

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

В.Ф. Лабунець

АВІАМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

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 конструкційних матеріалів, авіаматеріалознавства та суміжних спеціальностей, студентів та аспірантів технічних спеціальностей університетів.

Укладач: Лабунець В.Ф.

ЗМІСТ

Лекція №1. Будова твердого тіла.

Лекція №2. Поняття про сплав та термічна обробка сталей.

Лекція №3. Конструкційні леговані сталі.

Лекція №4. Композиційні та інтелектуальні матеріали.

Лекція №5. Поляризація діелектриків.

Лекція №6. Електропровідність діелектриків.

Лекція №7. Втрати енергії в діелектриках.

Лекція №8. Класифікація діелектриків.

Лекція №9. Провідникові матеріали.

Лекція №10. Явище надпровідності.

Лекція №11. Фізика провідності напівпровідників.

Лекція №12. Контактні явища в напівпровідниках.

Лекція №13. Напівпровідникові матеріали та прилади.

Лекція №14. Магнітні матеріали. Елементи теорії магнетизму.

Лекція №15. Класифікація магнітних матеріалів.

Лекція №1. 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,

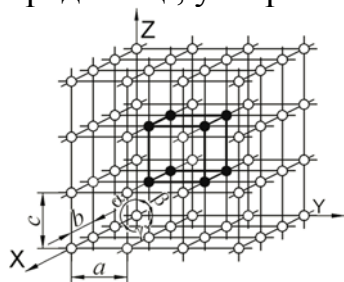


Рис. 1.1. Схема кристалічної решітки: в центрі – елементарна кристалічна комірка

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. Кути 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, ромбоедричну, 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).

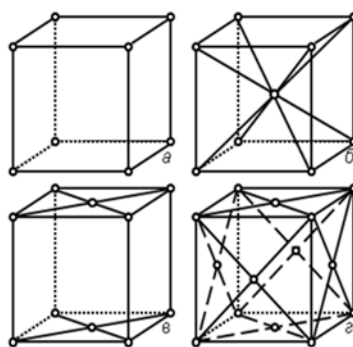


Рис. 1.2 Види кристалічних решіток: а – проста кубічна; б – об'ємноцентрована кубічна; в - базоцентрована кубічна; г – гранецентрована кубічна.

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).

Лекція №2. Поняття про сплав та термічна обробка сталей.

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- Fe₂ (об'ємноцентрована кубічна решітка), Fe₃ (гранецентрована кубічна решітка). Температура плавлення заліза- 1539 °С. Вище, ніж температура 91 °С існує Fe₃, нижче- Fe₂. При 768 °С залізо відчуває магнітне перетворення; вище 768 °С 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 залежно 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.

Термічна обробка – це технологічний процес, що складається з нагрівання, витримування та охолодження металів з метою надати їм потрібну структуру і, відповідно, потрібні механічні та фізичні властивості. Термічна обробка є найбільш універсальним та розповсюдженим методом зміни властивостей який призначають як проміжну операцію для поліпшення технологічності заготовок в процесі їх виробництва, і як кінцеву – для надання виробам комплексу властивостей, що забезпечує їх довговічність, зносостійкість та надійність в експлуатації.

Більшість режимів термічної обробки пов'язані з фазовими перетвореннями при нагріванні та охолодженні залізовуглецевих сплавів.

Основні фазові перетворення в сталях:

- перетворення ферито-ементітної структури в аустеніт при нагріванні;
- ізотермічне перетворення переохолодженого аустеніту;
- термокінетичне перетворення переохолодженого аустеніту;

– перетворення мартенситу та залишкового аустеніту при нагріванні (відпуск сталі).

Внутрішня будову металів і сплавів змінюється з температурою. На цьому заснований процес термічної обробки. Таким чином, **термічна обробка** - це процес зміни структури і властивостей металів і сплавів шляхом нагрівання і охолодження без зміни хімічного складу. Основні фактори впливу при термічній обробці температура t і час τ , тому режим будь-якої термічної обробки можна представити графіком в координатах t і τ (рис. 11).

Режим термічної обробки характеризують такі параметри: температура нагріву t , час витримки сплаву при температурі нагріву $\tau_{\text{внт}}$, швидкість нагріву $V_{\text{наг}}$ та швидкість охолодження $V_{\text{охол}}$.

Залежно від температури нагрівання і швидкості охолодження термічна обробка підрозділяється на наступні види: гартування, відпалювання, відпуск, нормалізація, рекристалізація, старіння, термомеханічна обробка, поверхнєве гартування струмами високої частоти, лазерний гарт та ін.

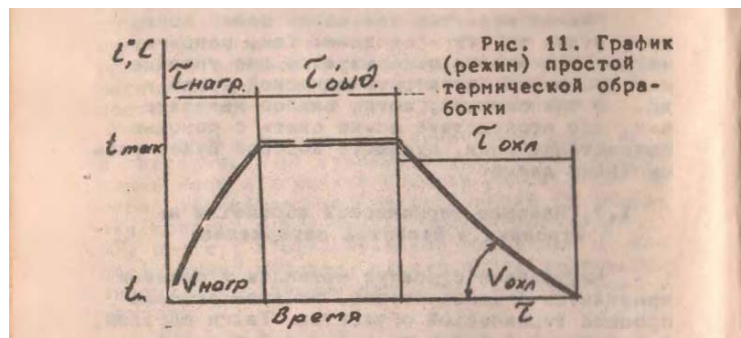


Рис. 2.1. Графік (режим) простої термічної обробки

При термічній обробці металів і сплавів змінюються склад і кількісне співвідношення фаз, тип кристалічних модифікацій, щільність дислокацій, вакансій та інших показників, а отже, механічні, електричні, магнітні властивості і т.д.

У напівпровідниках завдяки термічній обробці можна змінювати тип провідності, концентрацію, час життя і рухливість носіїв зарядів.

Гартування- це термічна операція, яка полягає в нагріванні сплаву вище температури перетворення з наступним досить швидким охолодженням для отримання структурно нестійкого стану сплаву. Після гарту підвищуються межі міцності і твердості матеріалу, змінюються й інші властивості. Гартуванню піддають сталь, бронзу, латунь, алюмінієві та інші сплави, напівпровідникові матеріали.

При гартуванні сталі в залежності від швидкості охолодження утворюються мартенсит або тростит. **Мартенсит** - це пересичений твердий розчин вуглецю, а **тростит** - заліза. Він відрізняється високою твердістю і низькою магнітною проникністю.

Гартування сприяє зміні зерна, а отже, збільшення електричного опору, коерцитивної сили, при цьому магнітна проникність зменшується. Процесу гартування супроводжується відпуск.

Відпуск- термічна операція, яка полягає у нагріванні загартованого сплаву нижче температури перетворення для отримання більш стійкого структурного стану сплаву. Залежно від температури нагрівання відпуск буває низький, середній і високий. При низькому відпуску частково знімається внутрішня напруга загартованих сплавів, але їх структура не змінюється; при середньому і високому відпуску змінюється структура і частково (при середньому) або повністю (при високому) знімається внутрішня напруга.

Відпущені сталі мають більш високі значення магнітної індукції і магнітної проникності, ніж загартовані, але менші значення коерцитивної сили.

Для отримання однорідної рівноважної структури сплави піддають відпалюванню. **Відпалювання** - термічна операція, процес нагріву метала, що має нестійкий стан в результаті попередньої термічної обробки, з подальшим достатньо повільним охолодженням для отримання більш стійкого стану сплаву. Відпалюванню піддаються сталь, константан, ніхром і інші матеріали.

Лекція №3 Конструкційні 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 ($S < 0,03\%$; $P < 0,03\%$), 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 пружинним сталям відносяться наступні марки: 30ХГС, Ст35, Ст70, 65Г, 50С, 55С2, 55СГ, 60СГ і ін.

Серед корозійностійких сталей найбільшого поширення набули

хромисті нержавіючі сталі (0X13, 1X13, 2X13 і ін.) і хромонікелеві, що містять 18% Cr і 10% N (08X18N10, 08X18N10T та ін.).

Сплави на основі алюмінію, магнію і титану. Крім вуглецевих і легованих сталей в якості конструкційних матеріалів застосовують сплави на основі алюмінію, магнію і титану.

Алюмінієві сплави класифікують на ливарні і ті, що деформуються. Останні підрозділяються на зміцнені термічною обробкою і незміцнені термічною обробкою.

До групи сплавів, що не зміцнюються термічною обробкою, відносяться сплави системи Al — Mn (так звані сплави АМц) і Al—Mg (сплави АМг). Ці сплави міцніші, ніж чистий алюміній. До них відносяться сплави АМц2, АМг2, АМг3 і ін.

Найбільш поширеним алюмінієвим сплавом групи сплавів, що деформуються, які зміцнюються термічною обробкою, є дюралюміній. Він містить близько 4% Zn і 0,5% Mg, а також невелику кількість марганцю, заліза і кремнію. Останні два елементи є постійними домішками. Основні марки дюралюмінієвих ставів: Д1, Д16, Д16М, Д16Т, Д129. В останні роки промисловість випускає дюралюміній, легований літєм, цирконієм або скандієм. Це сплави 1570, 1571, 1573, 1340, 1341 і ін.

Для кування і штампування застосовують кувальні сплави АК1, АК4, АК6, АК8 і ін.

З ливарних сплавів широкого поширення набули силуміни. Це сплави системи Al—Si. Вони володіють високими ливарними властивостями. До них відносяться сплави АЛ 2, АЛ 3, АЛ 4, АЛ 5, АЛ 6, АЛ 7, АЛ 8, АЛ 9, АЛ 11, АЛ12 і ін.

Магнієві сплави, як і алюмінієві, підрозділяють на ті, що деформуються і ливарні (перші маркуються буквами МА, другі -МЛ). До них відносяться сплави МА 1, МА 2, МА 5, МА 10, МА 11; МЛ2, МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6, МЛ10, МЛ12.

Ці сплави мають високу питому міцність, так як мають дуже низьку щільність (близько 1,8 г / см³). Недоліком магнієвих сплавів є їх низька корозійна стійкість.

Одними із перспективних конструкційних матеріалів є сплави на основі титану.

Титан, який має щільність 4,5 г / см³ і температуру плавлення 1972 °С і має дві алотропні модифікації: α — низькотемпературну з щільно упакованою гексагональною ґрадкою і β — високотемпературну з кубічною об'ємноцентрованою ґрадкою.

Титан отримують методом Кролля. З титанових руд виплавляють титанову губку, після переплавки якої отримують технічний титан або легують різними елементами, отримуючи той чи інший титановий сплав. Технічний титан — технологічний матеріал. Він добре штампується, зварюється. Основні марки титану: ВТ1-0, ВТ1-00.

Титанові сплави класифікуються за структурою, яку вони отримують після охолодження на повітрі (нормалізація) і відповідно з цим, сплави

поділяють на: α — сплави, α — псевдосплави, β — сплави, β — псевдосплави, $\alpha+\beta$ — сплави і $\alpha+\beta$ — псевдосплави.

Застосування знаходять сплави марок VT4, OT4, VT5, VT6, VT8, PT14, VT15, VT22 та ін. Титанові сплави мають питому міцність і корозійну стійкість.

Лекція №4 Композиційні та інтелектуальні матеріали.

Пластичні маси (пластмаси) — це синтетичні багатокомпонентні тверді матеріали органічного походження. Залежно від функцій речовини, що вводяться з пластмаси, називають сполучними, наповнювачами, пластифікаторами, стабілізаторами, відтверджувачами, барвниками, пароутворювачами і ін.

Полімери, що зв'язують — це полімери або ологемери, призначення яких полягає в просоченні і обгортванні наповнювачів і в монолітній сполучі всіх компонентів в пластмасовому виробі. Складні властивості полімерів, що зв'язують, багато у чому визначають властивості пластмас.

В залежності від природи речовини, що зв'язується, пластмаси органічного походження поділяють на чотири класи:

— полімери, що отримуються ланцюговою полімеризацією (поліетилен, полістирол, полівінілхлорид, фторопласт, акрилопласти, поліуретан);

— полімери, що отримуються поліконденсацією і ступінчатою полімеризацією (фенопласти, або феноло—альдегідні пластики, амінопласти, поліаміди, епоксидні смоли, кремнійорганічні смоли);

— природні хімічно модифіковані полімери(нітроцелюлоза, ацетилцелюлози, етилцелюлоза);

— бітумно-асфальтні пластмаси.

Наповнювачі - хімічно інертні речовини, що вводяться в полімери для їх зміцнення і додання їм необхідних фізико-механічних властивостей, а також з метою зменшення вартості і витрати полімерного матеріалу. Зазвичай в пластмасах міститься 40 — 70% наповнювачів.

Наповнювачами можуть бути як органічні так і неорганічні матеріали. За зовнішніми ознаками їх ділять на три групи: порошкоподібні (деревна і кварцова мука, тирса, слюда, порошки металів); волокнисті (азбестове, скляне, бавовняне і синтетичне волокно); шарові (або листові) (папір, бавовняні, синтетичні, скляні тканини, металева фольга, дротяна сітка, деревний шпон, деревна стружка).

Наповнювачі не тільки збільшують механічну міцність полімерів, але і підвищують нагрівостійкість, радіаційну стійкість.

Пластифікатори — густі маслоподібними синтетичні рідини, що вводяться в пластмаси для зниження крихкості і підвищення холодостійкості.

Стабілізатори — речовини, що вводяться в пластмаси для підвищення стійкості до світла і нагрівання.

Затверджувачі — речовини, що вводяться в деякі пластмаси з метою розвитку процесів їх затвердіння. Основою цих процесів є реакції полімеризації і поліконденсації.

Барвники — речовини, що додають пластмасовим виробам рівномірне забарвлення і підвищення їх стійкості до світла.

Змащувальні речовини (стеарин, олеїнова кислота) вводяться в пластмаси для кращого відділення поверхні сталеві прес-форми відпресованого виробу.

Пароутворювачі, які при нагріванні виділяють велику кількість газів, що створюють пористу структуру в газонаповнених пластмасових виробках.

Вихідними матеріалами для виготовлення пластмасових виробів є прес-порошки. Частинки цих порошоків містять всі компоненти пластмас. Методом гарячого або холодного пресування з прес-порошків виготовляють пластмасові вироби радіотехнічного і конструкційного призначення (корпуси, ручки, кнопки, важелі, плати та ін.).

Більшість пластмасових виробів виготовляють методом гарячого пресування при 130-180 °С. Деякі пластмасові вироби можуть бути виготовлені холодним пресуванням, тобто при температурі прес-порошку і прес-форми 20 °С.

Газонаповнені пластмаси (пінопласти і поропласти) використовуються в конструкціях різного роду (випромінювачі, обтічники антен та ін.).

Інтелектуальні матеріали — клас різних за хімічним складом і агрегатним станом матеріалів, яких об'єднує наявність однієї або декількох фізичних (оптичних, магнітних, електричних, механічних) або фізико-хімічних (реологічних та ін.) характеристик, що суттєво (нелінійно) змінюються під впливом зовнішніх факторів: тиску, температури, вологості, концентрації рН, електричного або магнітного полів тощо[1].

«Розумними» різномірні матеріали цієї групи робить наявність у них взаємозалежних, але різних за своєю природою властивостей (механічних, електричних, магнітних тощо). Це дозволяє використовувати дані матеріали або як сенсори, чутливі до якогось зовнішнього впливу, або як виконавчі пристрої (актуатори), що передають вплив з пристрою керування на об'єкт керування. І в тому, і в іншому випадку функція відгуку на вплив, як правило, є нелінійною. Деякі з «розумних» матеріалів можуть самостійно реагувати на зовнішні впливи, як, наприклад, біметалеві пластини в найпростіших регуляторах температури.

Матеріали цього типу зазвичай створюються з використанням різних фізичних або фізико-хімічних ефектів (наприклад, п'єзоелектричних, електрострикційних або магнітострикційних явищ чи ефекту пам'яті форми), що спостерігаються в певних матеріалів.

Застосування:

підвіски транспортних засобів, що змінюють свої характеристики в залежності від дорожніх умов;

коригування жорсткості гірських лиж у залежності від умов ковзання по схилю;

тенісні ракетки з можливістю адаптації жорсткості;
одяг (наприклад, чоботи із самообігрівом або змінною жорсткістю підошви, одяг, що здатний виробляти електричну енергію за рахунок тертя[9]);
елементи будівель (наприклад, вікна змінної прозорості);
елементи різьбових з'єднань із системою контролю крутного моменту при загвинчуванні;
пристрої електроніки (наприклад, іграшки, освітлювальні засоби, пульти дистанційного управління) із самозабезпеченням живлення тощо.

Лекція №5. Поляризація 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.

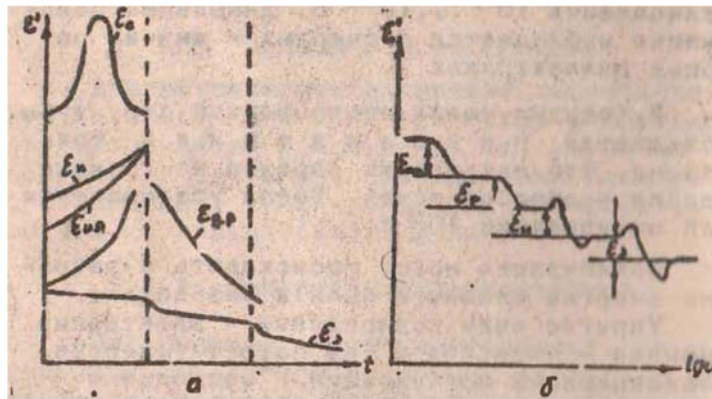


Рис. 5.1. Залежність діелектричної проникності від температури діелектрика (а) і частоти електричного поля (б): при електронній поляризації E_e ; при іонній — безгістеризній поляризації E_n ; при дипольній або іоннорелаксаційній поляризації $E_{др}$, $E_{пр}$; при спонтанній поляризації E_c .

Залежність діелектричної провідності від частоти електричного поля показана на рис. 3,6. 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 №6. Електропровідність 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 змішанням 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 χ

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 №7. Втрати енергії в діелектриках.

Діелектричними втратами називають потужність, що розсіюється в діелектрику при впливі на нього електричного поля і викликає нагрівання діелектрика. Величина втрат залежить від характеру електричного поля і властивостей матеріалу. На постійному струмі $P = U / R$, де P - втрати; U - напруга електричного поля; R - опір діелектрика.

На змінному струмі для ділянки ізоляції $P = U^2 C \omega \operatorname{tg} \delta$, де C - ємність ізоляції ω - частота електричних втрат, який доповнює до 90° кут зсуву фаз між струмом і напругою в ємнісний ланцюга діелектрика .

За фізичну природу розрізняють види втрат: наскрізної провідності, релаксаційні, іонізаційні і резонансні. Втрати наскрізної провідності - це витрати енергії зовнішнього електричного поля на рух вільних носіїв заряду, з ростом температури кількість вільних носіїв зростає по експоненті. отже, так само змінюються і втрати, при високих температурах ці втрати переважають над усіма іншими і викликають сильне нагрівання діелектрика, що може привести до його теплового руйнування. Втрати наскрізної провідності спостерігаються у всіх діелектриків, від частоти електричного поля вони не залежать.

Релаксаційні втрати обумовлені релаксаційними видами поляризації. З ростом температури втрати збільшуються, так як посилюється поляризація. При подальшому підвищенні температури, втрати зменшуються; так як тепловий хаотичний рух руйнує поляризацію. Релаксаційні втрати також залежать від частоти. Залежність релаксаційних втрат визначається впливом частоти на поляризацію. При дуже низьких і дуже високих частотах втрати незначні. Максимальні втрати відповідають перехідним процесам.

Релаксаційні втрати спостерігаються у полярних твердих і рідких діелектриків, а також у іонних кристалів з нещільної упаковкою іонів.

Іонізаційну втрати характерні для діелектриків в газоподібному стані і обумовлені іонізацією нейтральних молекул.

Резонансні втрати спостерігаються на надвисоких частотах, коли частота зовнішнього електричного поля впорається з однією з частот обертально-коливального спектра молекул діелектрика.

Пробій діелектриків. Всі діелектрики зберігають свої електроізоляційні властивості тільки до певного значення напруженості електричного поля, після чого відбувається пробій.

Пробій - це втрата ізоляційних властивостей в результаті створення 13

діелектрику провідного каналу під дією електричного поля.

Мінімальна прикладена до діелектрика напруга, що приводить до його пробую, називається пробивним напругою, а мінімальна наповненість - електричною міцністю. Електрична міцність визначається пробивною напругою віднесених до товщини діелектрика в місці пробую: $E_{np} = \frac{U_{np}}{h}$ де h - товщина діелектрика.

Робоча напруга ізоляції повинна бути менше пробивної напруги. Величину, рівну відношенню пробивної напруги до робочої, називають коефіцієнтом запасу електричної міцності. Зазвичай він вибирається 1,5..4.

Значення електричної міцності залежить від прикладеної напруги. Тривале перебування під впливом електричного поля високої напруженості на діелектрик призводить до електричного старіння, в результаті якого збільшується струм наскрізної провідності, при цьому напруженість пробую знижується. Тому термін служби ізоляції обмежений. У більшості електротехнічних пристроїв газоподібні діелектрики є ізолюючим середовищем. У газі завжди є невелика кількість вільних зарядів, що утворюються під дією іонізуючих факторів: випромінювання, термічний вплив. Під дією електричного поля вільні заряди набувають спрямований рух і додаткову енергію. Якщо енергія електрона стає рівною або більше енергії іонізації нейтральної молекули газу, відбувається іонізація молекули: утворюється новий електрон і позитивний іон.

Освічені заряджені частинки прискорюються електричним полем, і іонізують інші молекули, створюючи суцільний потік іонізованого газу, тобто електропровідний канал.

Електрична міцність газу залежить від ступеня однорідності поля, відстані між електродами, частоти електричного поля, тиску газу, його вологості і температури.

Електрична міцність неоднорідного поля менше, ніж однорідного, так як при інших рівних умовах напруженість поля поблизу гострого електрода швидше досягає критичного значення. При цьому у вістря створюється об'ємний позитивний заряд - корона, який потім переростає в дугоподібний заряд.

У неоднорідному полі електрична міцність залежить від полярності електродів; при позитивному конусі електрична міцність менше, ніж при негативному, але за умови, ЩО процеси ударної іонізації переважають над холодної емісією електронів з електрода.

Електрична міцність газів в однорідному полі залежить від відстані між електродами (рис. 7 .1).

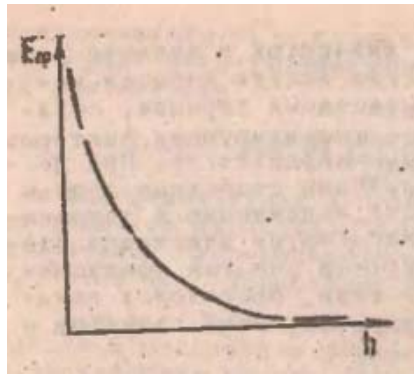


Рис. 7.1. Залежність діелектричної міцності повітря E_0 від відстані між електродами h .

При малих відстанях між електродами електрична міцність збільшується, що пояснюється труднощами формування розряду, так як електрон, довжина вільного пробігу котрого порівнянна з відстанню між електродами, проскакує проміжок між електродами, не встигнувши іонізувати достатню кількість нейтральних молекул. Зі збільшенням відстані умови іонізації полегшуються і електрична міцність зменшується.

Електрична міцність газу залежить від тиску (рис. 3.2). Збільшення тиску більше однієї атмосфери (0,1 МПа) призводить до зменшення довжини вільного пробігу електронів в газі і, відповідно, до зменшення енергії електронів, в результаті чого напруженість електричного поля, необхідна для іонізації газу, збільшується.

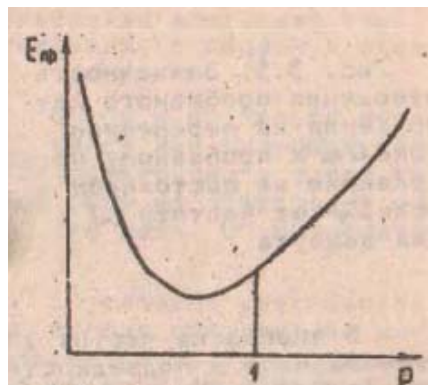


Рис. 7.2 Залежність електричної міцності від тиску

При зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, коли ж тиск доходить до певної межі (нижче атмосферного тиску) і розрідження досягає високих ступенів, електрична міцність знову зростає. Це пояснюється зменшенням числа молекул в одиниці об'єму та зниженням ймовірності зіткнень електронів з молекулами. При високому вакуумі пробій пояснюється явищем виривання електронів з поверхні електродів (холодна емісія). В цьому випадку електрична міцність велика і залежить від матеріалу і стану електродів.

Зниження електричної міцності повітря при тисках менше 0,1 МПа слід враховувати при роботі авіаційних приладів, так як на висоті 15 км електрична міцність може зменшуватися в три-чотири рази.

Висока міцність вакууму і підвищених тисків використовується у виробництві високовольтних кабелів і конденсаторів.

Залежність відносної пробивної напруги на змінному струмі до пробивної напруги на постійному струмі від частоти поля для газу показана на рис. 3.3. При невеликих частотах пробивну напругу на постійному і змінному струмі однакові, так як процеси ударної іонізації встигають розвиватися за напівперіод зміни поля.

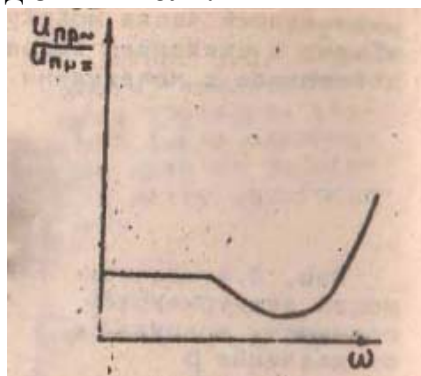


Рис. 7.3. Залежність відносини пробивної напруги на змінному струмі у пробивної напруги на постійному струмі від частоти для повітря

У діапазоні частот $10^4 - 10^6$ Гц позначається різниця в рухливості електронів та іонів, в результаті його утворюються об'ємні заряди, що призводять до неоднорідності електричного поля, а отже, і до зменшення напруги пробою. При подальшому збільшенні частоти процеси ударної іонізації не встигають розвиватися за напівперіод зміни поля, тому напруга пробою зростає.

Підвищення вологості і температури знижує електричну міцність газів.

Електрична міцність рідких діелектриків більше, ніж газів в нормальних умовах, це пояснюється меншим значенням довжини вільного пробігу в більш щільному середовищі.

Пробій рідких діелектриків Обумовлений двома основними процесами - ударної іонізацією і емісією з катода. Технічно чисті рідини завжди містять домішки : води, газу, які полегшують пробою. Електроізоляційні властивості як рідких, так і газоподібних діелектриків після пробою відновлюються, так як завдяки тепловому руху молекул канал пробою руйнується.

У Твердих діелектриках розрізняють три види пробою: електричний, тепловий і електрохімічний.

Електричний пробій обумовлений ударної іонізацією або розривом зв'язків між частинками діелектрика, а також холодної емісією електронів з електродів під дією електричного поля. Він відбувається за $10^{-6} - 10^{-8}$ с.

Тепловий пробій обумовлений збільшенням кількості носіїв заряду при нагріванні діелектрика, коли кількість теплоти, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, перевищує кількість теплоти, що відводиться від нього.

Електрохімічний пробій обумовлений розвитком під дією електричного поля і виділяється в діелектрику тепла хімічних процесів, що ведуть до утворення рухливих іонів.

До механічних властивостей діелектриків відносяться міцність при розтягуванні, стисненні і вигині, крихкість і в'язкість.

Теплові властивості діелектриків: нагрівостійкість, холодостійкість, теплопровідність і теплове розширення. Нагрівостійкість - здатність діелектрика витримувати вплив підвищеної температури протягом часу, який можна порівняти з терміном нормальної експлуатації, без неприпустимого погіршення його властивостей. Вона оцінюється найбільшою допустимою робочою температурою. Здатність матеріалів зберігати свої електричні та механічні властивості під впливом випромінювань високої енергії характеризує радіаційна стійкість.

Діелектричні матеріали. За Функціями, виконуваних в приладах і апаратурі, діелектрики поділяють на електроізоляційні і конденсаторні матеріали, пасивні діелектрики і керовані матеріали (активні діелектрики).

По агрегатному стані розрізняють газоподібні, рідкі та тверді діелектрики; по хімічній природі - органічні і неорганічні.

Лекція №8. Класифікація діелектриків.

За Функціями, виконуваних в приладах і апаратурі, діелектрики поділяють на електроізоляційні і конденсаторні матеріали, пасивні діелектрики і керовані матеріали (активні діелектрики).

По агрегатному стані розрізняють газоподібні, рідкі та тверді діелектрики; по хімічній природі - органічні і неорганічні.

Газоподібні діелектрики. До властивостей газоподібних діелектриків відносяться високий питомий електроопір, малий тангенс кута діелектричних втрат, ізоляційна здатність самовідновлюватися після пробою. Гази, молекули яких нейтральні, є діелектриками. До них відносяться повітря, азот, вуглекислий газ, Водень, електротехнічний газ, пари фторорганічних рідин, інертні газы. Інертні газы мають низьку електричну міцність тому їх застосовують в газорозрядних приладах, джерелах світла.

Рідкі діелектрики. Розрізняють три види рідких діелектриків:

- Нафтові (мінеральні) масла: трансформаторне, конденсаторне і кабельне;

- Синтетичні рідини: совол, совтола, гексол, кремній і фторорганічні рідини і ін.;

- Рослинні олії: лляна, тунгове, касторове.

Трансформаторне масло застосовують для заливки силових трансформаторів для підвищення електричної міцності ізоляції та поліпшення відведення тепла, що виділяється в обмотках і сердечнику. Трансформаторне масло старіє.

Конденсаторне масло застосовують для просочення конденсаторів, що підвищує діелектричну проникність і електричну міцність і дає можливість зменшити габарити конденсатора.

Кабельне масло використовують у виробництві силових кабелів для підвищення електричної міцності і тепловідведення.

Совол застосовують для просочення конденсаторів; совол і фторорганічні рідини не горючі і застосовуються для заливки

трансформаторів.

Ляна і тунгове масло (висихають) застосовують для виготовлення лаків, лакотканин, для просочення; касторове (невисихаюче) - для просочення і заливки.

Тверді органічні діелектрики. Органічними речовинами називають з'єднання вуглецю з іншими елементами. В основному застосовуються тверді діелектрики, які є високомолекулярними сполуками, молекули яких містять велику кількість, іноді тисячі, атомів.

До органічних твердим діелектриків відносяться смоли, лаки і компаунди, воскоподібні діелектрики, гнучкі плівки, волокнисті матеріали, пластмаси, еластомери.

Органічні матеріали, розм'якшуються при підвищених температурах, називаються термолабільними.

Полярні і слабополярні термопласти (поліетилен, полістирол, фторопласт-4) володіють великим питомим об'ємним і поверхневим опором, малими втратами енергії, високою вологостійкістю; їх електроізоляційні властивості мало змінюються з температурою і частотою. Тому вони є високо частотними діелектриками.

Полярні термопласти характеризуються вищими втратами енергії, властивості їх змінюються з температурою і частотою, тому вони є низькочастотними діелектриками.

Органічні матеріали, які при нагрівання хімічно руйнуються (обвуглюються, згоряють), називаються термоактивними.

Вони більш стійкі до нагрівання, тверді, крихкі, чгч термопластичні полімери. Це бакелітові, ліфталеві, епоксидні, кремній, органічні та інші. Їх застосовують для готування електроізоляційних лаків, компаундів, пластмас.

Воскоподібні матеріали - це тверді легкоплавкі речовини, що володіють низькою механічною міцністю, малими втратами і малою гігроскопічністю. Це парафін і мерезін; їх застосовують для заливки і просочення ізоляції.

Лаки - це колоїдні розчини смоли, бітумів олій, що висихають в летючих розчинниках. Залежно від призначення вони можуть бути просочувальні, покривні і клейкі. Лаки підвищує механічну і електричну міцність, опір і вологостійкість ізоляції.

Клейкі лаки повинні, також забезпечувати високу адгезію до матеріалами, які є клеючі.

Компаунда - суміш полімерів, іноді з добавками мінеральних наповнювачів (порошок слюди, кварцу). Компаунди в ОАС-плавляльному вигляді застосовують для заливки або просочення ізоляції для підвищення її електричної і механічної потужності, нагрівостійкості, вологостійкості, теплопровідності, варто мати на увазі, що заливка термолабільними компаундами практично виключає можливість ремонту деталей або приладів в разі їх пошкодження.

Волокнисті матеріали складаються з волокон.

Переваги волокнистих матеріалів: механічна міцність, технологічність,

Електроізоляційні властивості волокнистих матеріалів можуть бути покращені шляхом просочення лаками і компаундами. Лакоткани замінюють більш прогресивними електроізоляційними матеріалами - гнучкими плівками з синтетичних полімерів.

Пластмасами називаються полімери та їх суміші з іншими матеріалами, які при нагріванні під тиском здатні перетворюватись в певну форму. Обов'язковим компонентом пластмас є сполучна речовина - полімер. Багато пластмас складаються тільки з полімерів, наприклад: полістирол, органічне скло.

Іншим важливим компонентом пластмас є наповнювач - порошкоподібні, волокнисті і шаруваті речовини як органічного, так і неорганічного походження. Для підвищення пластичності і полегшення обробки пластмас, вводять пластифікатори, для сповільнення процесів їх старіння - стабілізатори.

До еластичних матеріалів відносяться гуми, основу яких складає вулканізований каучук. Залежно від вмісту сірки, гуми вони бувають м'які (1 ... 3% сірки), тверді (0 ... 35% сірки). Тверда гума називається ебонітом.

Недоліком органічних матеріалів є низька теплостійкість, схильність до старіння, мала ударна в'язкість, невисокий модуль пружності, великий коефіцієнт теплового розширення.

Швидкість старіння органічних матеріалів збільшується при підвищенні температури, концентрації кисню, наявності озону, під дією ультрафіолетових променів, електричних напруг, механічних навантажень.

Тверді неорганічні діелектрики. Неорганічні діелектрики мають підвищені електричні, механічними і теплові властивості в порівнянні з органічними.

До них відноситься скло, кераміка, слюда і матеріали на її основі.

Скло - аморфні речовини - представляють собою системи різних оксидів. Основу більшості скла становить оксид кремнію, тахтстКДА називаються силікатними.

Так як у скла міцність при розтягуванні набагато менша, ніж міцність при стисненні, то раптове зовнішнє охолодження більш небезпечно, ніж раптовий нагрів.

Більшість технічного скла сильно поглинає ультрафіолетові промені завдяки вмісту домішки оксидів заліза. Ультрафіолетове скло, що містить оксидів заліза менш 0, 2 + 2%, володіє прозорістю для ультрафіолетових променів; добре пропускає ці промені кварцове скло (1 0 0% оксиду кремнію), яке застосовується в спеціальних лампах, що дають ультрафіолетове випромінювання.

Стійкість до дії вологи характеризує гідролітична стійкість скла. Найвищою гідролітичною стійкістю володіє кварцове скло, гідролітична стійкість зменшується при підвищенні температури, при введенні в скло лужних оксидів.

Силікатне скло практично стійке до дії кислот, за винятком пишучи плави ковой кислоти, але малостойки до лугів.

Електричні властивості скла в великій мірі залежать від їх складу,

Тимчасова присутність в складі скла двох різних лужних оксидів збільшує питомий електричний опір і зменшує втрати в порівнянні зі склом, містить тільки один лужний оксид. Це явище називається нейтралізацією або покращуючим ефектом. Скло з низькою гідролітичною стійкістю мають малий поверхневий питомий опір в умовах вологого середовища.

У залежності від призначення розрізняють основні види електротехнічного скла:

1. Конденсаторне скло. Воно повинно мати підвищену діелектричну проникність і малі діелектричні втрати.
2. Скло для виготовлення ізоляторів.
3. Лампове скло.
4. Скло з наповнювачем: ним приналежить мікалексу - пластмаса зі скла і порошку слюди.

Крім того, зі скла виготовляють волокна і тканини, світловоди.

Світловоди - складаються з локон, які мають серцевину і оболонку зі скла різного складу. Світловий промінь зазнає повного внутрішнього віддзеркалення і, багаторазово відображається, йде уздовж волокна, не виходячи в зовнішній простір.

Кераміка є складною системою оксидів, що складається з аморфної і кристалічної фаз. Керамічні матеріали поділяються на установчі та конденсаторні. До настановної кераміки відносяться фарфор і його різновиди, алюмооксид, театит. Конденсаторна кераміка складається в основному з діоксиду титану.

Слюда - шаруватий природний мінерал. Властивості слюди: висока електрична міцність, нагрівостійкість, вологостійкість, механічна міцність і гнучкість. Існує два різновиди слюди: мусковіт і флогопіт.

Мусковіт прозорий, має підвищені електричні і механічні властивості і застосовується в конденсаторах. Флогопіт покращений, має високу нагрівостійкість і застосовується в обігрівальних пристроях в якості ізоляції.

Отримана синтетична слюда. Вона має більш високу хімічну стійкість, нагрівостійкість. Але синтетична слюда дорожче прибуткової, отримана у вигляді кристалів порівняно малих розмірів і важче розщеплюється, тому вона не може замінити природну.

На основі слюди виготовляють такі матеріали, як міканіти, слюдичити, слюдопласти, мікалексу.

Активні діелектрики. Активні діелектрики - це матеріали, здатні гелерувати і перетворювати електричні сигнали. До них відносяться сенетоелектрики, п'єзоелектрики, електрети, піроелектрики.

Сегнетоелектрики - це речовини з самовиробничою поляризацією в певному інтервалі температур і тисків. Вивчаючи ці матеріали, особливу увагу слід приділити їх будові, так як воно є причиною спонтанної поляризації і наявності особливих властивостей: різкої залежності діелектричної проникності від температури, напруженості електричного поля та ін.

Основні сегнетоелектрики - це сегнетокераміка на основі титанату

барію і стоокція, сегнетокераміки типу ВК-1 ... ВК7, які використовуються для виготовлення нелінійних конденсаторів - варіконд, малогабаритних конденсаторів з високою ємністю, п'єзоелектричних перетворювачів; оптично прозорі сегнетоелектрики застосовуються в вантовій електроніці для управління лазерним променем.

П'єзоелектрики - це діелектрики, які поляризуються під дією механічних напружень X деформуються під дією їмелектричного поля.

Основні п'єзоелектрики - монокристали кварцу, кристали сегнетової солі, сульфата; ітія, цірконаттанат свинцю і т.д.

І використовуються в техніці для перетворень тіл механічних коливань в електричні сигнали (приймачі ультразвуку), а так \sim е для перетворювачів електричних сигналів в механічних коливань (генератори ультразвуку)

Піроелектрики - це діелектри, які поляризуються при зміні температури. Це турмалін, деякі полярні полімери. Їх застосовують в теплових датчиках і приймачах променевої енергії.

Електрети - діелектрики, Здатні довго зберігати залишкову поляризацію. Залежно від зовнішніх чинників, електретний стан, розрізняють термо-, фо. то-, радіоелектрети. Типові електрети фторопласт-4, лавсан, органічне скло та ін. Вони використовуються для виготовлення вирахування тиску, вологості і механічних вібрацій, для мікрофонів і телефонів.

Рідкі кристали - це в'язкі рідини, в яких молекули розташовуються у певному порядку. Їх оптичні характеристики (прозорість, спектральне поглинання та відбиття, подвійне променезаломлення) реагують на зміну електричних і магнітних полів, температури. Використовують їх в індикаторних пристроях, дисплеях, циферблатах приладів.

До матеріалів квантової електроніки відносяться високотемпературні монокристали оксидів цинку, кремнія, титану, а також з'єднання галію, бари, лантану з фтором, деяке скло і ситалли.

Кращими оптичними властивостями володіють газові активні середовища. Перевага газових лазерів в тому, що молекули газу легко переводяться в збуджений стан під дією електричного поля. У газових лазерах малої потужності використовують гелій-неонову суміш з бенкетами кадмію, селену, в лазерах високої потужності - вуглекислий газ.

Лазер - джерело оптичного когерентного випромінювання з високою спрямованістю і великою щільністю енергії, робота лазерів заключається в фактично одночасному випусканні узгоджених по частоті і направленні електромагнітних хвиль великою кількістю ЕМОВ або молекул під дією зовнішнього електричного поля.

Лазери застосовують в оптичній локації, медицині, телебаченні, інформаційно вимірювальній техніці, а також в обробці оптично непрозорих матеріалів – імпульсному зварюванні, плавленні, термообробці, різанні.

Лекція №9. 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, МО, МОО, 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 №10. Явище надпровідності

Надпровідність. В умовах критичних температур, в близькості до абсолютного нуля (середя рідкого гелію) опір деяких провідників падає до нуля (рис. 11.1). Такі матеріали називаються свержпровідниками, а явище-надпровідність. Воно викликано тим, що електрони провідності об'єднуються в пари за умови що їх спінові магнітні моменти антипаралельні, і безперешкодно рухаються в кристалічній решітці, які не розсіюючи енергії на теплових коливаннях. З надпровідного в стан провідності матеріал може перейти при нагріванні або дії магнітного поля з напруженістю вище критичної. Розрізняють надпровідники I роду з різким переходом при критичній напруженості і надпровідники II роду з плавним переходом при 10^{-10} А / М. До перших відносяться: свинець, олово, берилій, використовувані в ЗУЕВМ - з'єднання галію (галіди), олова для магнітів, електродвигунів. Високотемпературний надпровідність при 77, 100, 120 К (середя рідкого азоту) мають: металокерамічні з'єднання на основі ітрити, барію, платини і міді.

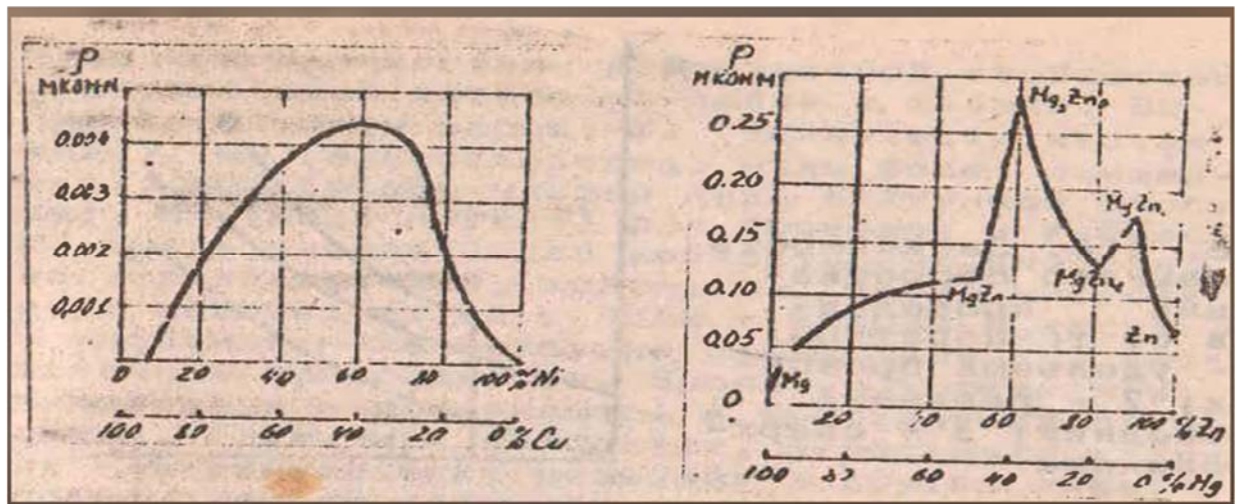


Рис. 11.1. Залежність питомого опору сплавів Cu і Ni від

Рис. 11.2. Залежність питомого опору сплавів

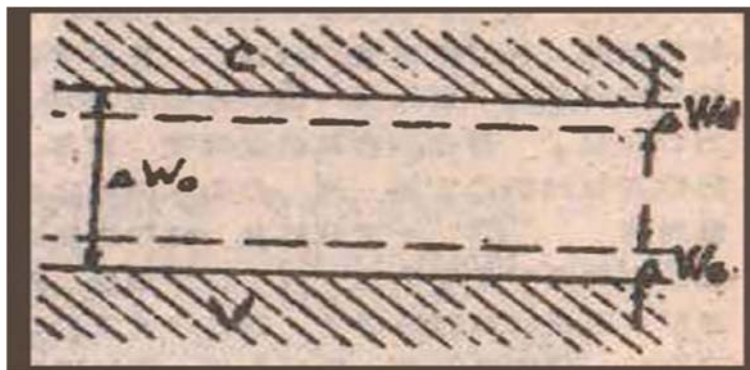
Лекція №11. Фізика провідності напівпровідників.

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, сульфідів, 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) напівпровіднику електрон, якому повідомлена енергія, рівна або більша, ніж енергія забороненої ЗОНИ, переходить із валентної ЗОНИ в зону провідності і здійснює в ній електронну або n -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 p -типу провідність домовилися називати дірочною або p -типу.

Домішки в напівпровіднику. Тип провідності визначають домішки. Донорні домішки або просто донорні елементи з валентністю вище, ніж у основного матеріалу 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 доміші - у стелі валентної зони (рис. 5.1).



Мал. 12.1. 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 полупровідників 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 полу провідників 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).

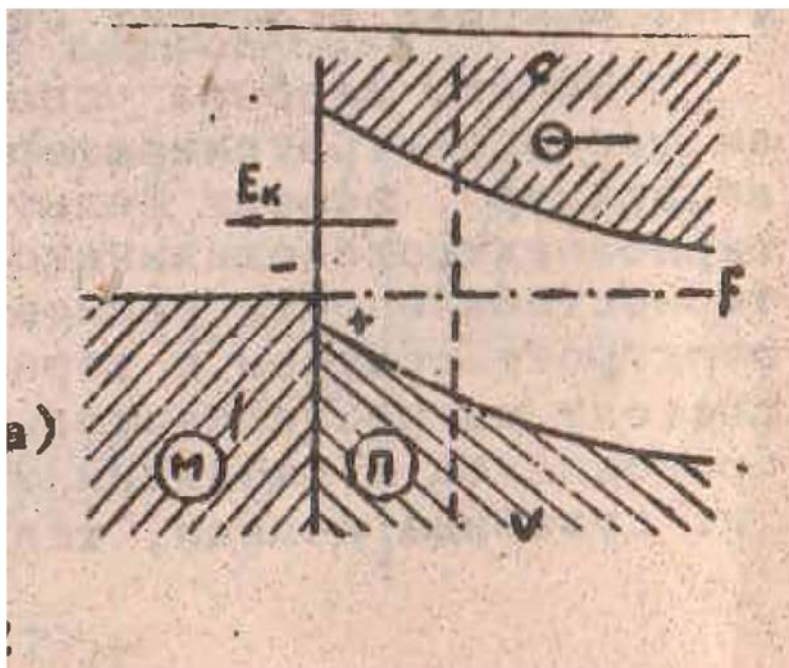
Контактні

Лекція №12. Контактні явища в напівпровідниках.

Контактні явища, р-n-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. 12.2. 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 вентильним 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 фотоэффект) можна перетворювати світлову енергію в електричну. Прилади, засновані на цьому явищі, називаються вентильними фотоелементами або фотодіодами (окремий випадок фотоелементу - сонячна батарея). В даний час їх роблять з арсеніду галію з ККД 23%.

Лекція №13. Напівпровідникові матеріали та прилади.

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 галію - 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 використовувані 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 малими добавками.

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

Приклада таких матеріалів є антимонід індію, галію і алюмінію, тоб Сполука сурми з індієм, галієм і алюмінієм.

Смороду здобули найменування інтерметалічних Сполука.

Кристалічні Напівпровідникові матеріали на Основі Сполука Сірки, селену і телуру з одного боку і міді, кадмію та свинцю з Іншого.

Такі Сполука називаються відповідно: сульфідами, селенідами і телуриду₂₉

Всі Напівпровідникові матеріали, як уже говорилося, можуть бути розподілені по кристалічній структурі на Дві групи.

Одні матеріали виготовляють у вигляді великих одиночному кристалів (монокристалів), з яких вірізають за ПЄВНЄВ кристалічним Напрямки Платівки різних Розмірів для Використання їх у Випрямляч, підсілювачах, фотоелементах.

Такі матеріали складають групу монокристалічних напівпровідників .

Найбільш Поширеними монокристалічними матеріалами є германій и кремній.

Р азроботані методи виготовлення монокристалів та з карбїду кремнію, монокристалів з інтерметалічних Сполука.

Інші Напівпровідникові матеріали являються собою суміш безлічі малих кристаликів, безладно спаянні один з одним.

Такі матеріали називаються полікристалічними .

ПРЕДСТАВНИК полікристалічних напівпровідникових матеріалів є селен и карбїд 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, но В дуже малих кількостях.

Прїсутність германію виявлено у цинкових рудах и в золах різних вугілля.

Основним Джерелом Отримання германію є зола вугілля й и відходи металургійних заводів.

Лекція №14. Магнітні матеріали. Елементи теорії магнетизму.

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 обсяг - намагніченість (I), в слабких полях пропорційна напруженість 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 ($\sim -10^{-5}$), нижче нуля і не залежить від температури.

У парамагнетиків (алюміній, платина, кисень, лужні метали) магнітна

сприйнятливість близько 10 ... 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;

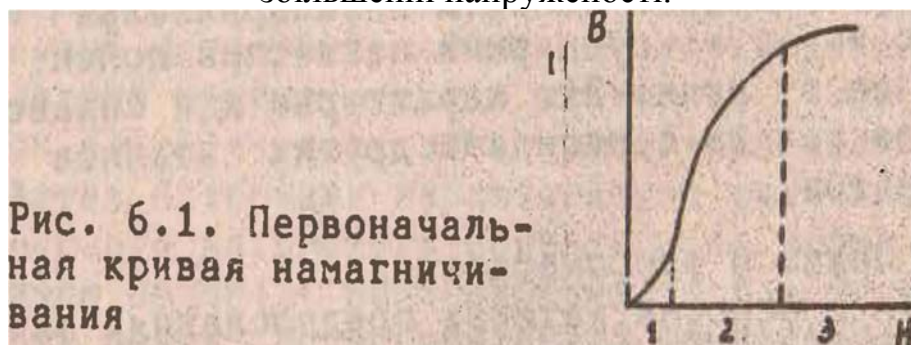
- Завдяки малій міжатомній відстані виникає велика енергія обмінної взаємодії, спінові моменти сусідніх атомів шикуються в одному

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.

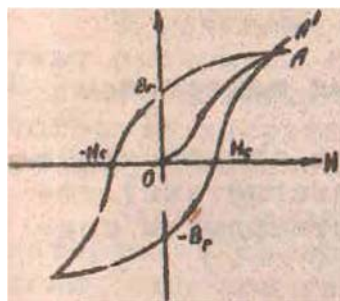
Основна крива намагнічування. Процес намагнічування матеріалу описує крива намагніченості - залежність індукції (β) від напруженості поля (H) (рис. 6.1). У дуже слабких полях (до 0,08 А / м) індукція зростає лінійно при збільшенні напруженості.



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

А / 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 А / м відбувається остаточна орієнтація доменів і настає насичення. Всередині 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.

Лекція №15. Класифікація магнітних матеріалів.

За властивостями і застосуванням сильномагнітні матеріали (феро і феромагнетики) 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, коєрцитивна 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 магнітотвердим 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;

- висококоерцитовні 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; і 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.