримагнетики) діляться на магнітом'які, магнітотверді і спеціального призначення.

Магнітом'які матеріали. Магнітом'які феромагнетики характеризуються вузькою і високою петлею гістерезису з коєтивною силою в межах 0,08 ... 800 А / м. Їх застосовують в різних магнітопровідниках. До них належать наступні групи матеріалів.

Магнітом'які матеріали для роботи в постійних і низькочастотних полях. Технічно чисте залізо, електролітичне залізо, карбональна залізо, електротехнічна сталь, залізокобальтовий сплав - Пермендюр. Електротехнічні сталі - залізокремнієві сплави. Особливий інтерес представляють текстурні сталі після холодної прокатки. Вони мають підвищені механічні властивості вздовж напрямку прокатки. Пермендюр має найвищу індукцією насичення 2,45 Тл і застосовується в деталях магнітних осцилографів, генераторах двигунів літаків.

У слабких полях працюють матеріали з Галой енергією намагнічування - це залізонікелеві сплави - пермалої. Їх застосовують для виготовлення сердечників малогабаритних трансформаторів, реле, магнітних підсилювачів. Дешевим замінником пермалоїв є альсифер - сплави заліза з алюмінієм і кремнієм.

В умовах високочастотних полів працюють матеріали з високою і стабільною початковою магнітною проникністю і малими втратами енергії. Такими властивостями володіють магнітодіелектрики і ферити.

Магнітодіелектрики - композиційні матеріали, що складаються з магнітного наповнювача (порошку карбонільного заліза, пермалою або альсифера) і діелектричної зв'язки (полістиролу, фторпласта-4).

Ферити - системи з оксидів заліза і оксидів дво- або одновалентних металів є носіями не тільки магнітних, але і діелектричних і напівпровідникових властивостей, як напівпровідники вони дають електронну і діркову провідність, як діелектрики - високий питомий опір. Однак провідність феритів зростає з ростом частоти, так як в них з'являються діелектричні струми - струм зміщення і струм абсорбції. Наша промисловість випускає три основні види магнітом'яких феритів: нікель-цинковий, марганець-цинковий і літій-цинковий.

СВЧ застосовують ферити-гранати на основі оксидів рідкісноземельних елементів.

Магнітотверді матеріали. Магнітотверді матеріали намагнічуються і важко розмагнічуються, тому їх застосовують в постійних магнітах, для запису до зберігання звуку і зображення. Для них характерна широка петля гістерезису, коерцитивна сила більше 4000 А/м. Постійні магніти працюють при наявності розмагнічуючого поля зазору і їх специфічна характеристика - енергія, що виділяється в зазор (W). Вона дорівнює половині добутку індукції на напруженість. Робочій точці постійного магніту відповідає максимальна енергія, що виділяється в зазор.

До магнітотвердих належать наступні матеріали:

- мартенситна сталь (застосовується рідко в пристроях, де маса і габарити не є істотними);

- ливарні сплави системи алюміній-нікель— залізо (альні), з добавкою міді та кобальту (альніко). Сплав альніко після термічної обробки і отримав назву магніко і дозволяє зменшити масу і габарити постійного магніту в чотири - п'ять разів;

- пластичні сплави - куніфе (мідь-нікель-залізо), куніко (мідь-нікель-кобальт), вікалой (ванадій-кобальт-залізо) застосовують для виготовлення магнітної дроту, стрічок, записи, малогабаритних магнітів складної конфігурації;

- висококоерцитивні сплави залізо - платина, кобальт-платина, вісмут-марганець використовують в мініатюрних постійних магнітах.

Магнітотверді ферити - ферити барію в залежності від технології виробництва можуть бути ізотропними (ФБІ) та анізотропними (ФБА). Ферити з великою анізотропією властивостей називають феросплавами. Ферит барію застосовують для виготовлення еластичних магнітол - ферроеластів для листів магнітної пам'яті ЕОМ, для відхиляючих систем в телевізорах.

Спеціальні магнітні матеріали. Спеціальні магнітні матеріали мають посилені або особливими властивостями. До них належать матеріали з прямокутною петлею гістерезису (магній-марганцеві ферити, пермалоеві стрічки) для вироблення запам'ятовуючих пристроїв ЕОМ; термомагнітні сплави з різкою залежністю індукції насичення від температури (компенсатори зі сплаву залізо - нікель-хром) для виробництва магнітних шунтів; магнітострикційні матеріали (нікель, нікель-кобальтовий ферит, нікель-цинковий ферит, пермендюр, альфер - сплав алюмінію із залізом) для магнітомеханічних перетворювачів; матеріали з постійною магнітною проникністю (перминвар - сплав заліза з нікелем і кобальтом, ізоперм - сплав заліза з нікелем, міддю і алюмінієм) для вимірювальних приладів; матеріал з високою індукцією насичення - пермендюр, що використовується для виготовлення мембран телефонів.