

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ
І ЗАСОБІВ АВТОМАТИКИ

Т.О.ГАУР
С.М.ДРАНЧУК
В.І.ЦАЦКО

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**
Частина 1 Електротехнічні матеріали

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



ОДЕСА – 2021

Т.О.Гаур. Технологія електричних та напівпровідникових матеріалів. Частина 1. Електротехнічні матеріали. /Т.О.Гаур (розділ 2), С.М.Дранчук (розділ 3), В.І.Цацко (розділи 1, 4) // Навчальний посібник Одеса: Одеський національний морський університет, 2021. – 183 с.

Навчальний посібник містить стислий виклад загальних питань будови речовини, відомості про властивості та застосування провідникових, діелектричних, магнітних матеріалів та елементів електричних кіл на їх основі.

Відповідає вимогам для дипломування електромеханіків Розділу А-III/6 Кодексу з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (Кодекс ПДНВ), а також враховує рекомендації Типового курсу Міжнародної морської організації 7.08 «Електромеханік» (Electro-Technical Engineer, Model course 7.08, 2014 Edition).

Призначено для студентів електромеханічних спеціальностей при вивченні технології електричних та напівпровідникових матеріалів. Може бути корисним викладачам у навчальному процесі.

Навчальний посібник розглянуто та схвалено
Вченою радою Навчально-наукового інституту морського флоту
(протокол №7 від 07.06.2021 р.)
Вченою радою Одеського національного морського університету
(протокол №3 від 06.10.2021 р.)

Рецензенты:

к.т.н., професор Завадський В.А.

к.т.н., доцент Букарос А. Ю.

ЗМІСТ

Розділ		Назва	Стор
		ВСТУП	4
1		БУДОВА РЕЧОВИНИ	6
1	1	Класифікація матеріалів	6
1	2	Елементи зонної теорії твердого тіла	7
1	3	Види хімічного зв'язку	10
1	4	Особливості будови твердих тіл	12
2		ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	16
2	1	Особливості поведінки електронів у металах	16
2	2	Температурна залежність питомого опору провідників	17
2	3	Явище надпровідності	19
2	4	Особливості опору металевих сплавів	23
2	5	Класифікація провідникових матеріалів	31
2	6	Матеріали з великою електропровідністю	32
2	7	Провідникові матеріали з великим питомим опором	34
2	8	Інші провідникові матеріали	49
3		ДІЕЛЕКТРИКИ	62
3	1	Поляризація діелектриків	62
3	2	Діелектричні втрати	72
3	3	Пробій діелектриків	82
3	4	Електропровідність діелектриків	96
3	5	Пасивні діелектрики	98
3	6	Активні діелектрики	104
3	7	Застосування діелектриків	123
4		МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ	155
4	1	Класифікація речовин за магнітними властивостями	155
4	2	Природа феромагнітного стану	157
4	3	Намагнічування феромагнетиків	158
4	4	Параметри магнітних матеріалів	160
4	5	Властивості магнітних матеріалів	169
		ЛІТЕРАТУРА	183

ВСТУП

Навчальна дисципліна "Технологія електричних та напівпровідникових матеріалів" є загальнонауковою дисципліною, що забезпечує підготовку бакалавра з напрямку 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» «271.03 Річковий та морський транспорт (електромеханіки) і є обов'язковим компонентом освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів.

Вона покликана дати студентам знання, уміння і навички, необхідні для вивчення і засвоєння подальших загально інженерних і профільюючих дисциплін. Зміст дисципліни в значній мірі визначає рівень загальнонаукової підготовки бакалавра з напрямку 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 271.03 Річковий та морський транспорт (електромеханіки).

Вивчення дисципліни базується на знаннях, одержаних з курсів фізики (розділи: електрика і магнетизм). Знання, набуті в кредитних модулях «Технологія електричних та напівпровідникових матеріалів», є базою для оволодіння такими дисциплінами: „Теоретичні основи електротехніки”, “Електричні машини”, „Моделювання електромеханічних систем”, “Силова електроніка та перетворювачі“, „Електроприводи ПТМ”, „Електрообладнання ПТМ і портів”, “Електроніка та схемотехніка“ і ін.

Метою дисципліни є формування у студентів 2-го курсу базових знань про суттєві фізичні явища та властивості великої номенклатури електротехнічних матеріалів, які використовуються в устаткуванні електрообладнання сучасних портів, принципів роботи напівпровідникових приладів, а також розвинення можливостей використання набутих знань на практиці, при вивченні і аналізі безпосереднього устаткування, вибору матеріалів та компонентів при виконанні ремонту, проектуванні та виготовленні електрообладнання.

Задачею вивчення дисципліни є: забезпечення розуміння та чіткого засвоєння студентами основних властивостей та характеристик електричних матеріалів та напівпровідникових приборів, навчання студентів правильно оцінювати вплив властивостей електротехнічних матеріалів на технічні характеристики електрообладнання, знайомство студентів з впливом зовнішніх факторів на електротехнічні матеріали та напівпровідникових приборів, які застосовуються в електричному обладнанні, а також виробити навички роботи з учбовою та довідковою літературою.

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні знати та вміти:

фізичні основи дії електротехнічних матеріалів та напівпровідникових приборів;

напрямки розвитку та розробки матеріалів електронної техніки, хіміко-фізичні основи властивостей матеріалів та напівпровідникових приборів, а також залежність цих властивостей від умов експлуатації;

практичні прийоми експлуатації електротехнічних матеріалів та напівпровідникових приборів при настройці та ремонті судового та портового обладнання.

обирати та порівнювати електротехнічні матеріали та напівпровідникові прибори за основними параметрами та критеріями їх експлуатації при ремонті судового та портового електрообладнання;

підбирати сумісні необхідні елементи для реалізації конкретних блоків та вузлів;

знати і самостійно використовувати необхідну довідкову літературу по електротехнічним матеріалам та напівпровідниковим приборам при ремонті та експлуатації обладнання портів та суден.

Ці знання дозволять забезпечити підготовку бакалаврів за наступними спеціальними компетенціями:

- Здатність здійснювати технічне обслуговування та ремонт електричного та електронного обладнання.
- Здатність здійснювати технічне обслуговування та ремонт електричних, електронних систем та систем управління палубними механізмами та вантажопідйомним обладнанням.
- Здатність здійснювати технічне обслуговування та ремонт систем управління та безпеки побутового обладнання.
- Критичне осмислення основних теорій, принципів, методів і понять сучасної морської інженерії та електротехніки.
- Здатність до аналізу та прогнозування процесів та стану суднового електрообладнання в умовах неповної або обмеженої інформації.

У результаті успішного завершення курсу особа, якій присвоюється кваліфікація, здобуває теоретичні знання, професійні уміння та навички, необхідні для розв'язування спеціалізованих професійних задач управління технічними системами та комплексами морських суден, експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики

- Знання та розуміння електричної технології та теорії електричних машин; основ електроніки та силової електроніки; конструкції та принципу дії електричних розподільних щитів та електрообладнання; основ автоматики, автоматичних систем та технології управління; приладів, сигналізації та систем стеження; електроприводу; технології електричних матеріалів; електрогідравлічних та електропневматичних систем управління.
- Концептуальні знання, включаючи певні знання сучасних досягнень, у сфері електротехніки та електромеханіки, електроніки та систем управління та їх застосування у морській інженерії.
- Уміння виявляти несправності в електричних ланцюгах, встановлювати місця несправностей і застосовувати заходи щодо запобігання ушкоджень.

1 БУДОВА РЕЧОВИНИ

Сучасний науково-технічний прогрес щільно пов'язаний з розробкою та використанням нових матеріалів. Матеріали - це той ланцюг, який визначає успіх багатьох інженерних рішень при розробці електронної апаратури. Тому вивченню матеріалів у технічних навчальних закладах приділяють багато уваги.

1.1 КЛАСИФІКАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ

Матеріали, які використовуються у техніці, підрозділяють на електротехнічні та конструкційні (рисунок 1.1).

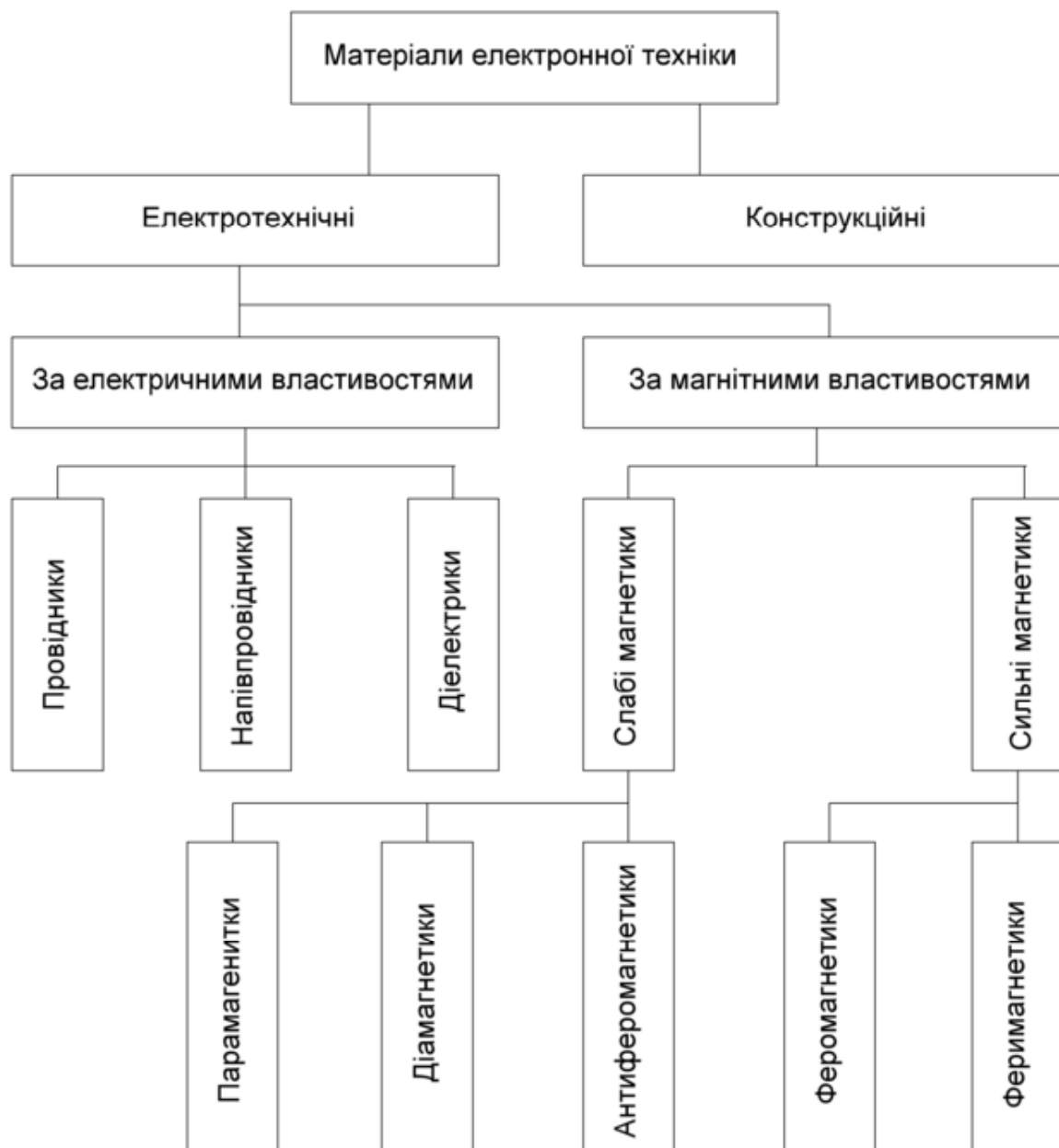


Рисунок 1.1 - Класифікація електротехнічних матеріалів

Електротехнічними матеріалами (ЕТМ) звуться такі, що мають обумовлені властивості по відношенню до електромагнітного поля і використовуються у техніці згідно цим властивостям.

За відношенням до електричного поля матеріали підрозділяються на діелектрики, провідники та напівпровідники. По відношенню до магнітного поля матеріали підрозділяються на сильно магнітні (феро- та феримагнетики) та слабомагнітні (діа-, пара- та антиферомагнетики).

1.2 ЕЛЕМЕНТИ ЗОННОЇ ТЕОРІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА

1.2.1 Загальні положення

Зонна теорія - це теорія валентних електронів, що рухаються у періодичному полі кристалічної решітки.

Як відомо з фізики, окремі атоми мають дискретний енергетичний спектр, тобто електрони можуть займати тільки визначені енергетичні рівні (рисунок 1.2).

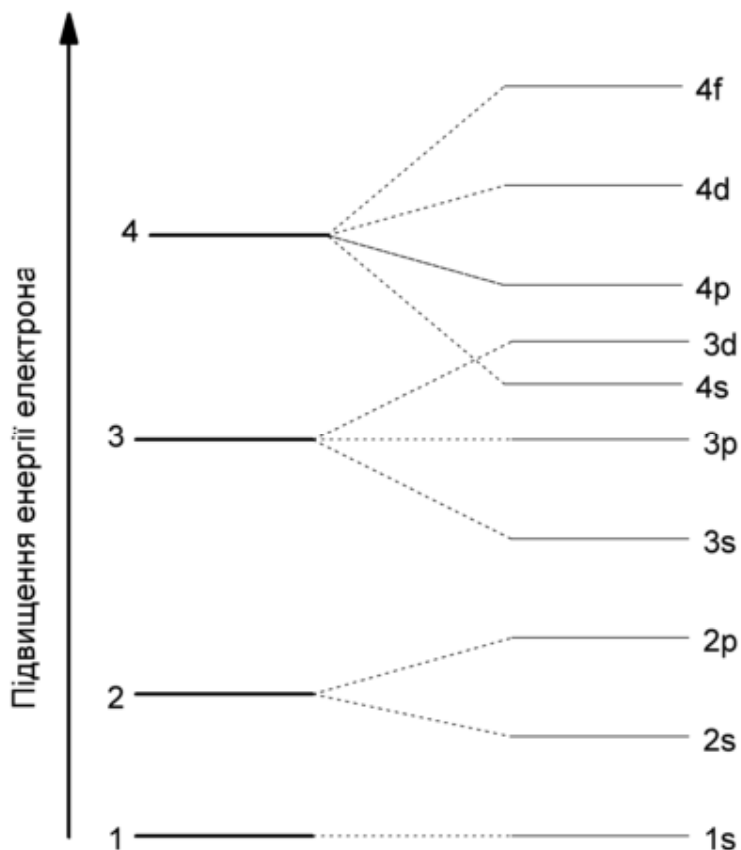


Рисунок 1.2 - Енергетичні рівні дискретного атома

Тому спектри окремих атомів мають визначені лінії і зветься лінійчатими. Якщо мати систему з N однакових атомів достатньо віддалених один від одного (наприклад газ), то взаємодія між атомами відсутня і енергетичні рівні електронів не змінюються. При зближенні атомів до виникнення кристалічної ґратки твердого тіла усі електронні рівні атома (як заповнені електронами, так і незаповнені) дещо зміщуються під впливом взаємодії сусідніх атомів. Притягання електронів одного атома ядром сусіднього зменшує височину потенціального бар'єру, який розподіляє електрони у самотніх атомах, це у свою чергу змінює характер руху електронів. Тому електрони мають змогу без зміни енергії безпосередньо переходити від одного атома до другого, тобто рухатися у кристалі. Обмінна взаємодія має

квантову природу і є наслідком не розрізнення електронів. У цьому випадку не можна говорити про залежність того чи іншого електрона від відповідного атому - кожний валентний електрон належить усім атомам кристалічної ґратки. Тобто дискретні енергетичні рівні ізолюваного атому розщеплюються в енергетичні зони (рисунок 1.3).

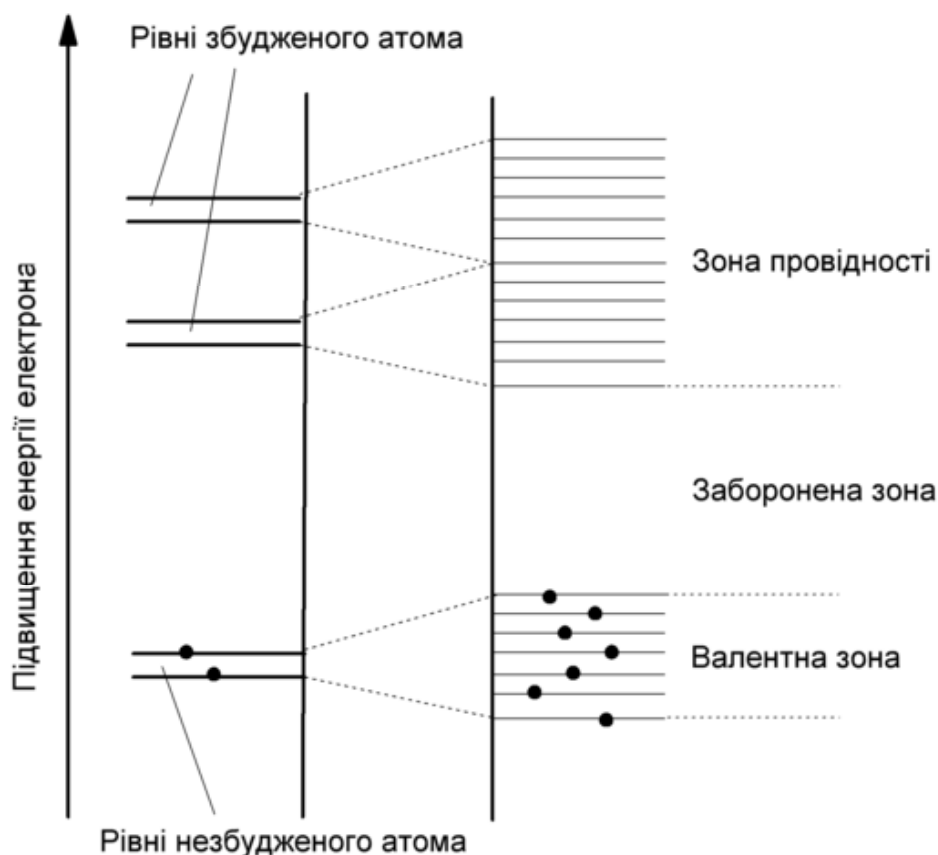


Рисунок 1.3 - Схема розташування енергетичних рівнів ізолюваного атома (ліворуч) та неметалевого твердого тіла (праворуч)

Дозвільні енергетичні зони розділені забороненими інтервалами енергій. Кожна зона має значну кількість енергетичних рівнів. Їх кількість залежить від кількості атомів, з яких складається тверде тіло. Рівні в зоні відстають один від одного по енергії на $10^{-22} - 10^{-23}$ еВ, тобто енергетична зона має майже неперервний спектр.

Саму верхню із заповнених електронами зон звать валентною. Ця зона відповідає енергетичним рівням електронів зовнішньої оболонки атомів. Найближчу до неї вільну від електронів зону звать зоною провідності. Зона, яка розподіляє валентну зону та зону провідності звать забороненою зоною. Щоб валентний електрон зробити вільним треба прикласти до нього енергію більш ніж широчінь забороненої зони.

Розглянемо енергетичну діаграму вуглецю (рисунок 1.4). Його електронна формула: $1s^2 2s^2 2p^2$ (№6). В окремих атомах вуглецю 4 валентних електрони розміщуються по два на рівнях 2s та 2p. При зближенні атомів рівні розщеплюються у зони з ємністю 2 та 6 електронів. При зближенні до відстані X_0 утворюється одна об'єднана не повністю заповнена зона з ємністю 8 електронів на атом. Таке тіло (графіт) проводить електричний струм. Якщо міжатомна відстань зменшується до a_0 ,

то об'єднана зона розщеплюється на дві кожна з ємністю 4 електрони на атом. Ці зони розділені великою забороненою зоною ($\sim 5,3$ еВ) і 4 валентних електрони розміщуються у нижній (валентній) зоні, заповнюючи її цілковито, а верхня зона - вільна, тобто алмаз не має вільних електронів і буде діелектриком.

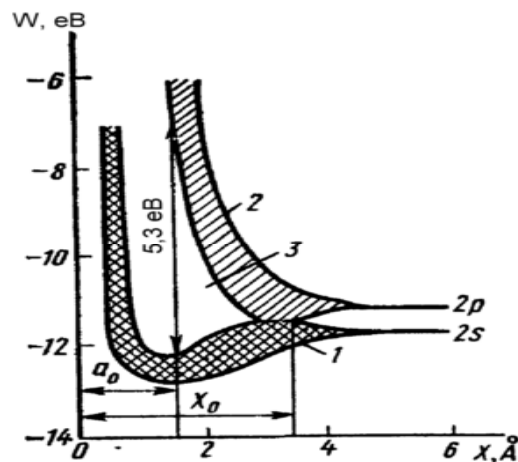


Рисунок 1.4 - Виникнення енергетичних зон при зближенні атомів вуглецю:
1- валентна зона, 2 – зона провідності; 3 – заборонена зона;
 a_0 – відстань між атомами в решітці алмазу,
 X_0 – відстань між атомами в решітці графіту.

1.2.2. Висновки зонної теорії

а) Характер енергетичного спектру металевих провідників, напівпровідників та діелектриків різний. У провідниках валентна зона заповнена або частково, або цілковито і тоді перекривається з зоною провідності. У напівпровідниках та діелектриках зона провідності та валентна зона розділені забороненою зоною, а валентна зона заповнена цілковито. Формально до діелектриків відносять речовини, які мають заборонену зону більше 3 еВ.

б) Діелектриками називають матеріали, у яких в енергетичному спектрі зона провідності та валентна зона розділяються забороненою зоною шириною не менше 3 еВ. Тому теплові коливання атомів не можуть звільнити валентні електрони, і вони мають дуже малу електронну провідність (рисунок 1.5,а).

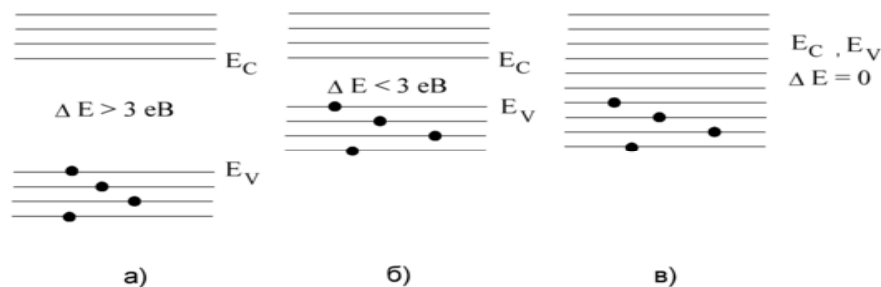


Рисунок 1.5 - Енергетичні зонні діаграми діелектрика (а), напівпровідника (б) та металу (в)

в) Напівпровідником називають матеріали, які в енергетичному спектрі мають заповнену валентну зону та незаповнену зону провідності. Ці зони розділені забороненою зоною шириною від 0 до 3 еВ. Тому теплові коливання атомів можуть додати деяким електронам енергію достатню, щоб стати вільними. Ось чому провідність напівпровідників дуже залежить від зовнішніх факторів: температури, випромінювання, електричного поля та ін. (рисунок 1.5, б).

г) Провідниками називають матеріали у енергетичному спектрі яких валентна зона та зона провідності перекриваються, тому електрони у провідниках вільні і провідники добре проводять електричний струм (рисунок 1.5 в).

д) При температурі, приближеної до абсолютного нуля, діелектрики та напівпровідники не відрізняються один від одного, тоді як провідники найбільше відрізняються від діелектриків та напівпровідників. Треба підкреслити, що розподіл твердих тіл на напівпровідники та діелектрики має в значній мірі умовний характер.

1.3 ВИДИ ХІМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

При зближенні атомів до відстані декілька ангстрем між ними проявляються сили взаємодії. В залежності від характеру руху електронів у сусідніх атомах ці сили можуть бути силами відштовхування чи притягання. Електрони внутрішніх заповнених оболонок тісно пов'язані з ядрами атомів і не приймають участі в утворенні хімічних зв'язків. Хімічний зв'язок визначається тільки електронами зовнішньої оболонки атомів. Розподіляють декілька видів хімічного зв'язку.

1.3.1 Ковалентний зв'язок

Об'єднання атомів у молекулу досягається за рахунок електронів, які стають загальними для сусідніх пар атомів (рисунок 1.6).

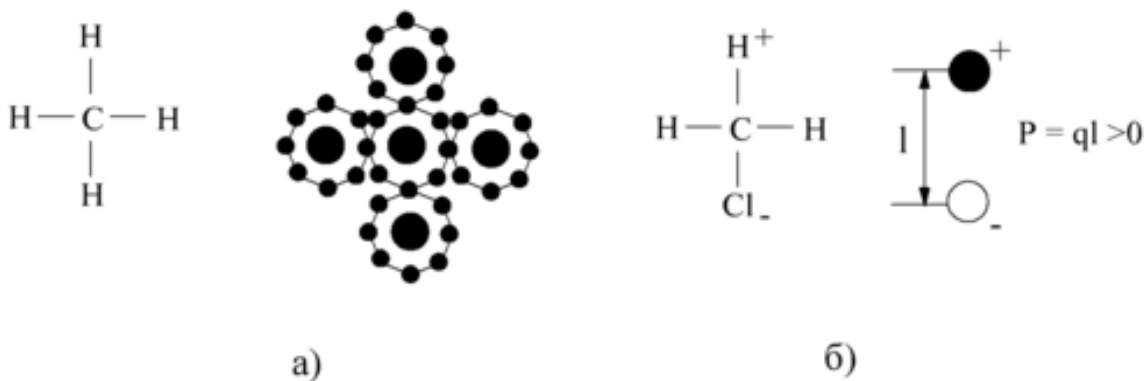


Рисунок 1.6 - Ковалентний зв'язок у неполярних (а) та дипольних (б) молекулах

Щільність негативно зарядженої електронної хмари між позитивно зарядженими ядрами буде найбільшою. В основі ковалентного зв'язку лежить обмінна взаємодія. Сила такої взаємодії дуже залежить від напрямку спинів електронів. Зв'язок буде найдужчим коли спини електронів антипаралельні. Молекули з ковалентним зв'язком можуть бути неполярними чи полярними. Молекули, у яких центри позитивних та негативних зарядів співпадають називають неполярними. Якщо вони не співпадають а знаходяться на деякій відстані один від

одного, то такі молекули називають дипольними (рис.1.6, б). Така молекула має дипольний момент: $p = q \cdot l$ ($p \approx (5 \dots 10) \cdot 10^{-29}$ Кл·м). Ковалентний зв'язок мають гази (водень, метан), тверді тіла (алмаз, кремній). Ковалентний зв'язок має велику міцність. Тому тверді кристалічні речовини мають високу температуру плавлення та велику твердість.

1.3.2 Іонний зв'язок

Він виникає внаслідок переходу валентних електронів від металевого атома до металоїдного та електростатичного притягання іонів різних знаків один до одного. Цей зв'язок має місце в іонних кристалах (рисунок 1.7).

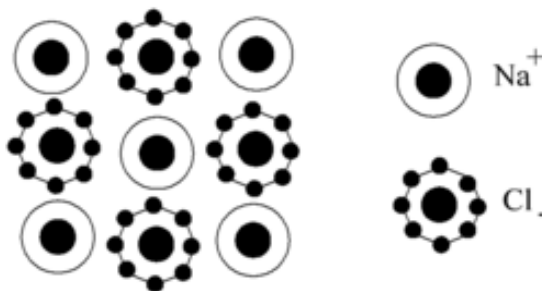


Рисунок 1.7 - Структура іонного зв'язку у кристалічній решітці NaCl

У іонному кристалі комбінації протилежне заряджених іонів не можна ототожнювати з індивідуальними молекулами внаслідок регулярного чергування у вузлах решітки іонів різного сорту. Вірніше рахувати весь монокристал як гігантську молекулу, де кожен іон має велику взаємодію з сусідніми іонами.

Найменшу електронегативність мають атоми лужних металів, які легко віддають електрон. І навпаки, найбільшу електронегативність мають атоми галогенів, які легко приймають електрон для завершення зовнішньої оболонки атома. Чим більша різниця електронегативностей атомів, які приймають участь у створенні зв'язку, тим більший ступень іонності сполуки.

1.3.3 Металевий зв'язок

Він має місце у системах, побудованих з позитивно заряджених атомних ґраток, які знаходяться у середовищі вільних електронів. Притягання між позитивними атомними остовами та електронами обумовлює цілісність металу (рисунок 1.8).

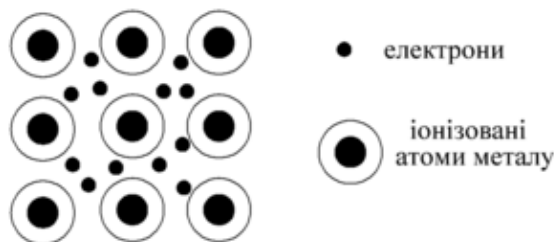


Рисунок 1.8. Структура металевого зв'язку

Особливість металевого зв'язку у тому, що в узагальненні електронів приймають участь усі атоми кристалу та узагальнені електрони не локалізуються поблизу своїх атомів, а вільно пересуваються всередині усієї ґратки, споруджуючи "електронний газ". Не маючи локальних зв'язків, металеві кристали не руйнуються при зміні положень атомів, тобто вони мають пластичність (ковкість) при деформуваннях.

1.3.4 Міжмолекулярний зв'язок

Інакше його називають Ван-дер-Ваальсовським зв'язком. Він має місце у деяких речовинах між молекулами з ковалентним характером всередині молекулярної взаємодії. Наявність міжмолекулярного притягання має місце при узгодженому русі валентних електронів у сусідніх молекулах (рисунок 1.9).

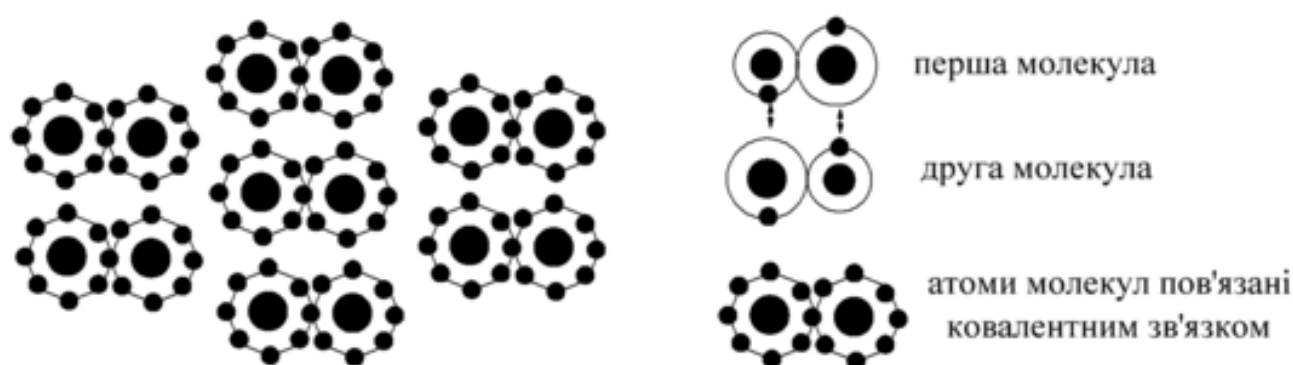


Рисунок 1.9 - Структура міжмолекулярного зв'язку

У будь-який час електрони повинні бути максимально віддалені один від одного та максимально наближені до позитивних ядер. Тоді сили притягання валентних електронів ядром сусідньої молекули будуть сильнішими за сили відштовхування електронних оболонок цих молекул. Це дуже слабкий зв'язок, тому такі речовини мають низьку та розмиту температуру плавлення (температуру розм'якшення). Наприклад, парафін, віск та ін.

1.4 ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ТВЕРДИХ ТІЛ

1.4.1 Класифікація твердих тіл

Тверді тіла бувають кристалічні, аморфні та скляні.

Кристали мають упорядковане періодичне розташування атомів. У періодичній решітці завжди можна виділити елементарну комірку, трансляючи яку у просторі, дуже легко одержати структуру усього кристала. В загальному випадку властивості кристалів залежать від напрямку в кристалічній решітці. Тобто вони мають анізотропію властивостей.

Кристалічні тіла можуть бути у вигляді окремих крупних кристалів (монокристали) чи складатися із сукупності великої кількості дрібних кристалів (полікристал).

Порівняно з кристалами аморфні тіла ізотропні за властивостями та мають випадкове хаотичне розташування молекул. Вони не мають температури плавлення, а тільки інтервал розм'якшення.

У скляних при відсутності періодичності у будові можна спостерігати деякий близький лад, тобто закономірне розташування найближчих сусідів відносно кожного атома. Такий стан можна розглядати як стан дуже переохолодженої рідини з великою в'язкістю. Велика в'язкість перешкоджає утворенню кристалічної фази.

1.4.2 Дефекти кристалічної решітки

В реальних кристалах існують якісь відхилення від регулярного розташування атомів. Такі відхилення називають дефектами кристалічної решітки, їх підрозділяють на динамічні та статичні. Прикладом динамічних дефектів є фонони, тобто тимчасові порушення регулярності решітки, внаслідок теплового руху атомів. Серед статичних розподіляють атомні (точкові) дефекти (наприклад, відсутність атомів, чи наявність чужорідного атома) та протяжні (наприклад, дислокації, дефекти упакування та ін. Дефектами кристалу звать будь-яке порушення трансляційної симетрії кристалічної решітки. За розмірністю розподіляють декілька видів дефектів – нуль мірні (точкові), одномірні (лінійні), двомірні (плоскі) та тримірні (об'ємні) (рисунок 1.10).

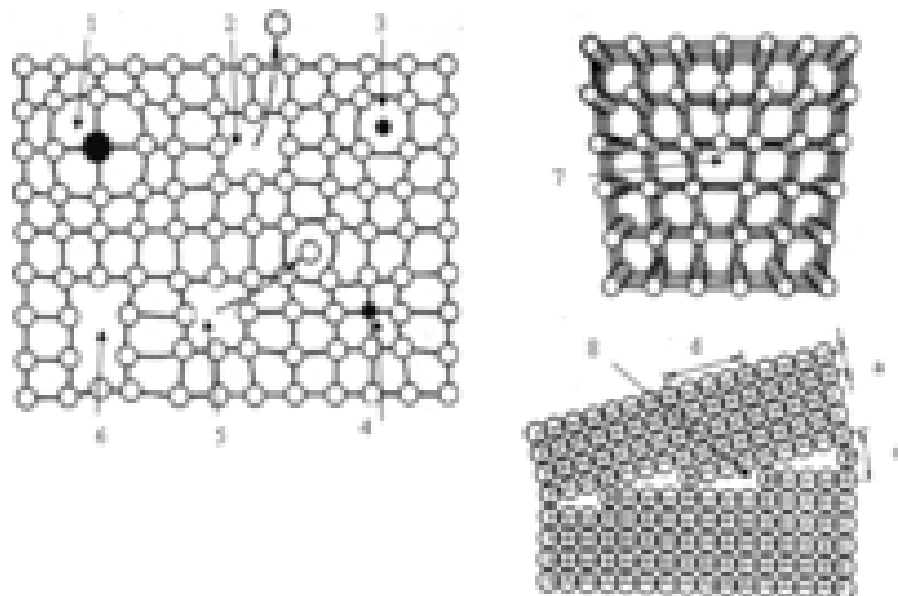


Рисунок 1.10 - Дефекти кристалічної решітки

1, 4 – атоми заміщення; 2 – дефект за Шотткі; 3 – міжвузловий атом, 5 – дефект за Френкелем; 6 – бівакансія; 7 – крайова дислокація, 8 – міжзеренна межа

До **точкових дефектів** відносять всі дефекти, що пов'язані із зсувом або заміною невеликої групи атомів (власні точкові дефекти), а також із домішками. Вони виникають при нагріві, легуванні, під час росту кристалу, внаслідок радіаційного опромінення. Вони можуть вноситись також у результаті імплантації.

Вакансія – вільний, незайнятий атомом вузол кристалічної решітки. В разі зберігання стехіометрії система вакансій отримала назву **дефекту за Шотткі**.

Власний міжвузловий атом – атом основного елемента, що знаходиться у міжвузлі елементарної комірки.

Домішковий атом заміщення - заміна атому одного типа атомом іншого типа у вузлі кристалевної решітки. У положеннях заміщення можуть знаходитись атоми, які за своїми розмірами та електронними властивостями відносно слабо відрізняються від атомів основи.

Домішковий атом проникнення – атом домішки розміщується у міжвузлі кристалевної решітки.

У кристалах часто спостерігаються також комплекси, що складаються з декількох точкових дефектів, наприклад, **дефект за Френкелем** (вакансія + власний міжвузловий атом); **бівакансія** (вакансія + вакансія), **А-центр** (вакансія + атом кисню в кремнії та германії) та ін.

До **одномірних (лінійних)** дефектів відносять такі, що в одному напрямку мають розмір, який значено перевищує параметр решітки, а по двох інших сумірний з ним. До лінійних дефектів відносять дислокації та дисклінації.

Дислокація – межа області незавершеного зсуву в кристалі. Вона характеризується вектором зсуву (вектором Бюргерса) та кутом між ним та лінією дислокації. Якщо цей кут дорівнює нулю, то дислокація є **гвинтовою**, якщо 90° – **крайовою**, інші – змішаного типу, які можуть бути розкладені на гвинтову та крайову складові.

Дисклінація - межа області незавершеного повороту у кристалі, характеризується вектором повороту.

До **двомірних** дефектів відносять поверхню кристалу, межі зерен матеріалу, в тому числі малокутові межі, плоскості двійникування, поверхні розділу фаз та ін.

До **тримірних дефектів** відносять скупчення вакансій, що утворюють пори та канали; частки, що декорують різні дефекти (наприклад пухирці газу або маточного розчину); скупчення домішок у вигляді секторів та зон росту.

1.4.3 Індеси Міллера

Внаслідок анізотропії властивостей кристалів треба визначати орієнтацію граней та направлення у кристалі.

Для цього використовують індеси Міллера, які вибирають таким засобом. Нехай треба зафіксувати у кристалі плоскість, яка перетинає три осі X,Y,Z у точках А,В,С та відсікає на осях відрізки а, b, с відповідно (рисунок 1.11).

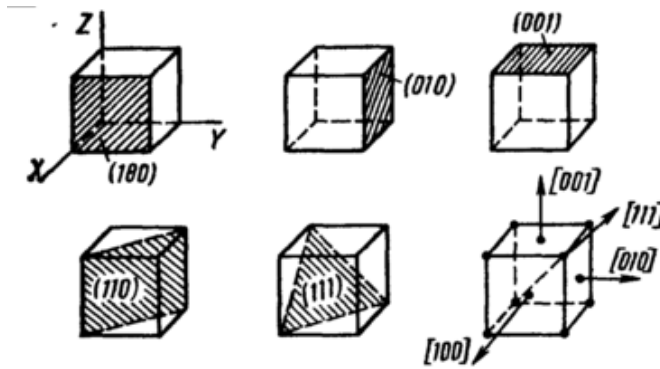


Рисунок 1.11 - Позначення плоскостей та напрямків у кубі за допомогою індексів Міллера

Позначимо в одиницях періоду ґратки зворотні значення цих відрізків як p, q, r . Найменші цілі числа з такими ж відношеннями як $i : p : q : r$ позначимо як h, k, l .

Останні звуть індексами Міллера.

Оскільки період решітки прийнято за 1, то усі атомні грані будуть виглядати як цілі числа чи нулі. Позначення граней чи плоскостей у кристалі надають у круглих дужках, а позначення напрямку, перпендикулярного плоскості - у квадратних дужках.

Контрольні питання до розділу 1

1. Як класифікують матеріали електронної техніки?
2. Як виникають енергетичні зони у твердому тілі?
3. Дайте визначення діелектрика, провідника та напівпровідника з точки зору зонної теорії?
4. Які види хімічного зв'язку вам відомі?
5. Які дефекти кристалічної структури існують у твердих речовинах?
6. Як визначаються напрямлення та плоскості у кристалічній решітці?

2 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Провідники розподіляють на провідники 1-го та 2-го роду.

Провідниками першого роду називають ті, провідність яких зумовлена електронами. До них відносять, в першу чергу, метали, як в твердому так і рідкому стані, а також провідникові модифікації вуглецю (графіт).

Провідниками другого роду називають ті, провідність яких зумовлена іонами. В першу чергу це розчини та розплави солей, кислот та лугів. Проходження струму через такі провідники, пов'язане з пересуванням іонів, внаслідок чого на електродах виділяються продукти електролізу, а склад електроліту змінюється.

2.1 ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ЕЛЕКТРОНІВ У МЕТАЛАХ

Згідно квантової хвильової механіки електрони в металах слід розглядати при звичайних температурах, як “вироджений газ”. У цьому стані енергія газу практично не залежить від зміни температури. Тепловий рух не змінює значно енергію електронів, а теплова енергія витрачається на теплові коливання вузлів кристалічної решітки металу. Внаслідок цього середня теплова швидкість електронів не змінюється з температурою. Середня швидкість направленого руху електронів під дією електричного поля залежить від вірогідності зіткнення електронів з вузлами кристалічної решітки, що обмежує їх швидкість.

В електронному газі, який знаходиться в стані впровадження, швидкості хаотичного руху електронів визначаються не температурою тіла, а концентрацією вільних електронів. Концентрація вільних електронів в металах велика (близько 10^{28} м^{-3}), що зумовлено особливістю металевого зв'язку. Тобто практично усі валентні електрони в металах вільні. Але енергії цих електронів різні.

Усі рівні з енергією менше рівня Фермі з імовірністю більше 0,5 заповнені електронами та навпаки рівні з енергією більше рівня Фермі з імовірністю більше 0,5 вільні від електронів. Розподіл електронів за енергією можна представити малюнком, який зображений на рисунку 2.1.

Поведінка електронів в металах описується статистикою Фермі - Діраку. При температурі 0 K концентрація електронів дорівнює

$$N = (8\pi/3) \cdot (2m_n^*/h^2)^{3/2} \cdot W_F^{3/2}, \quad (2.1)$$

де h - постійна Планка;

W_F - енергія рівня Фермі.

Внаслідок впровадження у процесі електропровідності приймають участь не усі вільні електрони, а тільки ті, які мають енергію більшу енергії Фермі. Під впливом електричного поля проходить розсіяння електронів під більшими кутами у процесі їх пружних штовхань з вузлами решітки. Внаслідок цього зростає збиток швидких електронів, які рухаються напроти поля, та дефіцит швидких електронів з протилежним направленням швидкості. Концентрація вільних електронів в чистих металах різниться незначно і практично не залежить від температури, оскільки у впровадженному електронному газі енергія Фермі змінюється незначно.

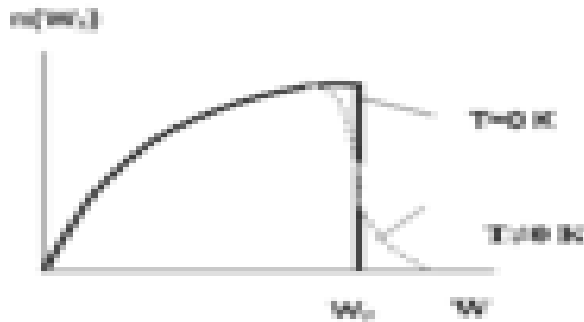


Рисунок 2.1 - Розподіл електронів по енергіям у металах

Згідно квантовій теорії електропровідність металів дорівнює

$$\sigma = e^2 n \lambda_{\text{віль}} / (m_n \cdot V_T) = (e^2 n^{2/3} \lambda_{\text{віль}} / h) \cdot (8\pi/3)^{1/3}, \quad (2.2)$$

де V_T - теплова швидкість електронів;

$\lambda_{\text{віль}}$ - довжина вільного пробігу електронів, яка залежить від температури.

Тобто електропровідність металів не повинна залежати від температури. Залежність провідності від температури можна пояснити хвильовим характером руху електронів.

З фізики відомо, що електрони мають властивість корпускулярно-хвильового дуалізму. Тобто рух електронів можна розглядати як пересування плоских хвиль. В періодичному потенціальному полі, яке має ідеальна кристалічна решітка, така хвиля повинна пересуватися без втрат (без згасання). А це означає, що довжина пробігу електронів повинна бути нескінченною, тоді згідно (2.2) і електропровідність металів повинна бути нескінченною. Але в дійсних кристалах мають місце дефекти решітки: динамічні - теплові коливання вузлів кристалічної решітки; статичні - одномірні, лінійні дефекти решітки.

Ці дефекти відіграють роль центрів розсіяння, що обмежує довжину вільного пробігу, а внаслідок метали мають кінцевий питомий опір. Таким чином питомий опір металевих провідників залежить в першу чергу від довжини вільного пробігу.

Контрольні питання до підрозділу 2.1

1. Які особливості поведінки електронів у металах?
2. Чому існує залежність питомого опору металів від температури?

2.2 ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКІВ

У чистих досконалих металах єдиною причиною, яка обмежує довжину вільного пробігу, є теплові коливання вузлів кристалічної решітки (фонони). Питомий опір металу, зумовлений цим фактором, позначимо як ρ_T . З ростом температури зростають амплітуди фононів та пов'язані з цим флуктуації періодичного поля решітки. Електрони, рухаючись в кристалічній решітці під впливом електричного поля, розсіваються на таких коливаннях. Це зменшує довжину вільного пробігу електронів і викликає зростання питомого опору. Якщо

мати спрощену одновірну модель решітки, то довжина вільного пробігу електронів визначається як

$$\lambda_{\text{віль}} = 1 / [\pi (\Delta a)^2 N], \quad (2.3)$$

де $\lambda_{\text{віль}}$ - довжина вільного пробігу;

Δa - амплітуда фононів;

N - концентрація атомів в металі.

Потенціальна енергія атома, відхиленого на Δa від вузла решітки:

$$W_n = \frac{1}{2} \cdot K_{\text{пр}} (\Delta a)^2, \quad (2.4)$$

де $K_{\text{пр}}$ - коефіцієнт пружності зв'язку.

Згідно класичній статистиці середня енергія одновірного гармонічного осцилятора дорівнює KT . Тоді

$$\frac{1}{2} \cdot K_{\text{пр}} (\Delta a)^2 = KT, \quad (2.5)$$

де K - постійна Больцмана.

Тоді з (2.4), (2.5) маємо

$$\lambda_{\text{віль}} = [K_{\text{пр}} / (2 \pi K N)] \cdot (1/T) \quad (2.6)$$

Якщо підставити (2.6) в (2.2), те

$$\rho_T = 1 / \sigma_T = [(2 \pi m_n^* K V_T) / (e^2 K_{\text{пр}})] \cdot T = B \cdot T \quad (2.7)$$

Тобто з ростом температури питомий опір чистих металів повинен зростати лінійно. Дійсно ця залежність більш складна (рисунок 2.2).

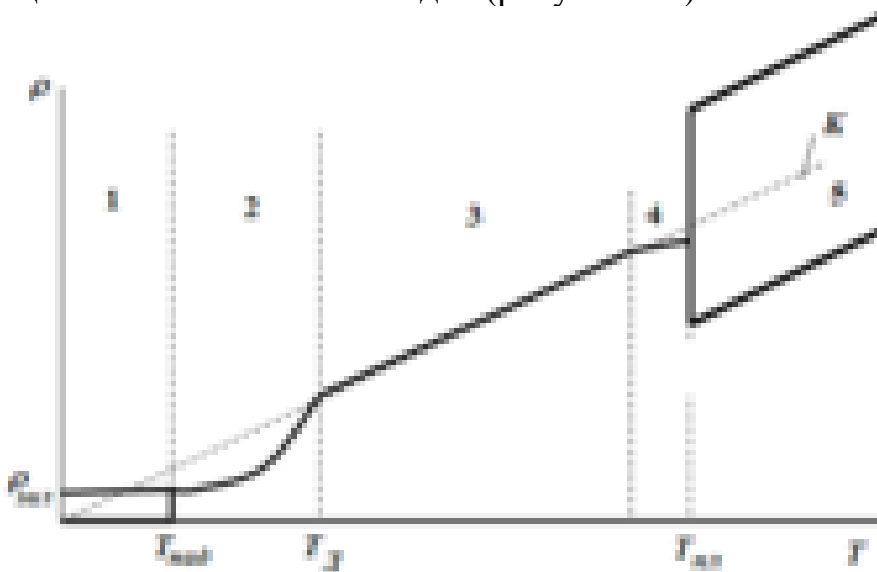


Рисунок 2.2 - Залежність питомого опору від температури (K – теоретична залежність згідно (2.7))

На ділянці 3 при кімнатних температурах залежність $\rho = f(T)$ лінійна, як це пояснюється згідно (2.7). Тобто з ростом температури зростають амплітуди теплових коливань вузлів кристалічної решітки, що зменшує довжину вільного пробігу електронів.

На ділянці 4 поблизу температури плавлення існує деяка нелінійність, що пов'язане з іншими механізмами розсіяння електронів.

При переході металу з твердого стану в рідкий (температура плавлення $T_{пл}$) може мати місце, як різке зростання питомого опору (а), так і його зменшення (б). Це пов'язане зі зміною кристалічної решітки.

Якщо при плавленні об'єм металу зростає, що має місце для більшості металів, то відстань між атомами теж зростає, металевий зв'язок зменшується, а амплітуда фононів зростає, що зменшує довжину вільного пробігу електронів, тобто її опір зростає.

Для деяких металів (вісмут, галій) при плавленні об'єм металу зменшується, що посилює зв'язки між атомами, амплітуда фононів зменшується і питомий опір теж зменшується.

На ділянці 5 метали знаходяться в рідкому стані і мають кристалічну решітку, тому залежність питомого опору від температури пояснюється подібними причинами, як на ділянці 3.

На ділянці 2, нижче температури Дебая (T_D) змінюється частота теплових коливань вузлів кристалічної решітки, тому залежність $\rho = f(T)$ нелінійна і підкоряється:

$$\rho = A \cdot T^n, \quad (2.8)$$

де n - змінюється від 1 до 5.

На ділянці 1 деякі метали мають кінцевий опір ($\rho_{зал}$) навіть при температурі $T=0$ К. Це пов'язане з наявністю в металі статичних дефектів решітки, перш за все домішку. Це дозволяє оцінювати чистоту металів по відношенням ρ_{300K} / ρ_{4K} , де ρ_{300K} , ρ_{4K} - згідно питомий опір металу при 300 К та 4,2 К (рідкий гелій). Чим менше це відношення, тим чистіше метал.

Деякі метали при температурі нижче $T_{над}$ мають різке зниження питомого опору до нуля. Таке явище називають надпровідністю.

Контрольні питання до підрозділу 2.2

1. Як залежить питомий опір чистих металів від температури?
2. Пояснить поведінку опору чистих металів на різних ділянках.

2.3 ЯВИЩЕ НАДПРОВІДНОСТІ

Явище, коли при деякій температурі питомий опір провідника різко зменшується до нуля, називають надпровідністю, а температуру - температурою надпровідникового переходу.

Вперше надпровідність виявили у 1911 у ртуті ($T_{над}=4,2$ К). Якщо в кільці з надпровідника ініціювати електричний струм, то він не буде затухати тривалий час. Оцінка питомого опору надпровідника дорівнює 10^{-25} Ом·м, що в 10^{17} разів менше

звичайного для металів. Зміна опору проходить у вузькому температурному інтервалі (10^{-3} - 10^{-4} K).

2.3.1 Фізична природа надпровідності

Явище надпровідності було пояснено тільки у 1957 р. на основі засобів квантової механіки. Явище надпровідності виникає тоді, коли електрони притягаються один до одного. Це можливо тільки в середовищі, яке має позитивно заряджені іони, електричне поле яких послаблює сили кулонівського відштовхування між електронами. Коли таке притягнення має місце, то електрони з протилежним направленням спинів та імпульсу зв'язуються у кулонівські пари, які зветься куперівськими. У виникненні куперівських пар відіграють роль фонони. В твердому тілі електрони можуть як поглинати, так і народжувати фонони. Один з електронів, взаємодіючи з ґраткою, переводить її у збуджений стан і змінює свій імпульс; другий електрон також, взаємодіючи з решіткою, переводить її у нормальний стан і також змінює свій імпульс. Тобто, стан решітки не змінюється, а електрони обмінюються квантами теплової енергії - фононами. Обмінна фононна взаємодія і викликає сили притягання між електронами, які перевищують сили кулонівського відштовхування. Електрон, який рухається поперед позитивних іонів, поляризує решітку, тобто притягує до себе сусідні іони. Тоді навколо траєкторії електрона локально зростає щільність позитивного заряду. Другий електрон, який рухається слідом за першим, буде притягуватися позитивним зарядом. Тоді побічно між електронами 1 та 2 виникнуть сили притягання (рисунок 2.3).

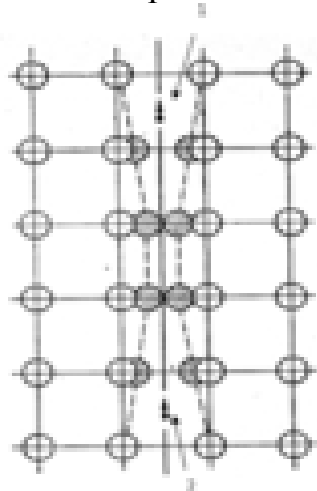


Рисунок 2.3 - Схема виникнення електронних пар у надпровідному металі

Куперівські пари слабо локалізовані в просторі і перекривають тисячі електричних комірок. Вони безперервно виникають та розпадаються. Це приводить до виникнення в енергетичному спектрі надпровідника енергетичної щілини 2Δ (рисунок 2.4.).

Спарені електрони розташовуються на дні енергетичної щілини. Їх кількість приблизно 10^{-4} від загального числа електронів. Розмір енергетичної щілини залежить від температури, яка досягає максимуму при абсолютному нулі і зникає при температурі надпровідного переходу ($T=T_{\text{над}}$).

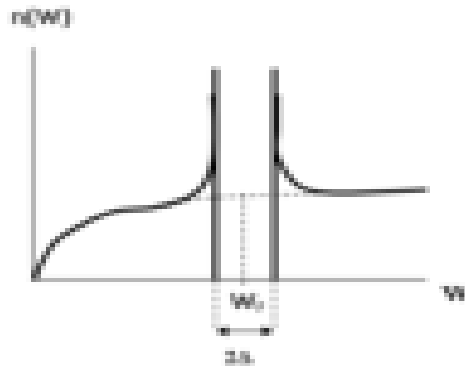


Рисунок 2.4 - Розподіл електронів за енергією у металі в стані надпровідності

У звичайних умовах питомий опір металу зумовлений розсіянням електронів на теплових коливаннях решітки та на домішках. Але при наявності енергетичної щілини для переходу електронів зі звичайного стану у збуджений потрібна достатня порція теплової енергії, яку при низьких температурах електрони не можуть одержати від решітки, оскільки енергія теплових коливань менш за широчину щілини. Тому куперівські пари не розсіюються на дефектах структури. Фактично рух усіх куперівських пар можна розглядати як розповсюдження однієї електронної хвилі, яка не розсіюється ґраткою, а “обтікає” дефекти решітки. Наявність домішки та дефектів решітки не знищує явище надпровідності, а викликає тільки розширення температурного інтервалу переходу зі звичайного стану в надпровідність.

В надпровідниках зовнішнє поле не проникає в товщу зразка, гасне у тонкому шарі. Силкові лінії магнітного поля огинають надпровідник (ефект Мейсснера). Тобто надпровідники є ідеальними діамагнетиками з магнітною проникністю, що дорівнює нулю. З магнітного поля надпровідники виштовхуються. Але коли напруженість магнітного поля перевищує деяке критичне значення $H_{\text{над}}$, то стан надпровідності зникне (рисунок 2.5).

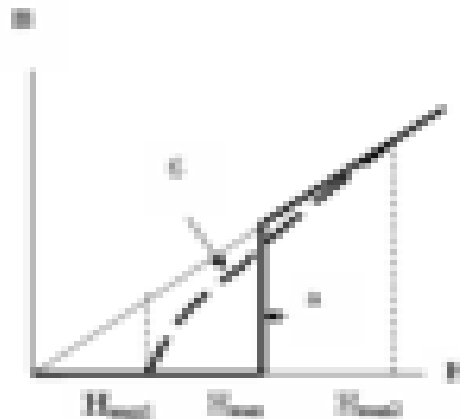


Рисунок 2.5 - Залежність індукції магнітного поля усередині надпровідника від напруженості зовнішнього магнітного поля для надпровідників 1-го роду (а) і 2-го роду (б)

За характером переходу металу із звичайного стану в надпровідний, напівпровідники підрозділяють на надпровідники 1-го та 2-го роду. У надпровідників 1-го роду цей перехід проходить стрибком (рисунок 2.5,а), а у надпровідників 2-го роду - поступово (рисунок 2.5, б). Критична напруженість поля залежить від температури. При $T=T_{\text{над}}$ вона дорівнює нулю та зростає до максимуму

при $T=0$ К. Критична напруженість для надпровідників 1-го роду досягає 10^5 А/м, а 2-го роду - 10^7 А/м. Надпровідність може бути зруйнована не тільки зовнішнім магнітним полем, але й струмом, якщо він перевищує критичне значення. В надпровідниках 2-го роду він досягає $2 \cdot 10^9$ А/м².

2.3.2 Надпровідні матеріали

При низьких температурах надпровідність мають 26 металів, але для більшості з них $T_{\text{над}} < 4,2$ К. Наприклад, ванадій 5,13 К, індій 3,405 К, ніобій 9,2 К, свинець 7,2 К. Усі метали є надпровідниками 1-го роду, а металеві сплави - надпровідники 2-го роду. Останні мають більш велику температуру переходу в надпровідний стан. Наприклад, V_3Ga - 14,8 К; Nb_3Ga - 20,3 К, Nb_3Ge - 21-24,3 К. Як можна бачити температура переходу мала. Додаткова температура рідкого водню 22 К. Це обмежує використання надпровідників. Але у 1987 році явище надпровідності було відкрито у керамічних матеріалах складу $La_{1,8}Sr_{0,2}CuO_4$. Температура надпровідного переходу у таких матеріалах досягає 100-110 К. Тоді, як температура рідкого азоту - 77 К. Це значно полегшує використання надпровідників. Однак слід відзначити, що отримані матеріали є нестійкими. Високотемпературне явище надпровідності в сучасний час досі не пояснене.

2.3.3 Використання надпровідників

Одним з найзначніших використання надпровідників пов'язане з одержанням надпотужних магнітних полів. Надпровідникові соленоїди мають змогу утворювати однорідні магнітні поля напруженістю більш 10^7 А/м у досить великому об'ємі, тоді як звичайні максимум 10^5 А/м. Крім того такі надпровідні соленоїди не потребують значного струму. Такі поля необхідні для удержання плазми в термоядерних реакторах, в синхрофазотронних, індукційних накопичувачах енергії, електричних машинах, трансформаторах. Перспективне використання надпровідників для передачі електроенергії як на постійному, так і змінному струмах. В радіотехніці їх використовують як об'ємні резонатори, що мають велику добротність. Магнітні властивості надпровідників використовують для утворення "магнітних подушок". Надпровідники використовують як запам'ятовуючі комірки в ЕОМ, так звані кріотрони.

Відкриття високотемпературної надпровідності різко полегшує використання надпровідників.

Контрольні питання до підрозділу 2.3.

1. Що таке надпровідність?
2. Які надпровідні матеріали Вам відомі?
3. Чим обумовлена нелінійність залежності питомого опору від температури на ділянці нижче температури Дебая?
4. В чому полягає ефект Мейсснера?

2.4 ОСОБЛИВОСТІ ОПОРУ В МЕТАЛАХ

2.4.1 Вплив домішки на питомий опір металевих провідників

Як уже говорилося причинами розсіювання електронів у металах є не тільки теплові коливання вузлів кристалічної решітки, але і наявність статичних дефектів, які перш за все пов'язані з домішкою. Розсіювання на статичних дефектах не залежить від температури. Тому при абсолютному нулі опір дійсних металів залишається кінцевим. Внаслідок цього впливає правило Маттисена про адитивність питомого опору

$$\rho_{\text{пр}} = \rho_{\text{т}} + \rho_{\text{зал}}, \quad (2.9)$$

де $\rho_{\text{пр}}$ - повний опір металу з домішкою;

$\rho_{\text{т}}$ - опір, зумовлений розсіюванням електронів на теплових коливаннях вузлів кристалічної решітки;

$\rho_{\text{зал}}$ - залишковий опір, зумовлений розсіюванням електронів на статичних дефектах решітки.

Найбільший вклад в залишковий опір вносить розсіювання на атомах домішки, які практично завжди є у металах. Тому довжина вільного пробігу у металах з домішкою складається з

$$1/\lambda_{\text{віль}} = 1/\lambda_{\text{т}} + 1/\lambda_{\text{д}}, \quad (2.10)$$

де $\lambda_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{д}}$ - довжина вільного пробігу електронів на теплових коливаннях та домішку, відповідно.

Довжина пробігу $\lambda_{\text{д}}$:

$$1/\lambda_{\text{д}} \approx N_{\text{д}} S_{\text{д}}, \quad (2.11)$$

де $N_{\text{д}}$ - концентрація атомів домішки;

$S_{\text{д}}$ – ефективна площа розсіювання електронів атомом домішки

Тоді питомий опір провідника з домішкою

$$\rho_{\text{пр}} = \rho_{\text{т}} + m_{\text{n}}^* V_{\text{T}} N_{\text{д}} S_{\text{д}} / (e^2 n) = B \cdot T + C \cdot N_{\text{д}} \cdot S_{\text{д}}. \quad (2.12)$$

Тобто наявність домішки збільшує питомий опір металу, але залишається лінійність його залежності від температури (рисунок 2.6).

Різні домішки по різному впливають на опір металу. Це залежить від деформацій кристалічної решітки атомом домішки. Чим більша різниця в розмірах власних атомів та атомів домішки, тим більший залишковий опір. Тобто виконується правило Лінде:

$$\Delta \rho_{\text{зал}} = a + b(\Delta Z)^2, \quad (2.13)$$

де $\Delta \rho_{\text{зал}}$ - зміна залишкового опору при зміні домішки;

ΔZ - різниця валентностей власного атома та атому домішки;

a, b - константи.

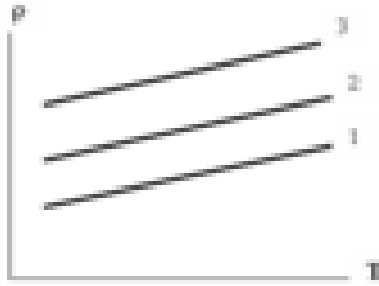


Рисунок 2.6 - Температурна залежність опору металів із домішкою:
1 – чистий метал; 2 – легування металом; 3 – легування металоїдом

Таким чином на опір металів в меншій мірі впливають атоми домішки металу, а в більшій - металоїдів. Механічні напруги утворюють додаткові дефекти решітки, тому вони підвищують опір металів. Відпалювання металів сприяє зменшенню таких дефектів та зниженню опору.

В техніці поширено використовують металеві сплави, які мають значну концентрацію атомів домішки, із структурою неупорядкованого твердого розчину. Статичний розподіл атомів різного сорту по вузлах кристалічної решітки викликає значні флуктуації періодичного поля кристалу, що дуже розсіює електрон. Але в неупорядкованих твердих розчинах, здебільшого з добавкою домішки, змінюється тільки період решітки. Тому дійсний закон Нордгейму, коли зміна залишкового опору пропорційна концентрації домішки

$$\Delta\rho_{\text{зал}} = C \cdot x_A \cdot x_B = C \cdot x_B (1 - x_B) = C x_A (1 - x_A), \quad (2.14)$$

де C - константа; x_A , x_B - атомні долі компонентів у сплаві.

Тобто в бінарних твердих розчинах А-В залишковий пір зростає, як при добавленні атомів В до металу А, так і при добавленні атомів А до металу В (рисунок 2.7).

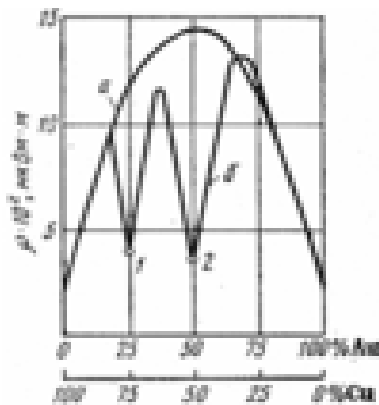


Рисунок 2.7 - Температурна залежність питомого опору сплавів **Au,Cu**
а – неупорядкований сплав; б – упорядкований сплав

Залишковий опір досягає максимуму при $x_A = x_B = 0,5$.

Закон Нордгейму описує зміну залишкового опору для безперервних неупорядкованих твердих розчинів. Якщо сплав відпалити, то він може стати упорядкованим і, якщо при цьому виникають інтерметалеві з'єднання, які мають власну кристалічну решітку, то залежність залишкового опору розподіляється на

частини, згідно числу інтерметалевих з'єднань . При виникненні інтерметалевих з'єднань кристалічна решітка упорядковується і залишковий опір зникає.

Таким чином, питомий опір металевих сплавів завжди вище опору чистих металів. Ця властивість використовується для одержання високоомних провідникових матеріалів.

2.4.2. Температурний коефіцієнт питомого опору

Ним називається відносна зміна питомого опору провідника при зміні температури на 1 К

$$\alpha_p = 1/\rho \cdot d\rho/dT . \quad (2.15)$$

Оскільки при кімнатних температурах опір металевого провідника зростає, то знак α_p завжди позитивний.

Для чистих металів

$$\alpha_p^{me} = 1/\rho_T \cdot d\rho_T/dT = 1/(BT) \cdot B = 1/T . \quad (2.16)$$

Тобто, α_p чистих металів при кімнатній температурі має значення приблизно $0,004K^{-1}$.

З ростом температури змінюються лінійні розміри. Тому

$$\alpha_p = \alpha_R + \alpha_L \quad (2.17)$$

де α_L - температурний коефіцієнт лінійного поширення матеріалу;

α_R - температурний коефіцієнт опору металу.

Для чистих металів $\alpha_p \gg \alpha_L$, тому $\alpha_p \approx \alpha_R$. Для термостабільних сплавів це невірно.

Наявність домішки зменшує значення α_p :

$$\begin{aligned} \alpha_p^{спл} &= 1/\rho^{спл} \cdot d\rho^{спл}/dT = 1/(\rho_{ост} + \rho_T) \cdot d(\rho_{ост} + \rho_T)/dT = 1/[1 + \rho_{ост} / \rho_T] \cdot 1/\rho_T \cdot d\rho_T/dT = \\ &= \alpha_p^{me} / [1 + \rho_{ост} / \rho_T] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Таке зменшення α_p з концентрацією домішки пояснюється тим, що в металах розсіяння електронів на дефектах решітки може компенсуватися в деяких випадках, незначним зростанням кількості електронів з енергією більше енергії рівня Фермі, які приймають участь в електричному струмі. Тому іноді металеві сплави мають також і негативний α_p .

Це явище використовується для виготовлення термостабільних сплавів, наприклад, константану (рисунок 2.8). Сплав з 60 % Ni та 40 % Cu має великий опір ($\sim 0,5$ мкОм·м) та дуже малий температурний коефіцієнт (менше $10^{-6} K^{-1}$). Тому його звуть константаном.

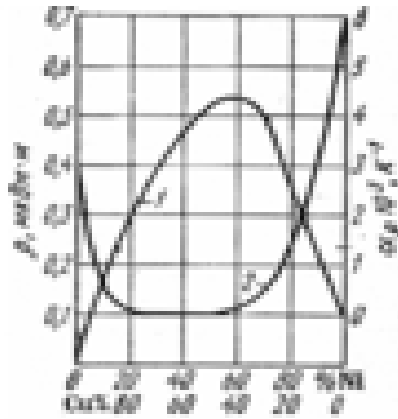


Рис. 2.8. Залежність питомого опору (1) та температурного коефіцієнта питомого опору (2) мідно-нікелевих сплавів від складу

2.4.3 Особливості опору провідників на великих частотах

На великих частотах має місце нерівномірний розподіл електричного струму по перетину провідника: щільність струму максимальна на поверхні і зменшується у глибині провідника. Таке явище називають поверхневим ефектом (скін-ефектом). Нерівномірний розподіл струму пов'язаний з впливом магнітного поля того ж самого провідника. Зчеплений з дротом магнітний потік пропорційний струму

$$\Phi = L \cdot I, \quad (2.19)$$

де L - індуктивність провідника;

I – струм.

Зміна магнітного потоку викликає появу Е.Р.С. самоіндукції

$$E_L = - L \cdot dI/dt. \quad (2.20)$$

Якщо струм змінюється згідно синусоїдальному закону, то Е.Р.С. пропорційна частоті

$$E_L = - \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos(\omega t). \quad (2.21)$$

Вона має протилежне направлення електричному струму та гальмує його зміну згідно закону Ленца.

При проходженні електричного струму змінне магнітне поле виникає, як всередині провідника так і зовні. Потокозчеплення максимальне для центральної частини дроту та мінімальне на поверхні. Тому Е.Р.С. самоіндукції максимальна у центрі дроту і мінімальна у поверхні. Це зменшує щільність струму у центрі. З ростом частоти відбувається “витягування” струму до поверхні.

Якщо в дроті прийняти направлення струму по осі X , а нормаль від поверхні за вісь Z , тоді розподіл струму по перетину провідника

$$j_x(Z) = I_0 \cdot \exp(-Z/\Delta), \quad (2.22)$$

де I_0 - щільність струму на поверхні;

Δ - глибина проникнення струму в провідник (товщина скін-шару).

Тобто широчінь скін-шару - це поверхнева товщина провідника, за межами якої міцність струму зменшується у e -разів (у число Ейлера):

$$\Delta = [2 / (\omega \sigma \mu_0)]^{1/2}, \quad (2.23)$$

де μ_0, μ - магнітна постійна та магнітна проникність, відповідно;

σ - питома електропровідність.

ω - кутова частота поля.

При достатньо великих частотах струм проводить тільки поверхневий шар провідника, тому його опір значно вище ніж для постійного струму. Так, при частоті 50 Гц для міді $\Delta \cong 1$ см, для 1 МГц - 80 мкм, для 10 МГц - 30 мкм, 100 МГц - 7 мкм, 1000 МГц - 3 мкм.

Ось чому поверхня СВЧ провідників відіграє значну роль. Поверхню НВЧ провідників покривають сріблом, оскільки срібло має мінімальний питомий опір серед металів, а сам провідник роблять пустотілим. Крім того це сприяє захисту від корозії.

2.4.4 Особливості опору тонких металевих плівок

Металеві плівки широко використовуються в мікроелектроніці, як міжелементні з'єднання, контактні площини, обклади конденсаторів, магнітних та резистивних елементів ІМС. Електричні властивості тонких плівок металів значно відрізняються від властивостей об'ємних зразків. Це залежить в першу чергу від структури плівки, яка може змінюватися від неупорядкованого дрібнодисперсного стану (амфотерний конденсат) до досить досконалого стану (епітаксійні плівки). Другою причиною є проявлення розмірних ефектів, пов'язаних з поверхнею, коли товщина плівки сумірна з середньою довжиною вільного пробігу електронів.

У цьому випадку питомий опір починає залежати від геометричних розмірів зразка. Структура плівки має значні зміни на різних етапах їх конденсації. У більшості плівок, в залежності питомого опору від товщини плівки, спостерігаються три ділянки (рисунок 2.9)

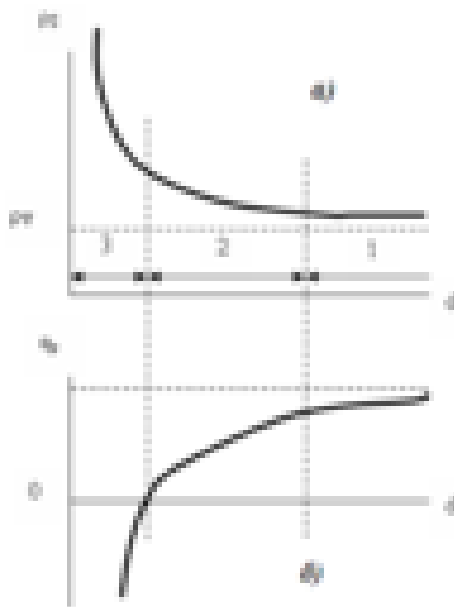


Рисунок 2.9 - Залежність питомого опору (а) і температурного коефіцієнта питомого опору (б) від товщини плівки

Ділянка 1 відповідає товщині більше 0,1 мкм. У цієї ділянці питомий опір плівки приблизно дорівнює об'ємному зразку. Ділянка 2 охоплює товщини від 0,1 до 0,01 мкм. На цій ділянці питомий опір плівки вище об'ємного, а температурний коефіцієнт наближається до нуля. На ділянці 3 з товщиною менше 10^{-3} мкм питомий опір дуже значний, а температурний коефіцієнт негативний.

Для пояснення цього треба врахувати, що тонкі плівки на перших стадіях конденсації мають острівкову структуру.

Електропровідність плівки виникає при деякій мінімальній кількості осаджуваного металу, але до виникнення містків, що з'єднують островки металу. При прикладенні поля електрони переходять крізь вузькі діелектричні зазори між сусідніми островами за рахунок термоелектронної емісії та тунелювання.

Перехід електронів поліпшується з ростом температури, а питомий опір лімітується поверхневим опором ділянок підкладки, де немає зерен металу. Тоді з ростом температури питомий опір падає, а температурний коефіцієнт має негативний знак.

По мірі росту кількості осаджуваного металу, зазори між островами зменшуються та провідність плівки зростає. Коли виникає цільна плівка металу знак температурного коефіцієнта стає позитивним, але значення питомого опору велике внаслідок наявності у тонкій плівці значної кількості дефектів структури: дислокацій, міжзерених меж, вакансій та інших. Зростанню питомого опору сприяє також зменшення довжини вільного пробігу електронів - за рахунок їх додаткового розсіювання поверхневим шаром плівки.

Ось чому для оцінки опору металевих плівок, як і у випадку з діелектриками, використовують поверхневий питомий опір, значення якого залежить від товщини плівки.

2.4.5 Питома теплопровідність металів

Метали мають велику теплопровідність, що зумовлено великою кількістю вільних електронів. Так, мідь має питому теплопровідність 406 Вт/м·К, а срібло 453 Вт/м·К, алюміній 218 Вт/м·К, що значно вище ніж у діелектриків.

Питома теплопровідність та електропровідність металів пов'язані законом Відемана-Франца

$$\lambda_T / \sigma = L_0 T, \quad (2.24)$$

де λ_T - питома теплопровідність;

σ - питома електропровідність;

L_0 - число Лоренца.

Оскільки на ділянці кімнатних температур питома електропровідність падає пропорційно температурі, то згідно (2.24), питома теплопровідність металів не повинна залежати від температури.

Це слідство з закону Відемана-Франца виконується для більшості металів. Його використовують в техніці, при використуванні металів як радіаторів для охолодження потужних напівпровідникових приладів.

Для цієї мети треба використовувати метали з великим значенням питомої теплопровідності. Перш за все це сплави на основі алюмінію (силумін), які мають добрі теплові, механічні та антикорозійні властивості.

Мідь не можна використовувати внаслідок її поганої корозійної стійкості, а срібло - внаслідок великої вартості.

2.4.6 Контактні явища та термоелектрорушійна сила (термо-Е.Р.С.)

При з'єднанні двох різних металів, між ними виникає контактна різниця потенціалів. Згідно квантової теорії причиною цього є різна енергія Фермі у металах, які стикаються. Нехай в ізольованому стані електронний газ в металах А і В має енергію Фермі W_F^A та W_F^B , яка відраховується від дна зони провідності (рис. 2.10).

Термодинамічна робота виходу електронів дорівнює, відповідно, χ_A та χ_B . Оскільки кінетична енергія електронів, що знаходяться на рівні Фермі в різних металах, різна, то при контактуванні матеріалів виникає більший перехід електронів з металу В з більшим значенням енергії Фермі в метал, де ця енергія менша. Наприклад, з металу В у метал А. Внаслідок цього метал В заряджається позитивно, а метал А - негативно. Між ними виникає різниця потенціалів, яка блокує подальший перехід носіїв заряду. Рівновага настане, коли

$$eU_K = W_F^B - W_F^A, \quad (2.25)$$

де U_K - контактна різниця потенціалів.

Наявність контактної різниці потенціалів забезпечує рівновагу потоків електронів з одного металу у другий. Рівновага внаслідок великої швидкості теплового руху встановлюється дуже швидко (приблизно за 10^{-16} с). Подвійний шар d , що виникає при цьому в області контакту, дуже тонкий (приблизно період решітки), тому він не впливає на проходження електричного струму через контакт, Оскільки енергія Фермі в металах значна, то контактна різниця потенціалів досягає декількох вольт.

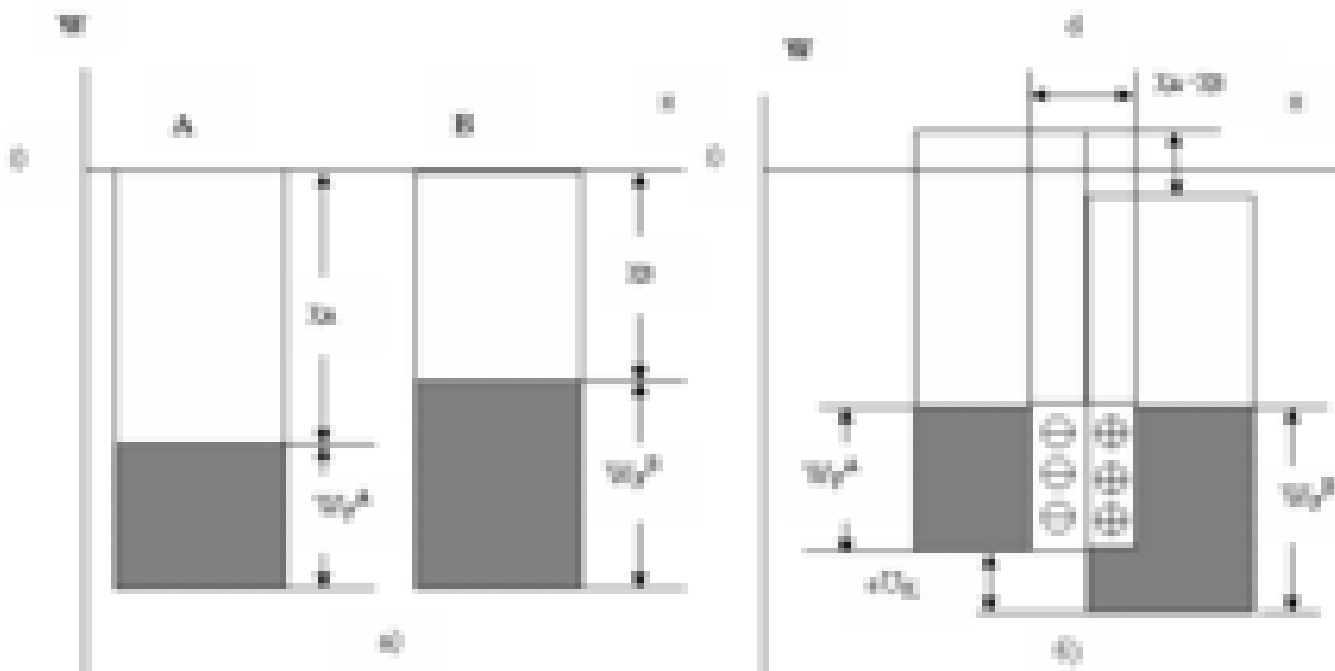


Рисунок 2.10 - Енергетична діаграма вільних металів (а) і контакту двох металів (б)

Термоелемент, який збудований з двох різних металевих провідників з замкнутим колом, називають термопарою (рисунок 2.11).

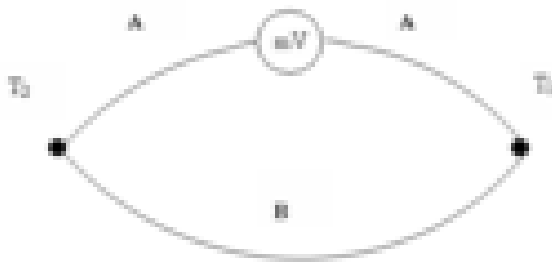


Рисунок 2.11 - Структурна схема термопари

Вольтметр у такому колі буде показувати різницю потенціалів, яку називають термоелектрорушійною силою (термо-Е.Р.С.). Це явище називають ефектом Зеєбека. Термо-Е.Р.С. дорівнює

$$U \cong \alpha_T (T_2 - T_1), \quad (2.26)$$

де α_T — відносна питома термо-Е.Р.С.

Значення α_T залежить від природи матеріалів і температури та складається з трьох складових.

Перша зумовлена температурною залежністю контактної різниці потенціалів. Це пов'язане з тим, що з ростом температури рівень Фермі в металах слабко, але зміщується.

Друга складова обумовлена дифузією носіїв заряду від гарячих спаїв до холодних. Оскільки існує градієнт температури від контакту до контакту, то виникає дифузія електронів від гарячого контакту до холодного, що дає вклад у різницю потенціалів.

Третя складова виникає внаслідок захоплення електронів квантами теплової енергії (фононами). Їх потік теж пересувається до холодного контакту. Значення α_T приблизно дорівнює декількох мкВ/К.

Термопари поширене використовують для вимірювання температури. Якщо температуру холодного контакту тримати 0 °С, то вольтметр буде показувати напругу пропорційну температурі гарячого контакту.

Перевагою термопар є велика лінійність, можливість вимірювати температури у широкому інтервалі температур, незалежність значення термо-Е.Р.С. від довжини провідників.

Внаслідок того, що значення α_T залежить від складу матеріалу та незначно від температури, термопари градуують, використовуючи точки плавлення металів: свинцю, олова, срібла та ін.

Найбільш поширеними термопарами є:

1. Хромель-копель (типа ХК). Вона дозволяє вимірювати температури до 600 °С і має при цій температурі термо-Е.Р.С. приблизно 50 мВ.
2. Хромель-алюмель (типа ХА). Вона використовується до температур 1000 °С і має при цій температурі термо-Е.Р.С. приблизно 40 мВ.

3. Мідь-константан. Її використовують при низьких температурах до 350 °С. При цій температурі термо-Е.Р.С. досягає 15 мВ.
4. Платинородій-платина (типа ПП чи ППР). Її використовують до температур 1600 °С. Термо-Е.Р.С. невелика (приблизно 14 мВ при 1600 °С). Але це найбільш точна та стабільна термопара. Дуже добре відтворюється. Але при низьких температурах (до 800 °С) не дуже лінійна.

Склад сплавів для термопар:

1. Копель — 56 % Cu + 44 % Ni.
2. Алюмель — 95 % Ni з добавками Fe, Si та Mn.
3. Хромель — 90 % Ni + 10 % Cr.
4. Платинородій — 90 % Pt + 10 % Rh.
5. Константан — 60 % Cu + 40 % Ni.

Але явище термо-Е.Р.С. має і негативні сторони. В дійсних умовах виключити градієнти температур практично неможливо.

Тому, якщо контактують різні метали, то можливе виникнення паразитної термо-е.р.с. Для уникнення цього в колах, перш за все електровимірювальних пристроїв, треба підбирати контактуючі метали з малими значеннями термо-Е.Р.С. Такою парою, наприклад, є мідь-манганин.

Контрольні питання до підрозділу 2.4

1. У чому сенс правила Матиссена?
2. Як впливає наявність домішки на питомий опір металу?
3. Як впливає наявність домішки на температурний коефіцієнт питомого опору?
4. Які особливості провідності металу при великих частотах?
5. В чому складається правило Лінде?
6. Що таке “скін-ефект”? Як його використовують в радіoeлектроніці?
7. Які матеріали використовуються для поверхневого покриття високочастотних виробів?
8. Які особливості провідності тонких металевих плівок?
9. Який вираз має закон Відемана-Франца?
10. В чому складається ефект Зеебека?
11. Як пов'язані електропровідність і теплопровідність металів?
12. Які матеріали вигідно використовувати для виробництва радіаторів для напівпровідникових приладів?
13. Що таке термопари? Де вони використовуються?
14. Які три основні складові оказують вплив на величину термічної електрорушійної сили?
15. Коли слід підбирати контактуючі метали з малими значеннями термо-Е.Р.С.?

2.5 КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Одна з можливих схем класифікації провідникових матеріалів приведена на рисунку 2.12. В основу її покладене ділення металевих матеріалів на провідникові матеріали з великою електропровідністю і з великим питомим опором.

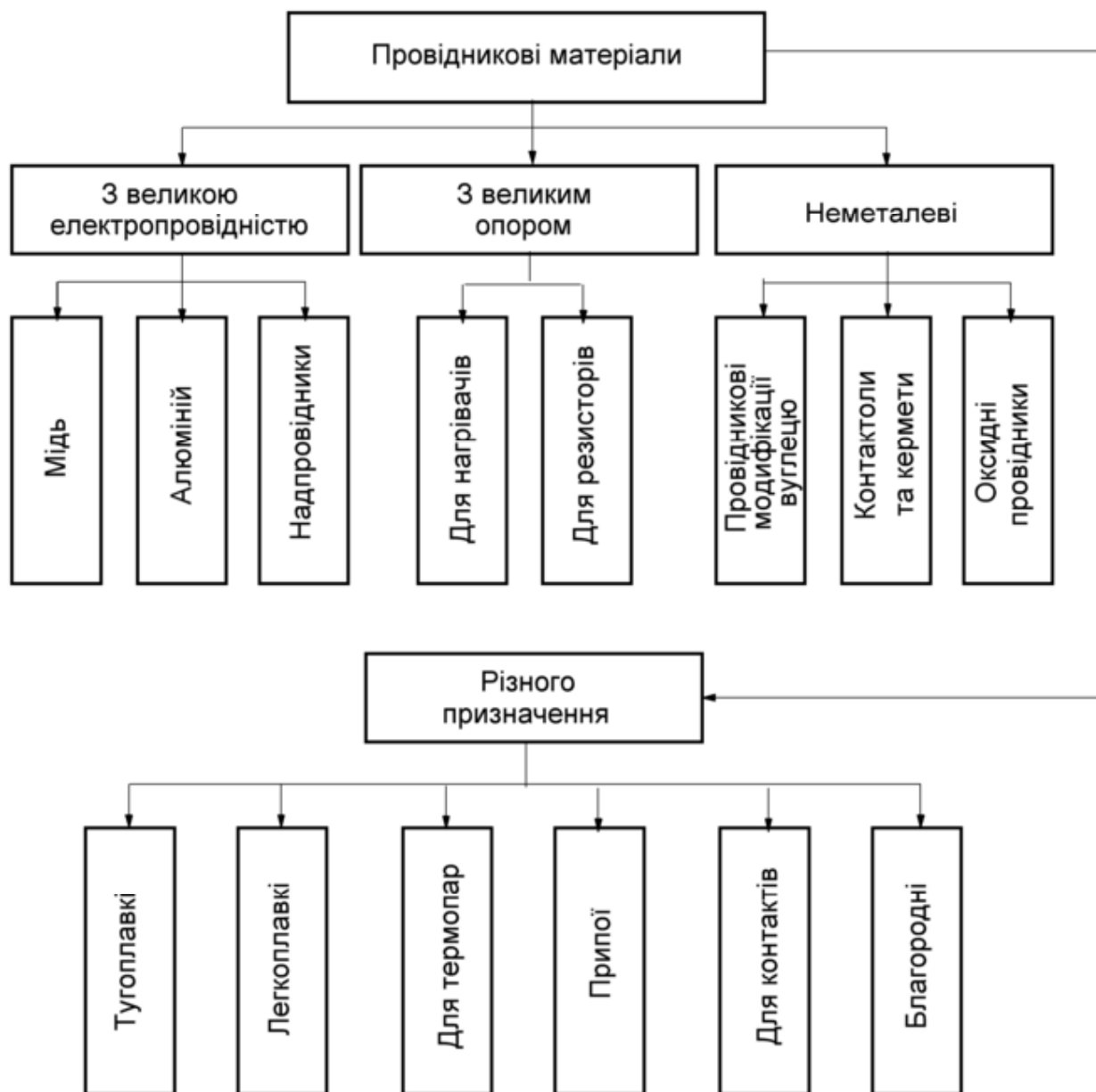


Рисунок 2.12 - Класифікація провідникових матеріалів

2.6 МАТЕРІАЛИ З ВЕЛИКОЮ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЮ

2.6.1 Загальні положення

До цієї групи відносять провідники з питомим опором у нормальних умовах менше $0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Найбільш поширені з них мідь та алюміній. Матеріали цієї групи використовують як обмоткові та монтажні дроти, як контактні площини та доріжки. Тому ці матеріали повинні задовольняти наступним умовам:

1. *Малий питомий опір.* Це необхідно для зменшення теплових втрат.
2. *Можливість пайки чи зварювання з малим перехідним опором контакту.* Оскільки провідникові дроти з'єднують елементи схеми чи блоків, треба мати змогу їх з'єднати з малими втратами.
3. *Значна корозійна стійкість.* Ця умова необхідна, тому що апаратура працює у різних атмосферних умовах.

4. Мала вартість матеріалів.

5. Часто потребується мала вага провідників.

6. Добра оброблюваність. Це потрібно для прокату у листи та протягування у дроти.

Переліченим умовам відповідають тільки мідь, алюміній та їх сплави. Основні параметри цих матеріалів приведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1- Основні параметри міді та алюмінію

Метал	Щільність, Мг/м ³	Температура плавлення, °С	Питомий опір, мкОм·м	Темпера- турний коефіцієнт питомого опору, К ⁻¹	Абсолютна питома т.р.с., мкВ·К ⁻¹	Магнітні властивості
Алюміній	2,7	660	0,0265	4,1·10	- 1,3	Парамагнетик
Мідь	8,92	1083	0,0168	4,33	+ 1,8	Діамагнетик

Перевагою міді є: малий питомий опір (тільки срібло має менший питомий опір); добра здібність до пайки; добра можливість обробки; задовільна корозійна стійкість (але значно погана у вологому середовищі).

Алюміній має питомий опір більший ніж мідь, тому для того ж самого струму його площа повинна бути на 30 % більша. Але алюміній легше ніж мідь, тому дріт при однаковому опорі та довжині в 2 рази легше. В порівнянні з міддю, алюміній більш корозійно стійкий і більш поширений у природі, вартість його менша. Але алюміній погано поводить ся при паянні та зварюванні та має низьку механічну міцність.

Згідно властивостям, мідь використовують для виготовлення дротів, кабелів, обмоток трансформаторів, анодів, екранів. Крім того, мідь використовують для виготовлення фольгових матеріалів, для друкованих плат, провідникових з'єднань між функціональними елементами схем.

Алюміній використовують у дротах високої напруги та у мікроелектроніці, як обкладинки конденсаторів, контактних площин та міжз'єднань у ІМС. Із сплавів міді найбільш поширені латунь (мідь з добавками цинку) та бронза (мідь з добавками олова, фосфору, кадмію, хрому, берилію та ін.).

Латуні мають велике відносне видовження. Тому з латуні виготовляють струмопровідні частини вимикачів, реле, екранів. Вона легко штампується.

Бронзи мають високі механічні властивості. Тому їх використовують як струмопровідні пружини,

Із сплавів алюмінію для виготовлення дротів використовують альдрей (алюміній з невеликими добавками магнію Mg, Si, Fe). Він має значно кращі механічні властивості.

Треба пам'ятати, що контакт алюмінію та міді має змогу гальванічної корозії з відносне великим значенням терморушійної сили.

Внаслідок цього алюміній у місці контакту руйнується.

Тому контакти міді та алюмінію необхідно ретельно захищати від вологи.

В суднових умовах одною з найважливіших характеристик проводів є припустимий тривалий струм, який залежить як від діаметру проводу, так і від умов його прокладення.

2.6.2 Проводи з матеріалів з високою провідністю

Струмові навантаження, які встановлені у діючих нормативних документах по використанню кабелів і проводів в електричних мережах вказані у табл.2.2.

Таблиця 2.2 - Допустимий тривалий струм для проводів з гумовою і полівінілхлоридною ізоляцією з мідними (алюмінієвими) жилами, А

Перетин струмопровідної жили, мм ²	Для проводів, що прокладені в одній трубі											
	відкрито		2 проводи		3 проводи		4 проводи		1 провід		1 провід	
			1 жила		1 жила		1 жила		2 жили		3 жили	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
0,5	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,75	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	17	-	16	-	15	-	14	-	15	-	14	-
1,5	23	-	19	-	17	-	16	-	18	-	15	-
2,5	30	24	27	20	25	19	25	19	25	19	21	16
4	41	32	38	28	35	28	30	23	32	25	27	21
6	50	-	46	-	42	-	40	-	40	-	34	-
10	80	60	70	50	60	47	50	39	55	42	50	38
16	100	75	85	60	80	60	75	55	80	60	70	55
25	140	105	115	85	100	80	90	70	100	75	85	65
35	170	130	135	100	125	95	115	85	125	95	100	75
50	215	165	185	140	170	130	150	120	160	125	135	105
70	270	210	225	175	210	165	185	140	195	150	175	135
95	330	255	275	215	255	200	225	175	245	190	215	165
120	385	295	315	245	290	220	260	200	295	230	250	190

Контрольні питання до підрозділу 2.6

1. Дайте порівнянну характеристику міді та алюмінію.
2. Які вимоги пред'являються для матеріалів великої провідності?
3. Для чого використовують провідникові матеріали з високою електропровідністю?

2.7 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ З ВЕЛИКИМ ПИТОМИМ ОПОРОМ

До них відносять металеві сплави з питомим опором більше ніж 0,3 мкОм·м. Їх використання пов'язане з виготовленням нагрівачів, резисторів, електровимірювальних пристроїв.

2.7.1 Матеріали до нагрівачів

Нагрівачі повинні мати достатню жаростійкість (стійкість до окалини) і жароміцність. **Жароміцність** - механічна міцність при високих температурах. **Жаростійкість** - опір металів і сплавів газовій корозії при високих температурах

Нагрівач в електропечі повинен бути зроблений з матеріалу, що володіє високим питомим електричним опором. Говорячи простою мовою, чим вище електричний опір матеріалу, тим сильніше він нагрівається. Отже, якщо взяти матеріал з меншим опором, то буде потрібний нагрівач більшої довжини і з меншою площею поперечного перерізу. Не завжди в печі може бути розміщений досить довгий нагрівач. Також варто враховувати, що, чим більше діаметр дроту, з якої зроблений нагрівач, тим довше термін його служби. Прикладами матеріалів, що володіють високим електричним опором є хромонікелевий сплав ніхром Х20Н80, Х15Н60, сплав фехраль Х23Ю5Т (залізо-хром-алюміній), які відносяться до прецизійних сплавів з високим електричним опором. На рисунку 2.13 наведений зовнішній вигляд нагрівачів.



Рисунок 2.13 - Нагрівачі

Малий температурний коефіцієнт опору є істотним чинником при виборі матеріалу для нагрівача. Це означає, що при зміні температури електричний опір матеріалу нагрівача змінюється не сильно.

Якщо температурний коефіцієнт електроопору великий, для включення печі в холодному стані доводиться використовувати трансформатори, що дають в початковий момент знижену напругу.

Фізичні властивості матеріалів нагрівачів повинні бути постійними. Деякі матеріали, наприклад карборунд, який є неметалевим нагрівачем, з плином часу можуть змінювати свої фізичні властивості, зокрема електричний опір, що ускладнює умови їх експлуатації.

Для стабілізації електричного опору використовують трансформатори з великою кількістю ступенів і діапазоном напруг.

Металеві матеріали повинні володіти хорошими технологічними властивостями, а саме: пластичністю і зварюваністю, - щоб з них можна було виготовити дріт, стрічку, а з стрічки - складні по конфігурації нагрівальні елементи.

Також нагрівачі можуть бути виготовлені з неметалів. Неметалеві нагрівачі пресуються або формуються, перетворюючись в готовий виріб.

До інших вимог до матеріалів, які використовуються у нагрівачах, слід визначити такі:

1. Наявність стійкого та міцного оксиду. У протилежному випадку, матеріал буде швидко руйнуватися. Так, при нагріванні вольфраму, на повітрі він окислюється,

а його оксид при температурах більше 400 °С випаровується, що швидко руйнує метал.

2. Температурні коефіцієнти лінійного розширення оксиду та сплаву повинні бути близькими по значенню. Інакше, при нагріванні відбудеться розтріскування оксиду та поступове руйнування матеріалу.

Цим умовам задовольняють фехралі, хромалі та ніхроми. Основні їх параметри наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Основні властивості сплавів великого опору

Сплав	Питомий опір мкОм·м	α_p, K^{-1}	Робоча температура, °С
Ніхроми: X15H60 (60%Ni, 18%Cr, 1,5% Mn, решта. Fe);	1,0 - 1,2	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	до 1000
X20H80 (78% Ni, 20%Cr, 1,5% Mn, решта Fe);	1,0 - 1,1	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	до 1100
Фехраль: X13Ю4 (13% Cr, 4%Al,Mn,0,6% Ni, решта. Fe).	1,18 - 1,35	$(1-1,2) \cdot 10^{-4}$	до 900
Хромаль: X23Ю5 (23% Cr, 5% Al, 0,7%Mn,0,6% Ni, решта. Fe).	1,3 - 1,5	$0,65 \cdot 10^{-4}$	до 1200

2.7.2 Матеріали для виготовлення резисторів

Резистор - пасивний елемент електричних кіл, що володіє певним або змінним значенням електричного опору, призначений для лінійного перетворення сили струму в напругу і напруги в силу струму, обмеження струму, поглинання електричної енергії та ін. Вельми широко використовуваний компонент практично всіх електричних і електронних пристроїв.

Схема заміщення резистора найчастіше має вигляд паралельно з'єднаних опору і ємності. Іноді на високих частотах послідовно з цим колом включають індуктивність.

У схемі заміщення опір - основний параметр резистора, ємність і індуктивність - паразитні параметри.

Резистори класифікуються за наступними ознаками:

1. *Залежно від характеру зміни опору резистори* підрозділяються на
 - постійні (опір фіксований),
 - змінні (опір може змінюватися в будь-який час в певних межах багаторазово),
 - підстроювальні (опір може змінюватися в будь-який час в певних межах, але обмежене число разів),
 - фоторезистори (опір змінюється під впливом світла),
 - терморезистори (опір міняється під впливом тепла),
 - варистори (опір залежить від прикладеної напруги),
 - тензорезистори (опір залежить від прикладеної механічної напруги).
2. *Залежно від призначення* резистори підрозділяються на
 - резистори загального призначення (діапазон опору від 10 Ом до 10 МОм, потужність розсіювання від 65 мВт до 100 Вт, допустиме відхилення від номінального від $\pm 1\%$ до $\pm 20\%$),

- прецизійні (які мають значну стабільність параметрів і значну точність від $\pm 0,0005\%$ до $\pm 0,5\%$),
 - високочастотні (мають малу індуктивність і ємність),
 - високовольтні (робоча напруга від 1 кВ до 50 кВ),
 - високоомні (номінальний опір від 10 МОм до 5 ТОм),
 - низькоомні (номінальний опір від 0,01 Ом до 10 Ом),
3. *Залежно від способу захисту від зовнішніх чинників* резистори розділяються на
- неізолювані (які не допускають зіткнення з корпусом),
 - ізолювані (які допускають зіткнення з корпусом),
 - герметизовані (мають герметичну конструкцію корпусу),
 - вакуумні (мають резистивний елемент в скляній вакуумній колбі).
4. *За матеріалом резистивного елементу* резистори розділяються на
- дротяні (матеріалом резистивного елементу служить дріт з високим питомим опором: манганін, константан, ніхром, нікелін),
 - недротяні (резистивним матеріалом є тонкі металеві або металооксидні плівки, або об'ємна композиція з високим питомим опором) металодіелектрики, оксиди металів, тонкі металеві плівки, плівки вуглецю і боровуглероду, кермети,
 - металофольгові (матеріалом резистивного елементу є металева фольга).
5. *За способом монтажу:*
- для друкованого монтажу;
 - для навісного монтажу;
 - для мікросхем і мікромодулів.

Основні характеристики і параметри резисторів

Резистори можна охарактеризувати багатьма параметрами. Серед основних можна виділити наступні.

1. Номінальний опір - основний параметр. При послідовному з'єднанні резисторів

їх опори складаються $R = \sum_{i=1}^N R_i$. При послідовному з'єднанні резисторів їх

загальний опір буде більше найбільшого з опорів. Якщо всі опори однакові і дорівнюють r , то еквівалентний опір послідовного з'єднання буде дорівнювати: $R_{EKB} = Nr$, де N - кількість резисторів. Паралельне з'єднання резисторів.

При паралельному з'єднанні резисторів складаються величини, зворотні опору (тобто загальна провідність складається з провідностей кожного резистора $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$).

При паралельному з'єднанні резисторів їх загальний опір буде менше найменшого з опорів. Якщо всі опори однакові і дорівнюють r , то еквівалентний опір паралельного з'єднання буде дорівнювати: $R_{EKB} = \frac{r}{N}$, де N - кількість

резисторів. Згідно ГОСТ 2825-67 резистори мають шість рядів номінального опору : E6, E12, E24, E48, E96, E192. Числа вказують кількість номінальних значень в кожній декаді. Так ряд E6 має 6 значень опору в межах декади: 1,0; 1,5;

- 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; а ряд E24 - 24 значення опору в межах декади: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.
2. **Допуск** - максимально допустиме відхилення номінального опору в %. Згідне ГОСТ 9664-74 ряд допусків для резисторів в %: $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 ; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 . Допустиме відхилення опору від номінального значення (технологічний розкид в процесі виготовлення).
 3. **Температурний коефіцієнт опору**. відносна зміна опору резистора при зміні температури на 1 градус. Для прецизійних резисторів ТКО знаходиться в межах від (1 до 100). 10^{-6} K^{-1} . Для резисторів загального призначення він знаходиться в межах від (10 до 2000). 10^{-6} K^{-1} . Для вуглецевих і боровуглецевих резисторів ТКО негативний, для інших позитивний.
 4. **Номінальна потужність розсіювання**. Це максимальна потужність, яку може розсіяти резистор упродовж гарантованого терміну служби. Згідно ГОСТ 24013-80 і ГОСТ 10318-8 значень номінальної потужності розсіювання, у Вт: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 160; 250; 500.
 5. **Гранична потужність**. Як при паралельному, так і при послідовному з'єднанні резисторів підсумкова потужність буде дорівнювати сумі потужностей резисторів.
 6. **Напруга шумів**. Це значення э.р.с. шумів резисторів внаслідок теплового або струмового шуму. Значення напруги шумів для недротяних резисторів змінюється від 0,1 до 100 мкВ/В.
 7. Гранична робоча напруга.
 8. Надмірний шум.
 9. Максимальна температура навколишнього середовища для номінальної потужності розсіювання.
 10. Вологостійкість і
 11. Термостійкість.
 12. Коефіцієнт напруги. Враховує явище залежності опору деяких видів резисторів від прикладеної напруги. Визначається за формулою: $K_U = \frac{R_1 - R_2}{R_1} 100\%$, де R_1 і R_2 - опори при напругах, що відповідають 10% і 100% номінальної потужності розсіювання резистора.

Деякі характеристики істотні при проектуванні пристроїв, що працюють на високих і надвисоких частотах, це:

1. Паразитна ємність.
2. Паразитна індуктивність

Означення резисторів на схемах наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Означення резисторів на принципових схемах

Найменування групи	Опис	Означення
Постійні резистори	Резистор без вказівки номінальної потужності розсіювання	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,05 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,125 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,25 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,5 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 1 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 2 Вт	
	Резистор з номінальною потужністю розсіювання 5 Вт	
Змінні резистори	Змінний резистор (реостат)	
	Змінний резистор, що включений як реостат (повзунок з'єднаний з крайнім кінцем)	
	Підлаштувальний резистор	
	Підлаштувальний резистор, що включений як реостат (повзунок з'єднаний з крайнім кінцем)	
Нелінійні резистори	Варистор, опір залежить від напруги	
	Фоторезистор, опір залежить від освітлення	
	Терморезистор, опір залежить від температури	
	Тензорезистор, опір залежить від тиску	

Позначення і маркування постійних резисторів

Згідно з діючою системою позначень скорочене позначення резистора складається з букви і двох цифр, які пишуться через дефіс. Наприклад: Р 1 – 4.

Перша буква показує підклас резистора: Р - постійні, РП - змінні і підлаштувальні, НР - набір резисторів.

Другий елемент (цифра) показує групу резисторів за матеріалом: 1 - недротяні, 2 - дротяні.

Третій елемент (цифра) - реєстраційний номер розробки.

Таким чином, повне позначення резистора має вигляд:

Р 1-4-0,5-10 кОм (1% А-Б-В ОЖО.467.157ТУ)

і означає наступне: резистор постійний, недротяний, реєстраційний номер 4, потужність розсіювання 0,5 Вт, номінальний опір 10 кОм, допуск $\pm 1\%$, група шумів - А, група ТКС - Б, усепогоджене виконання - В, технічні умови - ОЖО.467.157.

До діючої зараз системи позначень, позначення резисторів згідно ГОСТ 13453-68 виглядали як: С2 – 33.

Перший елемент (буква) означає тип резистора (С - постійний, СП - змінний).

Другий елемент (цифра) означає матеріал резистора (1 - недротяні тонкоплівкові вуглецеві і боровуглецеві, 2 - недротяні тонкоплівкові металодіелектричні і металооксидні, 3 - недротяні плівкові композиційні, 4 - недротяні об'ємні композиційні, 5 - дротяні, 6 - недротяні тонкоплівкові металізовані).

Третій елемент (цифра) означає порядковий номер розробки.

Розроблені до 1968 р. і резистори, що випускаються до теперішнього часу, позначалися трьома (двома) буквами і цифрами. Наприклад: МЛТ-0,125.

Перша буква означає матеріал резистора (У - вуглецеві, К - композиційні, М - металоплівкові, П - дротяні, Б – боровуглеродні і так далі).

Друга буква означає тип захисту резистора (Л - лакостійкі, Э - емальовані, В - вакуумні і так далі).

Третя буква означає призначення резистора (Т - термостійкі, П - прецизійні, В - високовольтні і т. д.).

Після букв слідували через дефіс цифри, які вказували на потужність розсіювання резистора у Вт.

На корпус постійного резистора виноситься у вигляді маркування кодоване позначення номінального значення опору, допуску, потужності розсіювання, типу резистора і дата виготовлення. Із-за малих габаритних розмірів не усі вказані параметри можуть знаходитися в маркуванні резистора.

Кодоване позначення номінального опору складається з цифр (від 2 до 4) і букви, яка означає множник і положення десяткової точки. Наприклад: 5R1 - 5,1 Ом; 150 К - 150 кОм; 2М2 – 2, 2 МОм, М22 - 220 кОм.

Букви R або Е, К, М, G, Т відповідно означають множники 1, 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} .

Кодове позначення допуску позначається буквами, які слідують після позначення номінального опору згідно з наступним, :

$\pm 0,1\%$ – літера В або Ж; $\pm 0,25\%$ – літера С або У; $\pm 0,5\%$ – літера D або Д; $\pm 1\%$ – буква F або Р; $\pm 2\%$ – буква G або Л; $\pm 5\%$ – буква J або И; $\pm 10\%$ – буква K або С, $\pm 20\%$ – буква M або В; $\pm 30\%$ – буква N або Ф. Першою літерою є літера латинського алфавіту, а друга - кирилиця.

На резисторах малого розміру кодоване позначення номінального опору в Ом складається з 3 або 4 цифр, причому остання цифра означає порядок множника (10^n). Наприклад: 361 відповідає номінальному опору $3,6 \cdot 10^1 = 360$ Ом.

Згідно з вимогами Публікації 62 МЭК допускається маркування резисторів колірним кодом. Її наносять знаками у вигляді кругів або смуг, причому перший знак знаходиться ближче до торця резистора. Колірні знаки прочитуються ліворуч на право в наступному порядку:

- перша смуга - перша цифра;
- друга смуга - друга цифра;
- третя смуга - множник;
- четверта смуга - допуск.

Кольори знаків маркування номінального опору і допуску відповідають кольорам, вказаним у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 - Кольорове кодування резисторів

Колір	Як число	Як десятковий множник	Як точність в %	Як ТКО, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Як % відмов
Сріблястий	-	0,01	10	-	-
Золотий	-	0,1	5	-	-
Чорний	0	1	-	-	-
Коричневий	1	10	1	100	1%
Червоний	2	100	2	50	0,1%
Помаранчевий	3	1000	-	15	0,01%
Жовтий	4	10000	-	25	0,001%
Зелений	5	100000	0,5	-	-
Синій	6	1000000	0,25	10	-
Фіолетовий	7	10000000	0,1	5	-
Сірий	8	100000000	-	-	-
Білий	9	1000000000	-	1	-
Відсутній	-	-	20%	-	-

Для резисторів з точністю 20% використовують маркування з трьома смужками, для резисторів з точністю 10% і 5% - маркування з чотирма смужками, для більш точних резисторів - з п'ятьма або шістьма смужками. Перші дві смужки завжди означають перші два знаки номіналу. Якщо смужок 3 або 4, третя смужка означає десятковий множник, тобто ступінь десятки, яка множиться на число, що складається з двох цифр, вказане першими двома смужками. Якщо смужок 4, остання вказує точність резистора. Якщо смужок 5, третя означає третій знак опору, четверта - десятковий множник, п'ята - точність. Шоста смужка, якщо вона є, вказує температурний коефіцієнт опору (ТКС). Якщо ця смужка в 1,5 рази ширше інших, то вона вказує надійність резистора (% відмов на 1000 годин роботи).

Слід зазначити, що іноді зустрічаються резистори з 5 смужками, але стандартної (5 або 10%) точністю. У цьому випадку перші дві смуги задають перші знаки номіналу, третя - множник, четверта - точність, а п'ята - температурний коефіцієнт.

Оскільки резистор - симетрична деталь, може виникнути питання: «Починаючи з якого боку читати смужки?».

Для чотирисмужкового маркування звичайних резисторів з точністю 5 і 10% питання вирішується просто: золота або срібна смужка завжди стоїть в кінці.

Для трьохсмужкового коду перша смужка стоїть ближче до краю резистора, ніж остання.

Для інших варіантів важливо, щоб виходило значення опору з номінального ряду, якщо не виходить, потрібно читати навпаки (для резисторів МЛТ-0,125 виробництва СРСР з 4 смужками першої є смужка, нанесена ближче до краю; зазвичай вона знаходиться на металевому стаканчику виведення, а решта три - на більш вузькому керамічному тілі резистора). У резисторах Panasonic з п'ятьма смужками резистор розташовується так, щоб смужка, що окремо стоїть, була справа, при цьому перші 2 смужки визначають перші два знаки, третя смужка - ступінь множника, четверта смужка - допуск, п'ята смужка - область застосування резистора.

Особливий випадок використання кольорового маркування резисторів - перемички нульового опору.

Вони позначаються однією чорною (0) смужкою по центру (використання таких перемичок замість дешевих шматків дроту пояснюється бажанням виробників скоротити витрати на налаштування складальних автоматів).

Маркування SMD-резисторів

«Резистори» нульового опору (перемички на платі) кодуються однією цифрою «0» або трьома («000»). Іноді нулі мають прямокутну форму (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 - SMD-перемичка

Кодування 3 цифрами

ABC позначає $AB \cdot 10^C$ Ом (рисунок 2.15)



Рисунок 2.15 - SMD-резистор з кодуванням 3 цифрами

наприклад 222 - це $22 \cdot 10^2$ Ом = 2,2 кОм.

Кодування 4 цифрами

ABCD позначає $ABC \cdot 10^D$ Ом, точність 1% (ряд E96) (рисунок 2.16)



Рисунок 2.16 - SMD-резистор з кодуванням 4 цифрами

наприклад 4422 - це $442 \cdot 10^2$ Ом = 44,2 кОм.

Кодування цифра-цифра-буква (JIS-C-5201) Ряд E96, точність 1%.

Мантиса m значення опору кодується 2 цифрами (см. Табл. 2.6), ступінь при 10 кодується буквою. S або $Y = 10^{-2}$; R або $X = 10^{-1}$; A = $10^0 = 1$; B = 10^1 ; C = 10^2 ; D = 10^3 ; E = 10^4 ; F = 10^5 .

Приклади:

09R = 12,1 Ом;

80E = 6,65 МОм; всі 1%.

Таблиця 2.6 - Кодування цифра-цифра-буква (JIS-C-5201) Ряд E96, точність 1%

код	m	код	m	код	m	код	m	код	m	код	m
01	100	17	147	33	215	49	316	65	464	81	681
02	102	18	150	34	221	50	324	66	475	82	698
03	105	19	154	35	226	51	332	67	487	83	715
04	107	20	158	36	232	52	340	68	499	84	732
05	110	21	162	37	237	53	348	69	511	85	750
06	113	22	165	38	243	54	357	70	523	86	768
07	115	23	169	39	249	55	365	71	536	87	787
08	118	24	174	40	255	56	374	72	549	88	806
09	121	25	178	41	261	57	383	73	562	89	825
10	124	26	182	42	267	58	392	74	576	90	845
11	127	27	187	43	274	59	402	75	590	91	866
12	130	28	191	44	280	60	412	76	604	92	887
13	133	29	196	45	287	61	422	77	619	93	909
14	137	30	200	46	294	62	432	78	634	94	931
15	140	31	205	47	301	63	442	79	649	95	953
16	143	32	210	48	309	64	453	80	665	96	976

Кодування буква-цифра-цифра Ряди E24 і E12, точність 2%, 5% і 10%. (Ряд E48 не використовується).

Ступінь при 10 кодується буквою (так само, як для 1% -х опорів, см. табл.2.6), мантиса m значення опору і точність кодуються 2 цифрами (см. табл.. 2.7).

Приклади:

2%, 1,00 Ом = S01;

5%, 1,00 Ом = S25;

5%, 510 Ом = A42;

10%, 1,00 Ом = S49;

10%, 820 кОм = D60

Таблиця 2.7 - Кодування буква-цифра-цифра Ряди E24 і E12, точність 2%, 5% і 10%.

2%	код	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
	m	100	110	120	130	150	160	180	200	220	240	270	300
	код	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	m	330	360	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910
5%	код	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	m	100	110	120	130	150	160	180	200	220	240	270	300
	код	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	m	330	360	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910
10%	код	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	m	100	120	150	180	220	270	330	390	470	560	680	820

Перевірка справності резистора

1. Від'єднати коло, що містить резистор.
2. Відключити резистор від кола. Вимірювання опору резистора, що не відключений від кола, дасть неправильні результати, оскільки буде містити і опір частини цього кола. Від'єднати один контакт резистора від кола. Не має значення, який саме з двох контактів вимикається. Для від'єднання резистора просто витягніть його. Якщо він припаяний, розплавте паяльником припій і дістаньте резистор пінцетом.



Рисунок 2.17 - Від'єднання одного контакту резистора від кола

3. Огляньте резистор. Якщо резистор почорнів або обвуглився, швидше за все він пошкоджений занадто високим струмом. У цьому випадку резистор слід замінити.
4. Визначте опір резистора. Опір повинен бути надруковано на корпусі резистора. На дрібних резисторах опір позначається кольоровими смужками. Визначте допустиме відхилення опору. Жоден резистор не володіє точно таким опором, яке зазначено на ньому.



Рисунок 2.18 - Резистор з кольоровими смужками

Допустиме відхилення показує, як може змінюватися зазначена величина опору. Наприклад, при опорі резистора 1.000 Ом з 10 відсотками допустимого відхилення величини не нижче 900 ом і не вище 1.100 Ом будуть вважатися в межах норми.

5. Підготуйте цифровий мультиметр для вимірювання опору. Переконайтеся в тому, що мультиметр справний, і його батарейки не розряджені. Встановіть шкалу мультиметра так, щоб її максимальне значення ненабагато перевищувала опір резистора. Наприклад, якщо ви хочете перевірити опір резистора, на якому відзначена величина 840 ом, а шкала мультиметра змінюється в 10 разів, встановіть діапазон вимірювань 1.000 Ом.

6. Виміряйте опір. Підключіть 2 зонда мультиметра до 2 контактам резистора. Резистори не мають полярності, тому порядок приєднання не має значення.



Рисунок 2.19 - Під'єднання резистору до мультиметру

7. Визначте опір резистора. Подивіться на свідчення мультиметра. При вимірах опору резистора враховуйте його допустиме відхилення.



Рисунок 2.20 - Вимірювання опору

8. Підключіть до кола справний резистор. Вставте резистор назад в коло, якщо до цього ви просто вийняли його. Якщо ж ви випаювали резистор, розплавляючи його контакти, впаяти його в коло.



Рисунок 2.21 - Запаювання справного резистора

9. Замініть несправний резистор. Якщо резистор показав опір, що не відповідає необхідному, викиньте його.

Причини несправності резисторів

- помилкове або неправильне маркування резисторів, коли на корпусі резистора нанесено одне значення номіналу опору, в той час як реальний або фактичний опір зовсім інший;

- обрив струмоведучої поверхні резистора за рахунок мікротріщин на керамічній підставі резистора. Цей дефект часто візуально не спостерігається, так як маскується зовнішнім захисним шаром лакового покриття;
- відшарування металевого ковпачка від поверхні резистивного шару - обривається коло;
- обрив кола з - за надмірного температурного перегріву / перегорання / струмопровідного шару резистора. Дефект візуально виявляється внаслідок потемніння / почорніння / лакового захисного покриття резистора;
- окислення виводів резистора. Якщо в процесі паяння не облудити окислені виводи, то це може стати причиною виникнення дефекту типу "обрив кола", особливо в колах з великими струмами і при тривалій експлуатації апарату в різних погодних умовах;
- коротке замикання між виводами резистора. Даний тип дефекту можливий, хоча імовірність його виникнення набагато менше дефектів типу "обрив кола".

Всі перераховані дефекти досить легко виявляються за допомогою лабораторного омметра. Необхідне жорстко слідувати правилам: - будь-який радіоелемент, в тому числі і резистор необхідно перевірити на працездатність перед тим як встановити / впаяти / його в схему. Ця операція, незважаючи на начебто зайві і непотрібні витрати часу може, в кінцевому підсумку, заощадити час, так як психологічно важче змусити себе повірити в те, що впаяний резистор несправний.

Обрив виводів

Причина несправності:

- Неякісний резистор.
- Невдале кріплення або підвищена вібрація.

Заходи, що вживаються:

- Замінити.
- Замінити, змінивши кріплення або усунувши підвищену вібрацію.

Від згоряння

Причина несправності:

- Перевантаження по струму.
- Напруга, що прикладається до резистору, вище допустимої.
- Недостатнє охолодження

Заходи, що вживаються:

- Замінити на резистор більшої номінальної потужності.
- Замінити на більш високовольтний резистор або включити при заміні два (або більше) резистора послідовно зі збереженням загального опору колишнім.
- Замінити, поліпшивши умови охолодження

Порушення контакту в змінному резисторі

Причина несправності:

- Знос рухомого контакту або провідного шару

Заходи, що вживаються:

- Замінити

Зміна опору понад допустимий

Причина несправності:

- Неякісний резистор.

б) Перевантаження за струмом.

Заходи, що вживаються:

а) Замінити.

б) Замінити на резистор більшої номінальної потужності.

Втрата або зменшення чутливості фоторезистора

Причина несправності:

а) Неякісний фоторезистор.

б) Старіння при великому терміні служби.

в) Систематичний перегрів тепловим випромінюванням.

Заходи, що вживаються:

а) Замінити.

б) Замінити.

в) Замінити, поліпшивши вентиляцію фоторезистору або захистивши його від перегріву

Вимоги до матеріалів, які використовуються для виготовлення резисторів

1. Достатньо великий питомий опір. Це необхідно для зменшення габаритів виробу.
2. Мале значення температурного коефіцієнта питомого опору. Це треба для підвищення термостабільності резистора.
3. Мале значення термо-Е.Р.С. відносно міді. Це необхідно для зменшення паразитних сигналів у резисторах за рахунок теплових ефектів.

Таким вимогам відповідають сплави типу манганін, константан, ніхром, сплави типу РС, МЛТ. Їх параметри приведені у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Основні властивості сплавів для виготовлення резисторів

Робоча температура, °С	Склад сплаву	Питомий опір, мкОм·м	α_p, K^{-1}	Термо-Е.Р.С. відносно міді, мкВ·К ⁻¹
100 - 200	Манганін(86% Cu, 12% Mn, 2% Ni)	0,42 - 0,48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	1 - 2
450 - 500	Константан (60% Cu, 40% Ni)	0,48 - 0,52	$\pm(5-25) \cdot 10^{-6}$	40 - 50
—	РС-37-10 (37%Cr, 8-11% Ni, решта Si)	5 - 7	$(15-25) \cdot 10^{-6}$	—
—	МЛТ	100 - 300	$7 \cdot 10^{-4}$	—
—	Ніхром Х20Н80 (78% Ni, 20% Cr, 1,5% Mn, решта. Fe).	1,0 - 1,1	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	—

Сплави типу РС, ніхром та МЛТ використовують для виготовлення тонкоплівкових резисторів.

Основні конструкції постійних резисторів

Найпоширеніша конструкція постійних резисторів - спіральна. На керамічний циліндр з внутрішнім отвором розпилюється тонка плівка резистивного елементу (ніхром, константан, сплави типу МЛТ). Потім на поверхні циліндра виготовляють

спіралеподібну канавку, після чого з торців циліндра запаюють контактні кришки (рисунк 2.22 а).

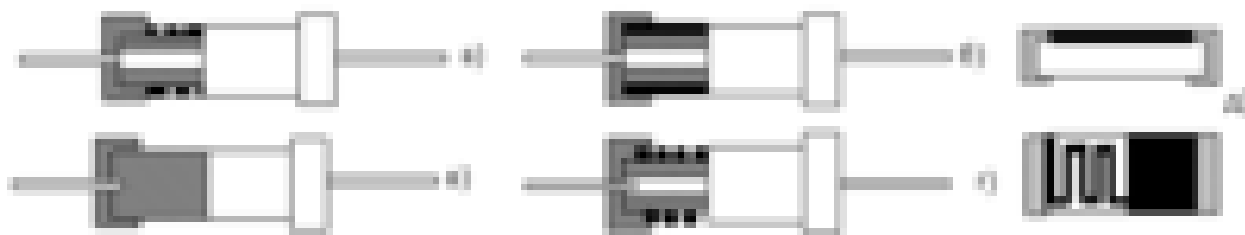


Рисунок 2.22 - Основні конструкції постійних резисторів
а) спіральна; б) безіндуктивна; в) об'ємна; г) дрітова; д) SMD-резистори

Безіндуктивні резистори виготовляють аналогічно, але спіральну канавку не прорізають, це зменшує індуктивність конструкції (рисунк 2.22,б).

Об'ємні композитні резистори виготовляють з об'ємних матеріалів, а контакти виводять з торців резистора (рисунк 2.22,в).

Дріт'яні резистори виготовляють намотуванням високоомним дротом на керамічному циліндрі. Кінці дроту закріплюють чашками або запаюють на виводах резистора (рисунк 2.22, г).

Резистори для поверхневого монтажу виготовляють запиленням плоскої спіралі з високоомного матеріалу на поверхню керамічної пластини, а торці такої пластини металізують для створення контактів (рисунк 2.22, д).

Вивідні резистори встановлюють в отвори друкованих плат з наступною пайкою виводів. SMD резистори (для поверхневого монтажу) припаюють до контактних майданчиків на поверхні друкованої плати. Такі резистори мають строго визначені розміри (рисунк 2.23).

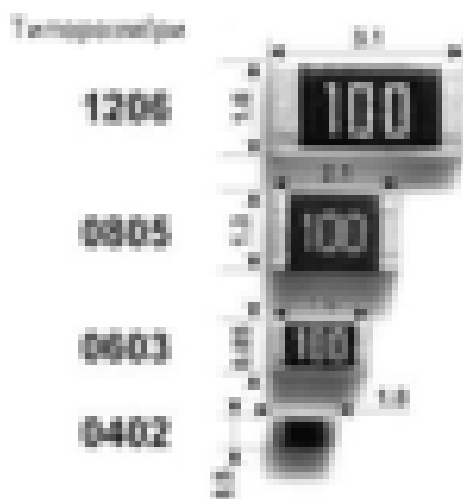


Рисунок 2.23 - Типорозміри SMD-резисторів

Контрольні питання до підрозділу 2.7

1. Яким вимогам повинні відповідати матеріали, які використовують для виготовлення нагрівачів?
2. Яким вимогам повинні відповідати матеріали, які використовують для виготовлення постійних резисторів?
3. Які матеріали використовують для виготовлення постійних резисторів? Для виготовлення нагрівачів?
4. Чому нагрівачі, які працюють в безперервному режимі мають більший термін напрацювання ніж ті, які регулярно вмикаються і вимикаються?
5. Приведіть класифікацію резисторів.
6. Назвіть основні параметри резисторів.
7. Як позначаються і маркуються постійні резистори?
8. Приведіть конструкції постійних резисторів.
9. Що таке ряди номінального опору? Як вони визначаються?
10. Як класифікують резистори?

2.8 ІНШІ ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Згідно класифікації провідникових матеріалів, до інших відносять: тугоплавкі, легкоплавкі, благородні, припої та неметалеві.

2.8.1 Тугоплавкі метали

До тугоплавких провідників відносять метали з температурою плавлення більше 1700°C . Як правило, вони хімічно стійкі при низьких температурах, але активні при великих. Експлуатація їх при великих температурах можлива тільки в атмосфері інертних газів, чи в вакуумі.

Параметри основних тугоплавких металів наведені у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 - Параметри тугоплавких металів

Метал	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	Питомий опір, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$	α_p, K^{-1}	Застосування
Вольфрам	3400	0,055	$5 \cdot 10^{-3}$	Нитки розжарювання; аноди рентгенівських ламп, випаровувачі, зонди
Молібден	2620	0,05	$4,33 \cdot 10^{-3}$	Сітки, електроди, конструкції електронних ламп, рентгенівських трубок, нагрівачі
Тантал	3000	0,124	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Сітки, аноди генераторних ламп, катоди, випаровувачі, обкладинки конденсаторів, тонкоплівкові резистори
Ніобій	2500	0,15	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Геттери радіоламп, катоди потужних генераторних ламп, надпровідники
Реній	3180	0,214	$3,2 \cdot 10^{-3}$	Для термопар (до 2500°C)

В щільному вигляді ці метали отримують способами порошкової металургії, тобто пресуванням та спіканням при великих температурах та тиску. Звичайно їх виготовляють у вигляді дротів, листів, стрічок. Вони мають волокнисту структуру у вигляді спечених зерен. Вони, в основному, застосовуються, як електроди (анооди, катооди, сітки) електронних ламп, нагрівачі, конструкційні матеріали.

2.8.2. Легкоплавкі метали

До легкоплавких відносять метали, які мають температуру плавлення не більше 400 °С. Застосування та властивості таких металів дуже різноманітні.

Параметри основних металів з невеликою температурою плавлення наведені у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Параметри легкоплавких металів

Метал	Температура плавлення, °С	Питомий опір, мкОм·м	$\alpha_p, K^{-1} \times 10^{-3}$	Застосування
Ртуть	- 39	0,958	0,9	Рідкі катооди у випромінювачах, газорозрядні лампи, лампи денного світла, ртутні контакти у реле
Галій	30	0,136	3,9	Як легуючий домішок у напівпровідниках
Індій	156	0,090	3,9	Як легуючий домішок у напівпровідниках.
Кадмій	321	0,074	4,2	Використовують у фотоелементах, як компонент припоїв, бронз, затримувач нейтронів у атомних реакторах
Цинк	419	0,0592	4,1	Як захисні покриття, електроди гальванічних елементів, фотоелементи, обкладинки конденсаторів, Входить до складу припоїв.
Свинець	327	0,190	4,2	Як захисні покриття від корозії, пластини акумуляторів, плавкі запобіжники, Входить у склад припоїв
Олово	232	0,113	4,5	Металева фольга для конденсаторів. Входить у склад припоїв.

У всіх областях застосування легкоплавких сплавів головною затребуваною властивістю є задана низька температура плавлення. Ця властивість, зокрема, використовується для пайки мікросхем, які можуть вийти з ладу через перегрів при пайку звичайними припоями. Крім того, ці сплави повинні мати певну щільність, міцність на розрив, хімічну інертність, вакуумну щільність, теплопровідність. На даний момент основними областями застосування легкоплавких сплавів є:

1. Виробництво і застосування рідкометалевих теплоносіїв в енергетиці та машинобудуванні.
2. Ливарна справа (виробництво виплавлюваних моделей).
3. Системи раннього оповіщення загорянь (датчики температури, клапани пожежогасіння та ін).
4. Термометрія (робоче тіло для термометрів різних типів).
5. Вакуумна техніка (ущільнення, паяні шви і ін.).

6. Мікроелектроніка (припої, покриття, датчики температури, запобіжники та ін.)
7. Медицина (фіксація кісток, протезування та ін.)
8. Використання в якості розплавляється металевої мастила.

Слід пам'ятати, що ртуть та свинець отруйні метали. Ртуть легко випарюється при температурах вище $+18^{\circ}\text{C}$, а пари її дуже отруйні. Олово при температурах нижче -40°C переходить у сіру порошкоподібну речовину (олов'яна чума).

2.8.3.Благородні метали.

До них відносять срібло, золото, платину та паладій. Ці метали найбільш хімічно стійкі. У теперішній час такі метали виробляють дуже високої чистоти: золото - 99,999 %; срібло - 99,999 %; платина - 99,9998 %; паладій - 99,94 %. Їх параметри приведені у таблиці 2.11. Слід пам'ятати, що коштовність цих металів велика.

Таблиця 2.11- Параметри благородних металів

Метал	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	Питомий опір, мкОм·м	α_p, K^{-1}	Застосування
Золото	1063	0,0025	$3,95 \cdot 10^{-3}$	Як контактний матеріал, контактні з'єднання в ІМС, прозорі електроди у фотоелементах, корозійні покриття
Срібло	961	0,0150	$4,1 \cdot 10^{-3}$	Має малий питомий опір. Як покриття НВЧ-хвильоводів, контактів в ІМС, у фотографії
Платина	1770	0,0981	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Для виготовлення термопар до 1600°C , підвісок, основа контактних сплавів
Паладій	1550	0,108	$3,6 \cdot 10^{-3}$	Поглинає водень, використовується для очистки водню, як компонент контактних сплавів

2.8.4 Неметалеві провідники

До них відносять матеріали на основі вуглецю та оксидів металів.

Електровугільні вироби

З графіту виготовляють контактні електроди електричних машин, дугових ламп, аноди гальванічних елементів, порошки мікрофонів, резистори.

Вугільні щітки бувають

- вугільно-графітові (УГ),
- графітові (Г),
- електрографітові (ЕГ) та
- мідно-графітові (М і МГ). Останні мають найменший опір.

Параметри щіток приведені у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - Параметри вугільних щіток

Тип щітки	Питомий опір, мкОм.м	Щільність струму, МА/м ²	Максимальна швидкість, м/с
УГ	18 - 60	6 - 8	10 - 15
Г	10 - 46	7 - 11	12 - 25
ЕГ	10 - 45	9 - 11	25 - 45
М, МГ	0,05 - 1,20	12 - 20	12 - 25

Для виготовлення резисторів використовують природний графіт, піролітичний графіт та сажі. Боровуглецеві плівки виробляють піролізом борорганічних сполук. Деякі параметри вуглецю для виготовлення резисторів приведені у таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 - Параметри вуглецевих плівок

Матеріал	Питомий опір, мкОм.м	Щільність, Мг/м ³	α_p , К ⁻¹
Полікристаличний графіт	8	2,26	$-10 \cdot 10^{-6}$
Піролітичний вуглець	10 - 50	2,10	$-2 \cdot 10^{-6}$
Боровуглецеві плівки	10 - 12	2,1	$-1 \cdot 10^{-4}$

Крім того, вуглець - інертна речовина, тому її використовують для виробництва тиглів, касет, нагрівачів, екранів.

Композитні провідникові матеріали

Вони являють суміш провідникового наповнювача з діелектричною зв'язкою. Зміною складу та характеру розподілу компонентів можна в досить великих межах керувати електричними властивостями таких речовин. Як провідникову фазу використовують метали, графіт, сажу, деякі окисли та карбіди. Діелектричною зв'язкою служать органічні та неорганічні діелектрики. З них найбільшу увагу заслуговують контактоли та кермети.

Контактоли - це струмопровідні лаки, клей, емалі, які мають вигляд пастоподібних композицій. Контактоли використовують для виготовлення ІМС за товстоплівковою технологією, контактів, гнучких хвильоводів.

Кермети - це металодіелектричні композиції з неорганічною зв'язкою. Їх використовують для виробництва резисторів, товстоплівкових ІМС та інших виробів.

Провідникові матеріали на основі оксидів.

Деякі оксиди металів мають відносно низький опір внаслідок порушення стехіометричного складу. Перш за все, це оксид олова SnO₂ та індію In₂O₃. Тонкі шари таких плівок мають велику прозорість у видимій частині спектра. Так, плівка SnO₂, товщиною до 2 мкм, поглинає не більше 3 % видимої частини спектра, Тому такі матеріали використовують, як прозорі обкладинки конденсаторів, рідкокристалічних та електровакуумних індикаторів, перетворювачів зображення та ін.

2.8.5. Припої

Припій - матеріал, який застосовується при паянні для з'єднання заготовок і має температуру плавлення нижче, ніж метали, що сполучаються. Застосовують сплави на основі олова, свинцю, кадмію, міді, нікелю, срібла та інші. Існують також неметалеві припої.

Термін служби паяного з'єднання залежить від правильності технології пайки і параметрів навколишнього середовища в експлуатації.

Припої випускаються у вигляді гранул, прутків, дроту, порошку, фольги, паст і заставних деталей.

Пайку здійснюють або з метою створення механічне міцного (іноді герметичного) шва, або для отримання електричного контакту з малим перехідним опором. При пайці місць з'єднання припій нагрівають понад температури його плавлення. Так як припій має температуру плавлення нижче, ніж температура плавлення металу (або металів), з яких виготовлені деталі, що з'єднуються, то він плавиться, в той час як метал деталей залишається твердим. На межі дотику розплавленого припою і твердого металу відбуваються різні фізико-хімічні процеси. Припій змочує метал, розтікається по ньому і заповнює зазори між деталями. При цьому компоненти припою дифундують в основний метал, основний метал розчиняється в припої, в результаті чого утворюється проміжний прошарок, який після застигання з'єднує деталі в одне ціле.

При виборі припою потрібно керуватися наступними принципами:

- 1) температура плавлення деталей, що паяються, повинна бути вище, ніж температура плавлення припою,
- 2) повинен добре змочувати основний матеріал,
- 3) значення коефіцієнтів температурного розширення основного матеріалу й припою також повинні бути близькі,
- 4) найменша токсичність припою,
- 5) припій не повинен погіршувати механічні властивості основного матеріалу і утворювати з ним гальванічну пару, що приводить до інтенсивної корозії в процесі експлуатації,
- 6) властивості припою повинні відповідати техніко-експлуатаційним вимогам, що пред'являються до конструкції в цілому (міцність, електропровідність, стійкість до корозії, охолодження і ін.),
- 7) припої з обмеженим інтервалом кристалізації вимогливі до якості підготовки поверхонь до пайки і забезпечення точного капілярного зазору, при великих зазорах краще застосовувати композиційні припої,
- 8) для проведення вакуумної пайки і пайки в середовищі захисних газів найбільш підходящими є самофлюсуючі припої, без вмісту цинку та інших металів з високою пружністю парів,
- 9) для пайки неметалевих деталей використовують припої з добавками елементів, що володіють найбільшим хімічним спорідненістю (для кераміки і скла - з цирконієм, гафнієм, індієм, титаном).

Припої класифікують за кількома ознаками:

1. За температурою плавлення:

а) низькотемпературні ($T_{пл}$ до $450^{\circ}C$ на основі галію, індію, олова, вісмуту, цинку, свинцю і кадмію): особливо легкоплавкі ($T_{пл}$ до $145^{\circ}C$), легкоплавкі ($T_{пл}$ від $145^{\circ}C$ до $450^{\circ}C$);

б) високотемпературні ($T_{пл}$ більше $450^{\circ}C$ на основі міді, алюмінію, нікелю, срібла, заліза, кобальту, титану): середнєплавкі ($T_{пл}$ від $450^{\circ}C$ до $1100^{\circ}C$), високоплавкі ($T_{пл}$ від $1100^{\circ}C$ до $1850^{\circ}C$), тугоплавкі ($T_{пл}$ більше $1850^{\circ}C$).

2. За типом розплавлення: ті, що повністю і не повністю розплавляються (композиційні, з твердого наповнювача і легкоплавкої частини).

3. За способом отримання припою - готові та утворені в процесі пайки (контактно-реактивна пайка). При контактно-реактивній пайці припій виходить в результаті розплавлення основного металу, прокладок (фольги), покриттів або витіснення металу з флюсу.

4. За основним хімічним елементом в складі припою (вміст більше 50%): індієві, галієві, олов'яні, магнієві, цинкові, алюмінієві, мідні, срібні, золоті, нікелеві, кобальтові, залізні, марганцеві, паладієві, титанові, ніобієві, цирконієві, ванадієві, змішані припої з двох елементів.

5. За способом утворення флюсу: самостійне утворення флюсу (що містить літій, бор, калій, кремній, натрій) та додавання флюсу. Флюс служить для видалення окислів і захисту крайок від окислення.

6. За технологією виготовлення припою: пресовані, штамповані, катані, литі, спечені, аморфні, подрібнені.

7. За видом припою: пруткові, дотові, трубчасті, стрічкові, листові, композитні, порошкові, пастоподібні, у вигляді таблеток, у вигляді заставних деталей.

Серед низькотемпературних припоїв найбільшого поширення набули олов'яно-свинцеві припої ($T_{пл} = 183\text{ }^{\circ}\text{C}$ при утриманні олова 60%). Зміст олова може коливатися в межах 30 ... 60%, $T_{пл}$ - від $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, при більшому вмісті цього елемента температура плавлення знижується, збільшується текучість сплавів.

Так як сплав олова і свинцю схильний до розсіпання і погано взаємодіє з металами при пайці, то до складу цих припоїв вводять легуючі добавки цинку, алюмінію, срібла, кадмію, сурми, міді.

Сполуки кадмію покращують властивості припоїв, однак володіють підвищеною токсичністю. Припої з підвищеним вмістом цинку застосовують для пайки кольорових металів - міді, алюмінію, латуні і цинкових сплавів. Олов'яні припої володіють теплостійкістю до температури близько $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, свинцеві - до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Свинець також швидко кородує в умовах тропічного клімату.

Найбільш легкоплавкими припоями є склади, що містять галій ($T_{пл} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$). Припій з галію і олова припій має $T_{пл} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вісмутіві припої мають $T_{пл}$ від $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $167\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такі припої при затвердінні збільшують свій об'єм.

Температура плавлення індію - $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Індієві припої використовують при пайці матеріалів з різними температурними коефіцієнтами розширення (наприклад, сталі, що стійка до корозії, з кварцовим склом), так як він має властивість високої пластичності. Індій має стійкість до окислення, корозійну стійкість до лугів, гарну електро - і теплопровідність і змочування.

Серед високотемпературних припоїв найбільш легкоплавкими є склади на основі міді. Мідні припої знаходять застосування при пайці сталі і чавуну, нікелю і його сплавів, а також при вакуумній пайці. Мідно-фосфорні припої (вміст фосфору до 7%) застосовують для пайки міді як альтернатива срібному припою.

Більш високою пластичністю володіють мідні припої з добавками срібла і марганцю. З метою підвищення механічних властивостей вводять також добавки нікелю, цинку, кобальту, заліза, лужних металів, бору і кремнію.

Мідно-цинкові припої більш тугоплавкі ($T_{пл}$ більше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ при кількості цинку до 39%), застосовуються для пайки вуглецевих сталей і різномірних матеріалів. Втрати цинку у вигляді випарів змінюють властивості припою і шкідливі для здоров'я, як і пари кадмію. Для зниження цього ефекту в припій вводять кремній.

Мідно-нікелеві припої підходять для пайки деталей з корозійно-стійких сталей. Нікелева складова підвищує $T_{пл}$. Для її зниження в припій вводять кремній, бор, марганець.

Срібні припої виготовляють у вигляді системи «мідь-срібло» ($T_{пл}$ від $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $860\text{ }^{\circ}\text{C}$). Срібні припої містять в своєму складі добавки, що знижують $T_{пл}$ (олово, кадмій, цинк), і підвищують міцність з'єднання (марганець і нікель). Срібні припої є універсальними і застосовуються для пайки металів і неметалів.

При пайці жароміцних сталей застосовують нікелеві припої системи «нікель-марганець». Крім марганцю такі припої містять і інші добавки, що підвищують жароміцність: цирконій, ніобій, гафній, вольфрам, кобальт, ванадій, кремній і бор.

Пайку алюмінію виробляють алюмінієвими припоями з додаванням міді, цинку, срібла і кремнію, що знижують $T_{пл}$. Останній елемент утворює з алюмінієм систему, яка найбільш стійка до корозії.

Пайку тугоплавких металів (молібден, ніобій, тантал, ванадій) здійснюють чистими або композиційними припоями з високою $T_{пл}$ на основі цирконію, титану та ванадію. Пайку вольфраму роблять складними припоями систем «титан-ванадій-ніобій», «титан-цирконій-ніобій» та іншими.

М'які припої

До м'яких припоїв відносяться олов'яно-свинцеві сплави (ПОС) з вмістом олова від 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90), решта - свинець. Електропровідність цих припоїв становить 9-15% електропровідності чистої міді. Плавлення цих припоїв починається при температурі $183\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура плавлення евтектики системи олово-свинець) і закінчується при наступних температурах плавлення ліквідуса: ПОС-15 - $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПОС-25 - $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПОС-33 - $247\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПОС-40 - $238\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПОС-61 - $183\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПОС-90 - $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Припої ПОС-61 і ПОС-63 плавляться при постійній температурі $183\text{ }^{\circ}\text{C}$, так як їх склад практично збігається зі складом евтектики олово-свинець.

Крім цих складів в якості м'яких припоїв використовуються також:

- сурм'янисті припої (ПОССу), що застосовуються при паянні оцинкованих і цинкових виробів і підвищених вимогах до міцності паяного з'єднання,
- олов'яно-свинцево-кадмієві (ПОСК) для пайки деталей, чутливих до перегріву і пайки висновків до конденсаторів і п'єзокераміки,
- олов'яно-цинкові (ОЦ) для пайки алюмінію,
- припої без свинцю, які містять поряд з оловом мідь, срібло, вісмут і ін. метали.

Тверді припої

Найбільш поширеними твердими припоями є мідно-цинкові (ПМЦ) і срібні (ПСР) з різними добавками:

Температури плавлення припоїв марок ПСР і ПМЦ: ПСР-10 - $830\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСР-12 - $785\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСР-25 - $765\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСР-45 - $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСР-65 - $740\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСР-70 - $780\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПМЦ-36 - $825\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПМЦ-42 - $833\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПМЦ-51 - $870\text{ }^{\circ}\text{C}$

Широко застосовуються мідно-фосфористі припої. До мідно-фосфористий припою відносяться сплави міді, олова з добавками фосфору. Такі припої застосовуються при паянні міді, мідних сплавів, срібла, чавуну, твердих сплавів. П81 - 660 ° С, П14 - 680 ° С, МФ7 - 820 ° С, П47 - 810 ° С

Срібні припої мають температуру плавлення від 183 до 1133 ° С і являють собою сплави срібло-свинець-олово; срібло-свинець; срібло-мідь; срібло-мідь-цинк; срібло-мідь-цинк-кадмій; і т.д.

Срібні припої мають досить широку сферу застосування:

- лудіння та паяння міді, мідно-нікелевих сплавів, нікелю, ковару, нейзильберу, латунь і бронза;
- пайка сплавів залізо - нікель з посрібленими деталями зі сталі;
- пайка сталі з міддю, нікелем, мідними і мідно-нікелевими сплавами;
- пайка міді з нікельованим вольфрамом;
- пайка титану і титанових сплавів з нержавіючої сталлю;
- пайка міді та мідних сплавів з жароміцних сплавами і нержавіючими сталями;
- пайка міді та латуні з підступний, нікелем, з нержавіючими сталями і жароміцних сплавами, пайка бронз (свинець-олово);
- паяння та лудіння міді, нікелю, мідних і мідно-нікелевих сплавів з посрібленою керамікою, пайка посріблених деталей;
- пайка міді і нікелю зі скломалью і керамікою;
- паяння та лудіння ювелірних виробів;
- пайка міді з бронзою, міді з міддю, бронзи з бронзою;
- пайка міді, мідних сплавів і сталей по мідному гальванічного покриттю товщиною не менше 10 мкм;
- паяння та лудіння кольорових металів і сталей;
- паяння та лудіння срібних деталей.

Особливі види металевих сплавів застосовуються в електровакуумній техніці для електричних ввідів, які вплавлятися в скло і працюють при порівняно низьких температурах, коли використання тут тугоплавких, але відносно дорогих металів (вольфрам, молібден, платина) не потрібно. Для цих матеріалів особливу важливість має температурний коефіцієнт лінійного розширення, який для отримання вакуум-щільного вводу повинен якомога точніше узгоджуватися зі склом. Наприклад, ковар (марка сплаву 29НК), застосовуваний для виготовлення електричних виводів через скляні колби різних газонаповнених і електровакуумних електронних приладів і освітлювальних ламп має приблизний склад: Ni - 29%, Co - 18%, Fe - інше; його питомий опір близько 0,49 мкОм · м, ТКО близько $4 \dots 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Припої без свинцю

У зв'язку з підвищенням уваги суспільства до питань екології тепер при виборі припоїв більш серйозно враховують токсичність його компонентів. В електротехніці і електроніці (особливо в побутовій) все частіше використовують безсвинцеві припої.

Розвиток автоматизованої технології для виготовлення електронних плат зумовило появу нового типу припоїв: так званих паяльних паст, придатних як для звичайного, так і трафаретного паяння елементів електронних схем. Паяльні пасту представляють собою дисперсну суміш, в якій дисперсною фазою є мікро- і

нанорозмірні частинки припою, іноді тверді компоненти флюсу, а диспергованим середовищем є рідкі компоненти флюсу і летючі органічні розчинники.

Протягом багатьох десятиліть свинцево-олов'яний припій використовувався для закріплення електронних компонентів, пайки друкованих плат. Проте, серйозні несприятливі наслідки для здоров'я, що виникають при використанні свинцю, породили активні зусилля в електронній промисловості для пошуку заміни свинцевим припоєм. Тепер вчені вважають, що знайдені деякі багатообіцяючі напрямки: припої з альтернативних сплавів і полімерні склади, відомі як електропровідний клей.

Припій є «стрижнем» виробництва електроніки. Свинець ідеально підходив як припій. Можна сказати, що вся електроніка була розроблена навколо точки плавлення і фізичних властивостей свинцю. Свинець - пластичний матеріал, не ламається і тому з ним легко працювати. Коли свинець поєднується з оловом в правильній пропорції (63% олова і 37% свинцю), сплав має низьку температуру плавлення - 183 градуса Цельсія, що є ще одним його перевагою.

При роботі з низькотемпературними процесами пайки краще здійснюється контроль над технологією виготовлення з'єднань, при цьому паяні елементи не чутливі до найменших відхилень температури. Низькі температури також означають менше навантаження на обладнання та матеріали (друковані плати і компоненти), які піддаються нагріванню в процесі складання, більш високу продуктивність виготовлення електроніки зважаючи на скорочення часу для нагрівання та охолодження.

Основним стимулом для електронної промисловості Європи для початку використання безсвинцевих припоїв стала заборона на свинець, введений Європейським союзом. Згідно обмеження директиви небезпечних речовин, на 1 липня 2006 свинець мав бути замінений іншими речовинами (директива також забороняє ртуть, кадмій, шестивалентний хром і ін. Токсичні речовини).

Будь-які електронні компоненти, що мають свинець в своєму складі, зараз в Європі підлягають забороні. У зв'язку з цим рано чи пізно іншим країнам також доведеться перейти на безсвинцеві технології з'єднань в електроніці.

Свинець, з екологічної точки зору, сам по собі не є проблемою, якщо він міститься в електронному обладнанні. Однак, коли електронні компоненти потрапляють на звалище, свинець може вимиватися з ґрунту сміттєвих полігонів і потрапляти в питну воду. Ризик збільшується в тих країнах, в які масово імпортуються електронні відходи.

У Китаї, наприклад, робочі без засобів захисту, в числі яких багато дітей, займаються розбиранням (розпаюванням) вторинної сировини з електронних компонентів. У Україні ж і донині свинцеві припої мають дуже широке поширення при не автоматизованому виготовленні електроніки.

Шкідливий вплив свинцю на здоров'я людини, навіть при низьких рівнях, добре відомий: розлади нервової і травної систем, особливо яскраво проявляються у дітей, а також здатність свинцю накопичуватися в організмі, що викликає важкі отруєння.

Виробники електроніки почали шукати альтернативні припої ще в 1990 році, коли обговорювалися нині вже ратифіковані пропозиції про заборону свинцю в

США. Експерти електронної галузі розглянули 75 альтернативних припоїв і скоротили цей список до півдюжини.

Зрештою було вибрано комбінацію з 95,5% олова, 3,9% срібла і 0,6% міді, відома також як припій марки SAC (аббревіатура від перших літер елементів Sn, Ag, Cu), що забезпечує більшу надійність і легкість роботи в якості заміни олов'яно-свинцевого припою. Точка плавлення припою SAC - 217 градусів, вона близька до точки плавлення звичайного олов'яно-свинцевого припою (183 ... 260 градусів).

Припої SAC сьогодні широко використовуються в зарубіжній промисловості. Впровадження нових типів припоїв зажадало від компаній, що виробляють електроніку, великих зусиль. У фахівців виникали побоювання, що на початковому етапі впровадження безсвинцевих припоїв можливе збільшення відмов електронної продукції.

У зв'язку з цим обладнання, причетне до життя і безпеки людини, наприклад, електроніка для лікарень, виготовляється за старою технологією. Заборона на свинцеві припої також не поширюється поки на стільникові телефони і цифрові камери. Немає однозначної відповіді і з питання повної безпеки нових припоїв на основі срібла - цей метал є токсичним для водних тварин.

Таблиця 2.14 Порівняльні характеристики деяких припоїв SAC і олов'яно-свинцевого припою

Характеристика		Sn-3,9Ag-0,6Cu (SAC-396)	Sn-3,5Ag-0,7Cu (SAC-357)	Sn-3,0Ag-0,5Cu (SAC-305)	63Sn-37Pb
Температура ліквідуса, °C		218	218	220	183
Температура солідуса, °C		217	217	217	183
Міцність до розриву, МПа		43,7	44,0	41,1	34,7
Межа плинності, МПа		31,3	35	34,2	28,4
Подовження, %		40,6	43,4	41,0	91,2
Модуль Юнга, ГПа		52	51	52	40
Питома щільність (відношення щільності зразку до щільності води)		7,4	7,4	7,4	8,4
Питома теплоємність, Дж/(г·К)		0,22	0,22	0,23	0,18
Коефіцієнт теплового поширення, 10 ⁻⁶ /К	20-60 °C	21,4	21,5	21,6	21,6
	20-100 °C	21,8	21,7	21,6	21,6

Сміливішою експериментальною альтернативою олов'яно-свинцевого припою є використання електропровідних клеїв.

Це полімери, силікон або поліамід, що містять дрібні лусочки металів, найчастіше срібло. Полімери приклеюють електронні компоненти, а металеві лусочки проводять електрику.

Ці клеї мають широкий спектр переваг. Електропровідність срібла є дуже високою, а його електричний опір малий.

Температура, необхідна для застосування клеїв для збірки друкованих плат, набагато нижче (150 °C), ніж та, яка потрібна для припоїв на основі свинцю.

Завдяки цьому, по-перше, економиться електроенергія, по-друге, електронні компоненти піддаються меншому нагріванню, в результаті підвищується їх надійність.

Фінські дослідження, представлені в 2000 році на четвертій Міжнародній конференції по клейових з'єднань і технологій покриттів в електронній промисловості, показують, що електропровідний клей створює навіть більш жорсткі зв'язки, ніж традиційні припої.

Якщо вченим вдасться збільшити електропровідність таких клеїв, то вони зможуть повністю замінити традиційні припої.

Поки що ці матеріали застосовуються для невеликого числа сполук, які проводять невелику силу струму - для пайки рідкокристалічних дисплеїв і кристалів.

Дослідження в цій області спрямовані на додавання молекул дікарбонових кислот, що забезпечують зв'язок між лусочками срібла, і відповідно, підвищують електропровідність матеріалу.

Серйозною проблемою електропровідних клеїв є можливе руйнування при нагріванні компонентів вище 150 °С.

Є й інші побоювання з приводу електропровідних клеїв. Згодом здатність клеїв проводити електрику знижується. А вода, яку може увібрати полімер, призведе до корозії.

При падінні з висоти клеї виявляють тендітні властивості, для поліпшення їх пружності в майбутньому будуть розроблені полімери з додаванням гуми. Недостатня вивченість цього матеріалу може в подальшому виявити і інші, ще невідомі проблеми.

Застосування електропровідних клеїв передбачається в області споживчої електроніки (стільникові телефони і цифрові камери), там, де надійність не є критичною, як, наприклад, в медицині і авіаційної електроніці.

Властивості припоїв і їхній хімічний склад вказані в таблицях 2.15-2.19.

Таблиця 2.15– Особливо легкоплавкі припої

Припій	Склад припою, %				Температура плавлення, °С
	Ві	Pb	Sn	Cd	
Вуда	50	25	12,5	12,5	60,5
Розе	50	25	25	-	94
Д'Арсенваля	45,3	45,1	9,6	-	79
Липовиця	50	26,67	13,33	10	-
ПОСВ 33	33,3	33,4	33,3	-	130
ПОСК 50-18	-	32	49,8	18,2	145

Таблиця 2.16 – Властивості деяких легкоплавких припоїв

Припій	Тимчасовий опір розриву, МПа	Температура ліквідуса, °С	Щільність, г/см³	Питомий електричний опір, мОм·м
ПОС-61	42,1	190	8,5	0,139
ПОСК 50-18	39,2	145	8,8	0,139
ПОС-40	37,2	238	9,3	0,159

Таблиця 2.17 – Властивості припоїв на основі олова з додатками срібла/міді

Склад припою (%)	Температура солідуса/ліквідуса, °C	Щільність, г/см ³	Питомий електричний опір, мОм·м	Питома теплопровідність, Вт/м·К	Тимчасовий опір розриву, МПа	Подовження при розриві, %	Твердість за Бринелем, НВ
Sn96,5Ag3,5	221/221	7,37	0,123	55	580	35	15
Sn95Ag05	221/240	7,40	0,137	-	565	30	14
Sn90Ag10	221/295	7,51	-	-	-	-	-
Sn99,3Cu0,7	227/227	7,31	0,126	66	300	21	9
Sn97Cu03	227/300	7,32	0,118	-	-	-	-
Sn99Ag0,3Cu0,7	217/228	7,33	-	-	300	22	14
Sn98,5Ag0,8Cu0,7	216/225	7,33	0,140	-	310	21	16
Sn98,5Ag1,0Cu0,5	215/227	7,32	0,133	60	400	13	13
Sn97,1Ag2,6Cu0,3	217/224	7,36	0,132	-	-	-	-
Sn96,5Ag3,0Cu0,5	217/220	7,38	0,132	58	500	19	15
Sn95,5Ag4,0Cu0,5	217/220	7,44	0,132	62	530	17	15
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	217/220	7,44	0,132	60	600	16	15

Таблиця 2.18 - Властивості припоїв на основі олова і свинцю

Склад припою (%)	Температура солідуса/ліквідуса, °C	Щільність, г/см ³	Питомий електричний опір, мОм·м	Питома теплопровідність, Вт/м·К	Тимчасовий опір розриву, МПа	Подовження при розриві, %	Твердість за Бринелем, НВ
Sn90Pb10	183/213	7,55	-	-	490	40	-
Sn63Pb37	183/183	8,40	0,145	50	525	37	17
Sn62,5Pb36,1Ag1,4	179/179	8,41	0,145	50	490	-	16
Sn60Pb40	183/191	8,50	0,153	49	535	40	16
Sn50Pb50 або Pb50Sn50	183/212	8,87	0,158	48	420	35	14
Pb55Sn45 або Sn45Pb55	183/227	9,07	0,166	-	-	-	-
Pb60Sn40 або Sn40Pb60	183/238	9,28	0,171	44	380	25	12
Pb65Sn35 або Sn35Pb65	183/247	9,50	0,176	-	-	-	12
Pb70Sn30 або Sn30Pb70	183/257	9,72	0,185	41	350	18	12
Pb75Sn25 або Sn25Pb75	183/268	9,96	0,194	-	240	53	11
Pb80Sn20 або Sn20Pb80	183/280	10,21	0,198	37	340	20	11
Pb85Sn15 або Sn15Pb85	183/288	10,70	-	-	330	-	11
Pb88Sn10Ag02	267/290	10,75	0,203	27	230	42	-
Pb90Sn10 або Sn10Pb90	275/302	10,75	0,194	25	310	30	10
Pb92,5Sn05Ag2,5	287/296	11,02	0,200	-	295	-	-
Pb95Sn05 або Sn05Pb95	308/312	11,06	0,196	23	280	45	8
Pb97,5Ag1,5Sn01	309/309	11,28	0,287	23	310	23	9

Таблиця 2.19 - Властивості припоїв на основі індію, свинцю або олова з додатками срібла

Склад припою (%)	Температура солідуса/ліквідуса, °C	Щільність, г/см ³	Питомий електричний опір, мОм·м	Питома теплопровідність, Вт/м·К	Тимчасовий опір розриву, МПа	Подовження при розриві, %	Твердість за Бринелем, НВ
In70Pb30	165/175	8,19	0,196	38	245	-	-
In60Pb40	173/181	8,52	0,246	29	290	-	-
In50Pb50	184/210	8,86	0,287	22	330	55	10
Pb60In40	197/231	9,30	0,332	19	350	-	-
Pb75In25	240/260	9,97	0,375	18	385	48	10
Pb81In19	260/275	10,27	0,383	17	390	-	-
Pb95In05	300/313	11,06	0,338	21	305	52	6
In52Sn48	118/118	7,30	0,147	34	120	83	5
In50Sn50	118/125	7,30	0,147	34	120	83	5
In97Ag03	143/143	7,38	0,075	73	55	-	2
In90Ag10	143/237	7,54	0,078	67	115	61	3
In80Pb15Ag05	149/154	7,85	0,133	43	180	58	5
Pb90In05Ag05	290/310	11,00	0,308	25	405	23	9
Pb92,5In05Ag2,5	300/310	11,02	0,313	25	320	-	-
Sn77,2In20Ag2,8	175/187	7,25	0,176	54	480	47	17
Sn37,5Pb37,5In25	134/181	8,42	0,221	23	370	101	10
Sn70Pb18In12	154/167	7,79	0,141	45	375	136	12

Контрольні питання до підрозділу 2.8

1. В яких областях виробництва використовуються тугоплавкі метали?
2. Де використовуються легкоплавкі метали?
3. Які метали відносяться до благородних?
4. Які ви знаєте неметалеві провідники?
5. Які типи вуглецевих щіток використовують у швидкооберткових двигунах? Відповідь пояснить..
6. Як класифікуються припої?
7. Чому останнім часом заборонено в умовах судна використовувати припої, які утримують у своєму складі свинець?

3 ДІЕЛЕКТРИКИ

Для характеристики діелектриків, що застосовуються в електротехніці використовують різні електричні параметри, які характеризують поведінку матеріалу в електричному полі.

3.1 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.1.1 Основні поняття

Поляризація діелектриків – явище, що пов'язане із обмеженим зміщенням пов'язаних зарядів в діелектрику або поворотом електричних диполів, зазвичай під дією зовнішнього електричного поля, іноді під дією інших зовнішніх сил або спонтанно.

Поляризацію діелектриків характеризує **вектор електричної поляризації**, фізичний зміст якого – це дипольний момент віднесений до одиниці об'єму. Іноді вектор поляризації коротко звуть просто поляризацією. Вектор поляризації застосовують для опису макроскопічного стану поляризації не тільки звичайних діелектриків, але й сегнетоелектриків (тобто для опису не тільки індукованої, але й спонтанної поляризації).

Поляризація – стан діелектрика, який характеризується наявністю електричного дипольного моменту у будь-якого (або майже будь-якого) елемента його об'єму.

Розрізняють поляризацію, наведену в діелектрику під дією зовнішнього електричного поля та спонтанну (мимовільну) поляризацію. В деяких випадках поляризація відбувається під дією механічних напруг, тертя, температури.

Поляризація не змінює сумарного заряду в будь-якому макроскопічному об'ємі усередині однорідного діелектрика. Однак вона супроводжується появою на його поверхні пов'язаних електричних зарядів з деякою поверхневою щільністю σ . Ці пов'язані заряди створюють в діелектрику додаткове макроскопічне поле із напруженістю E_1 , що спрямоване проти зовнішнього поля напруженістю E_0 . В результаті напруженість поля E усередині діелектрика буде $E = E_0 - E_1$.

Здатність різних матеріалів поляризуватися в електричному полі характеризується **відносною діелектричною проникністю** $\varepsilon = C_d / C_0$, де C_d – ємність конденсатора із діелектриком; C_0 - ємність того ж конденсатора в порожнечі (тобто геометрична ємність між електродами). **Абсолютна діелектрична проникність** ε_a , значення якої залежить від вибору системи одиниць з відносною діелектричною проникністю; $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$, де $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична постійна. Поляризація супроводжується появою на поверхні діелектриків пов'язаних електричних зарядів, що зменшують напруженість поля усередині речовини. Кількісною характеристикою поляризації служить **поляризованість** діелектрика P – векторна фізична величина, що дорівнює відношенню електричного моменту dp елемента діелектрика до об'єму dV цього елемента $P = dp / dV$. Поляризованість однорідного плоского діелектрика при рівномірному електричному полі рівна поверхневій щільності пов'язаних зарядів. Для більшості

діелектриків в слабких електричних полях поляризованість пропорційна напруженості поля: $P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0\chi E$, де χ - діелектрична чутливість. В ізотропних діелектриках напрямки векторів P та E співпадають. Для анізотропних середовищ (кристали, текстури) діелектрична чутливість тензорною характеристикою, тому напрямки цих векторів в загальному випадку є різними. В сильних електричних полях порушується лінійна залежність між поляризованістю та напруженістю поля (нелінійні ефекти). На рисунку 3.1 наведена схема заміщення реального діелектрика, що володіє різними типами поляризації.

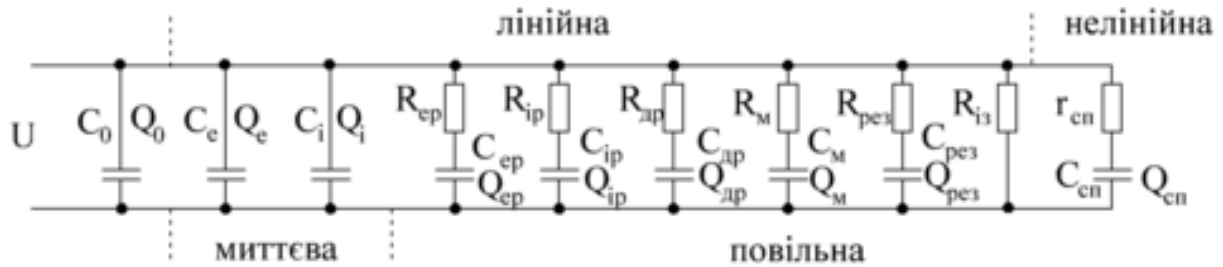


Рисунок 3.1 - Схема заміщення реального діелектрика з різними типами поляризації

В залежності від механізму поляризації розрізняють наступні типи:

- Електронна – зміщення електронних оболонок атомів під дією зовнішнього електричного поля. Сама швидка поляризація (до 10^{-15} с). Не має втрат.
- Іонна – зміщення вузлів кристалової структури під дією зовнішнього електричного поля на величину, що менше постійної решітки. Час протікання 10^{-13} с, без втрат.
- Дипольна (орієнтаційна) протікає із втратами на подолання сил зв'язку та внутрішнього тертя, пов'язана із орієнтацією диполів в зовнішньому електричному полі.
- Електронно-релаксацийна - орієнтація дефектних електронів в зовнішньому електричному полі.
- Іонно-релаксацийна – зміщення іонів, що слабо закріплені у вузлах кристалової решітки, або знаходяться у міжвузлі.
- Структурна – орієнтація домішок та неоднорідних макроскопічних включень. Самий повільний тип.
- Мимовільна (спонтанна). Завдяки цьому типу поляризації у діелектриків, в яких вона спостерігається, поляризація має нелінійні властивості навіть при малих значеннях зовнішнього поля, є явище гистерезиса, високі значення діелектричної проникності та тангенсу куту діелектричних втрат.
- Резонансна – орієнтація часток, власні частоти яких співпадають із частотами зовнішнього електричного поля.
- Міграційна – обумовлена наявністю в матеріалі шарів із різною провідністю, утворення об'ємних зарядів, особливо при високих градієнтах напруги, має великі втрати та повільну дію.

Поляризація діелектриків (за винятком резонансної) максимальна в статичних електричних полях.

У змінних полях у зв'язку із наявністю інерції електронів, іонів, електричних диполів вектор електричної поляризації залежить від частоти.

3.1.2 Електронна поляризація

Електронна поляризація (рисунок 3.2) – пружне зміщення та деформація електронних оболонок атомів та іонів.

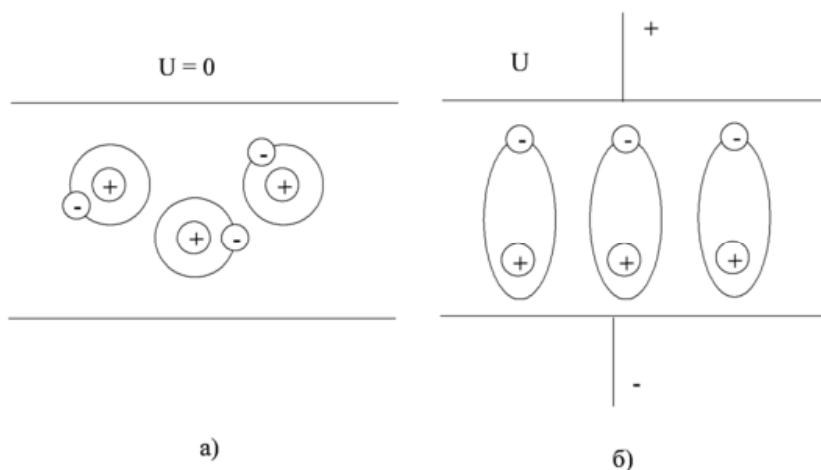


Рисунок 3.2 - Схематичне зображення електронної поляризації

Центр орбіти електрона зміщується на відстань, яка залежить від напруженості поля E та резонансної частоти атома. Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (біля 10^{-15} с), тому електронну поляризацію умовно звать миттєвою. Електронна поляризація відбувається без втрат енергії, в діелектрику є тільки ємнісна складова струму. Поляризованість часток не залежить від температури а діелектрична проникність зменшується (рисунок 3.3) із підвищенням температури завдяки тепловому поширенню діелектрика та зменшенню часток в одиниці об'єму.



Рисунок 3.3 - Температурна залежність діелектричної проникності при деяких типах поляризації

Із рисунка видно, що діелектрична проникність набуває суттєвих змін при агрегатних переходах. На рисунку 3.4 наведена частотна залежність діелектричної проникності при різних типах поляризації.

Слід відзначити, що електронна поляризація спостерігається у всіх речовинах, бо вона потребує тільки наявності електрона.

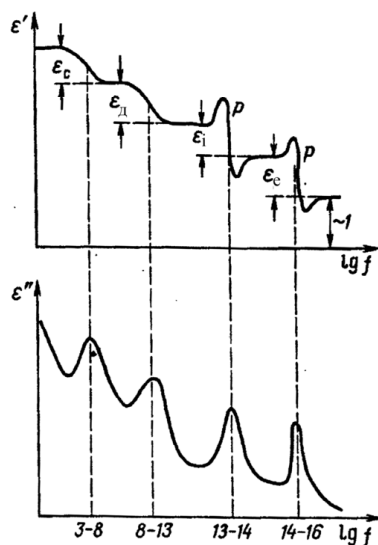


Рисунок 3.4 - Частотна залежність діелектричної проникності ϵ' - дійсна, ϵ'' - мнима частина, $\epsilon_c, \epsilon_d, \epsilon_i, \epsilon_e$ - вклади структурної, дипольної, іонної, електронної поляризації; p – області резонансу

3.1.3 Іонна поляризація

Іонна поляризація характерна для твердих тіл із іонною будовою, обумовлена зміщенням іонів, що пружне пов'язані, на відстані у межах кристалічної решітки (рисунок 3.5)

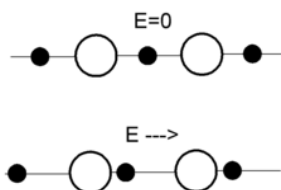


Рисунок 3.5 - Механізм іонної поляризації

Ця поляризація спостерігається у твердих тілах із іонною кристалічною решіткою. Зміщення іонів відбувається по малих відстанях за рахунок її пружної деформації.

Зміщенню іонів під дією поля перешкоджають пружні сили хімічного зв'язку. Зміщення іонів двох різнойменних за зарядом іонів приводить до появи елементарного електричного моменту.

Сума таких елементарних моментів, що приходить на одиницю об'єму, визначає іонний вклад в поляризованість діелектрика.

З підвищенням температури відстані між іонами внаслідок теплового поширення матеріалу зростають.

В більшості випадків це супроводжується зменшенням сил пружного зв'язку та зростанням поляризованості діелектрика. Час встановлення іонної поляризації – біля 10^{-13} с.

3.1.4 Дипольна поляризація

Дипольна поляризація відрізняється від електронної та іонної тим, що дипольні молекули, які знаходяться у хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля, що є причиною поляризації (рисунок 3.6).

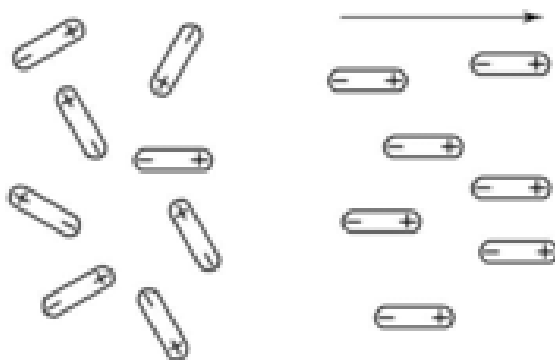


Рисунок 3.6 - Механізм дипольної поляризації

Вона можлива, якщо молекулярні сили не перешкоджають дипольям орієнтуватися вздовж електричного поля. У симетричних неполярних молекул (H_2 , O_2 , N_2) під дією електричного поля виникає пружна поляризація.

У деяких несиметричних полярних молекул (CO , HCl , NH) центри зарядів зсунуті відносно один одного так, що така молекула має власний постійний момент. Так як вектори дипольних моментів у відсутність електричного поля орієнтовані хаотично, сумарний дипольний момент дорівнює нулю.

Зовнішнє електричне поле прагне орієнтувати дипольні моменти молекул паралельно вектору E (тепловий рух цьому протидіє) так, що речовина в цілому набуває дипольний момент, який відрізняється від нуля.

Така поляризованість зветься орієнтаційною. Із підвищенням температури молекулярні сили послаблюються, що повинне підсилити поляризацію, однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, яка зменшує орієнтаційну дію поля.

Тому температурна залежність діелектричної проникності має максимум. Така поляризація зазвичай є у полярних рідин, однак може спостерігатися і у твердих полярних органічних речовинах.

Однак в цьому випадку поляризація зазвичай обумовлена вже поворотом не самої молекули, а наявних в неї полярних радикалів по відношенню до молекули. Таку поляризацію називають дипольно-радикальною або структурною.

Структурна поляризація має місце в матеріалах, що абсорбують вологу та в рослинних клітках. Вона потребує для свого розвитку деякого часу, тому при високих частотах майже непомітна

3.1.5 Електронно-релаксаційна поляризація

Електронно-релаксаційна поляризація (рисунок 3.7) відрізняється від електронної та іонної та виникає внаслідок збудження теплової енергії надлишкових (дефектних) електронів або дірок.

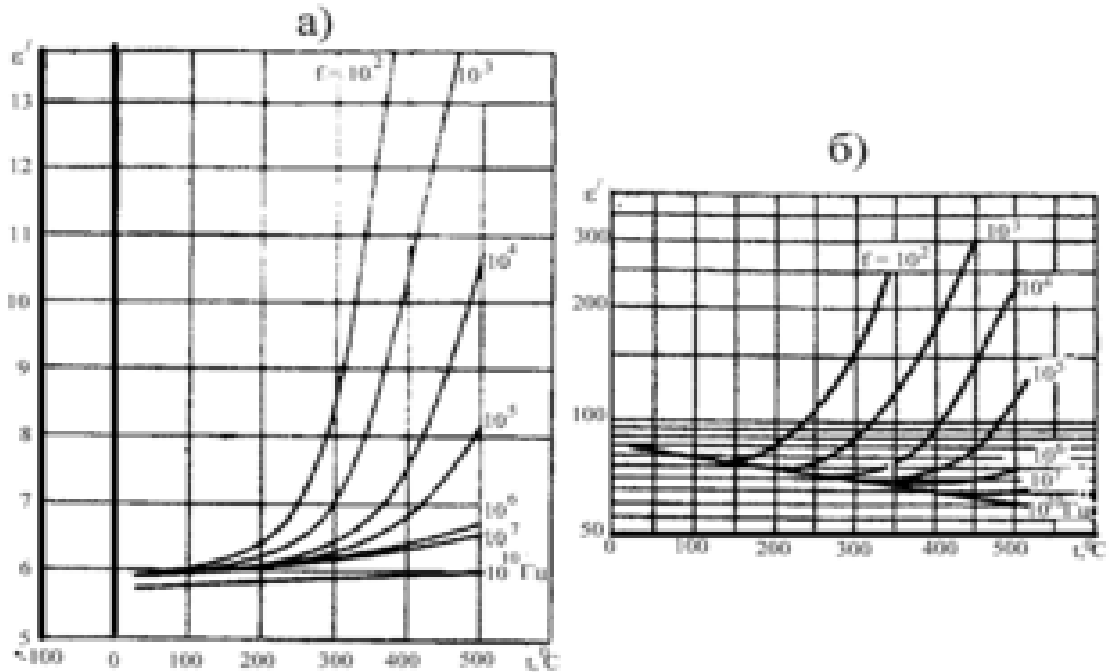


Рисунок 3.7 - Температурна залежність стеатитової (а) та титанової кераміки (б) при різних частотах

Вона характерна для діелектриків із високим показником переломлення, великим внутрішнім полем та електронною провідністю, наприклад, діоксиду титана із домішками Nb, Ca, Ba , діоксиду титана із аніонними вакансіями, ряду з'єднань на основі окислів металів змінної валентності – титану, ніобію, вісмуту.

Електронно-релаксаційна поляризація характеризується орієнтацією електричним полем надлишкових електронів в атомах кристалічної решітки, збуджених тепловим рухом. Цей матеріал застосовується для виготовлення керамічних конденсаторів при обмежених значеннях робочої частоти.

Діелектрична проникність зменшується із підвищенням частоти електричного поля. Як видно з рисунку 3.7 при наявності електронно-релаксаційної поляризації при високих температурах в випадку кераміки, що утримує титан величина чутливості змінює знак.

Зверніть увагу на великі значення діелектричної проникності, а також наявність максимуму в температурній залежності навіть при негативних температурах. Діелектрична проникність зменшується із підвищенням частоти.

3.1.6 Іонно-релаксаційна поляризація

Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в неорганічних стеклах та в деяких іонних речовинах із нещільним пакуванням іонів. В цьому випадку слабо пов'язані іони речовини під дією зовнішнього електричного поля отримують надлишкові перекиди у напрямку поля, що показано на рисунку 3.8.

Із підвищенням температури поляризація значно зростає. У відсутність зовнішнього електричного поля всі напрями перекидів іонів крізь потенційний бар'єр рівноймовірні. Тому розподіл іонів рівномірний.

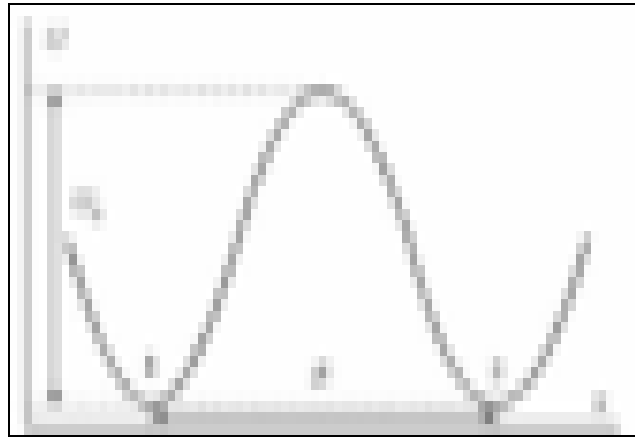


Рисунок 3.8 - Залежність потенційної енергії іона від відстані при відсутності електричного поля

З рисунку 3.9 слідує, що вірогідність перекиду іона із положення 1 в положення 2 зростає, а вірогідність зворотних перекидів зменшується. Це відбувається тому, що за рахунок накладення поля потенційний бар'єр в першому випадку зменшується на ΔU , а в другому – зростає на цю величину.

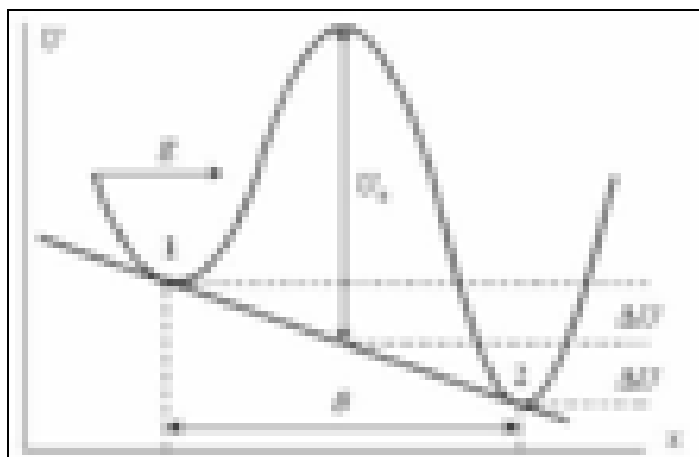


Рисунок 3.9 - Залежність потенційної енергії іона від відстані при наявності електричного поля

3.1.7 Спонтанна поляризація

Спонтанна (сегнетоелектрична) поляризація спостерігається у деяких класах полярних іонних кристалів і речовинах, що відносяться до групи рідкокристалічних, в певному температурному інтервалі спостерігаються фазові переходи без зміни агрегатного стану, в процесі яких відбувається суттєва перебудова їх структури.

Така перебудова не порушуючи фізично і хімічно однорідну будову речовини, призводить до істотної зміни електричних властивостей діелектриків (провідності, діелектричної проникності), оптичної активності та ін.

Поблизу фазових переходів, що виникають при зміні параметрів навколишнього середовища, дані параметри можуть змінюватися різко, іноді на кілька порядків за величиною. Такі фазові переходи, при яких неполярні речовини мимовільно (спонтанно) переходять в полярне стан називають сегнетоелектричними, а сам процес переходу в новий стан спонтанної поляризацією. Неполярна фаза, як правило, є більш високотемпературною, ніж полярна, але в кожній сегнетоелектричній речовині фазові переходи мають свої особливості.

Для сегнетоелектриків характерні залежності діелектричної проникності від температури з різко вираженим максимумом, який спостерігається поблизу точки переходу (точки Кюрі T_K).

Сегнетоелектрики характеризуються надзвичайно високими значеннями діелектричної проникності (до 10^3 - 10^5), хоча деякі водорозчинні сегнетоелектрики мають $\epsilon = 5 - 6$. характерні властивості сегнетоелектриків обумовлені наявністю у них доменної структури - взаємопов'язаних мікрообластей, в межах яких вектори поляризації структурних осередків мають однаковий напрямок.

Температурна і частотна залежності діелектричної проникності для найбільш вивченого сегнетоелектрика титанату барію BaTiO_3 показані на рисунку 3.10 та рисунку 3.11. Для сегнетоелектриків характерна нелінійна залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля, тому вони відносяться до нелінійних діелектриків.

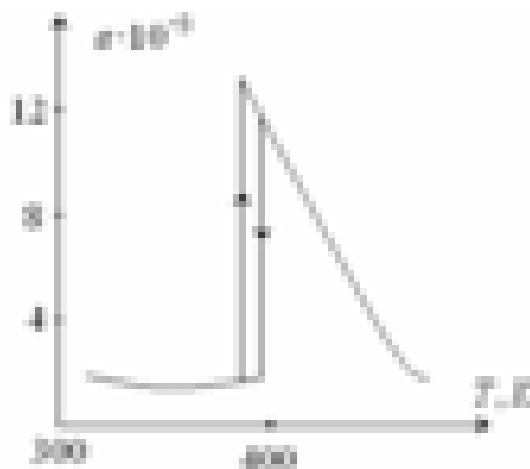


Рисунок 3.10 - Температурна залежність діелектричної проникності для титанату барію

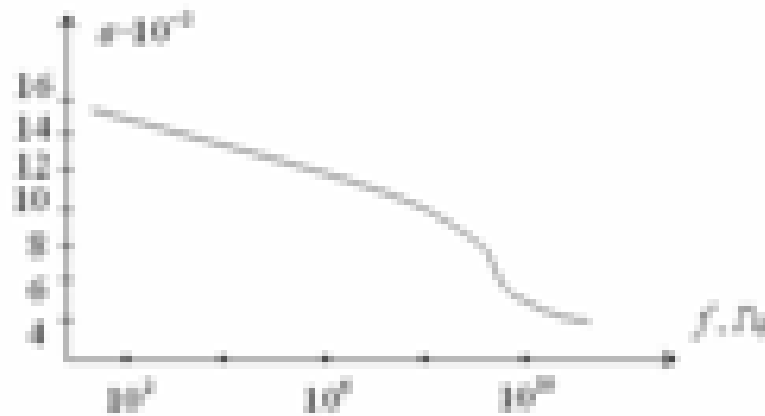


Рисунок 3.11 - Частотна залежність діелектричної проникності для титанату барію

3.1.8 Інші види поляризації

Міграційна (міжшарова) поляризація спостерігається в твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічній неоднорідності та наявності домішок. Ця поляризація виникає при найбільш низьких частотах та пов'язана із значним розсіянням електричної енергії. Причинами виникнення такої поляризації є провідні та напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів із різною провідністю. Фізичною основою міграційної поляризації є переміщення іонів в діелектрику на значні відстані, що сумірні із товщиною всього діелектрика. Ці переміщення приводять до створення просторових зарядів на межах розділу діелектрика, тому ця поляризація зветься міжшаровою. Час на таке переміщення великий, тому відбувається запізнення (релаксація). В загальному випадку цей процес аналогічний до іонно-релаксаційної поляризації, однак переміщення зарядів відбувається на значно більші відстані.

Поляризація ядерного зсуву спостерігається в діелектриках, молекули яких складаються з кількох атомів. Під дією електричного поля ядра зміщуються на деяку відстань від свого первинного положення, що викликає асиметрію в розподілі електричних зарядів і, відповідно, поляризацію, яка називається поляризацією ядерного зсуву. Встановлюється миттєво (10^{-13} с). Зміщення пружне, не викликає діелектричних втрат.

Залишкова (електретна) поляризація спостерігається у багатьох діелектриках, в яких поляризований стан, створений яким-небудь способом, можна зафіксувати так, що він зберігається після вимикання зовнішнього поля без всяких сторонніх впливів протягом тривалого часу. Такі діелектрики отримали назву електретів. Електретний стан може бути створений різними методами. У відповідності з цим електрети розподіляють на термо-, фото-, електро-, магніто-, трібо-, механо- та радіо-електрети. Термоелектрети отримують так. При підвищеній температурі діелектрик поляризується в сильному зовнішньому полі, а потім у цьому ж полі охолоджується. В результаті такої обробки поляризований стан виявляється «замороженим», оскільки час релаксації повільних теплових механізмів при зменшенні температури знижується у тисячі та мільйони разів:

Поляризований стан термоелектрета може зберігатися протягом багатьох років. Електрет створює в навколишньому просторі електричне поле, подібно магніту, що становить джерело постійного магнітного поля. Електретний стан є метастабільним. Нагрівання термоелектрета при $E = 0$ приводить його до деполаризації.

Фотоелектрети формують з діелектриків, що володіють підвищеною фотопровідністю, при одночасному впливі електричного поля і світла. Фотоелектретний стан може бути ліквідований сильним електричним полем. При одночасному впливі електричного і магнітного поля може бути отриманий магнітоелектрет. Електро-, трібо-, механо-, і радіоелектрети отримують при впливі лише одного фактора: відповідно, сильного електричного поля, тертя, механічної деформації та радіаційних впливів.

П'єзоелектрична поляризація спостерігається в діелектриках з нецентросиметричною структурою, де крім розглянутих вище механізмів поляризації, індукованих зовнішнім полем, можлива вимушена поляризація, при якій дипольний момент виникає під дією механічних напруг (рисунк 3.12).

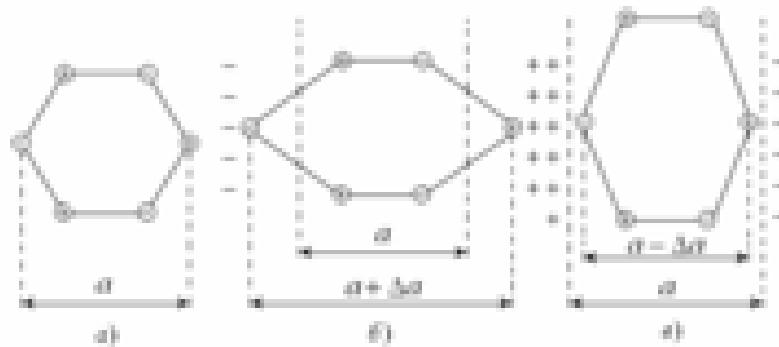


Рисунок 3.12 - Механізм п'єзополаризації кристалу кварцу: а – елементарна комірка при відсутності механічних впливів, б – елементарна комірка стиснута, в – елементарна комірка розтягнута.

Поява поляризації в діелектрику під дією механічних напруг називається прямим п'єзоефектом. Крім прямого п'єзоефекту існує і зворотний. Він полягає в тому, що при накладенні зовнішнього електричного поля кристал кілька стискається або розширюється. П'єзоефект спостерігається у всіх кристалах, що не мають центра симетрії. Під дією механічних напруг відбувається зміщення заряджених частинок і, таким чином, виникає дипольний момент. Зміщення частинок в кристалах з центром симетрії не приводить до появи поляризованого стану, бо в цьому випадку в силу наявності центру симетрії відбувається електрична компенсація моментів, утворених за рахунок зміщення позитивно і негативно заряджених частинок.

Резонансна поляризація спостерігається в діелектриках при світлових частотах. Вона залежить від фізико-хімічних особливостей речовини, може ставитися до власної частоти електронів або іонів (при дуже високих частотах) або до характеристичної частоти дефектних електронів (при більш низьких частотах). Резонансні втрати спостерігаються в газах і твердих тілах, якщо частота електричного поля збігається з частотою власних коливань частинок. Вони виражаються в інтенсивному поглинанні енергії електромагнітного поля і

використовуються для накачування лазерів. Час встановлення резонансної поляризації не залежить від температури і лежить в межах 10^{-12} - 10^{-13} с. Внесок від резонансної поляризації звертається в нуль, коли частота змінного електричного поля дорівнює власній частоті осцилятора.

Контрольні питання до підрозділу 3.1

1. Як залежить поляризованість та діелектрична проникність від температури при електронній поляризації?
2. В чому складається різниця між іонною та іонно-релаксаційною поляризацією?
3. Що характеризує час релаксації, від яких факторів він залежить?
4. В яких речовинах спостерігається дипольно-релаксаційна поляризація?
5. В чому складається ефект міграційної поляризації?
6. Що називають сегнетоелектричною точкою Кюрі?
7. Яким чином отримують електрети різних видів?

3.2 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

3.2.1 Основні поняття

Діелектричними втратами називають електричну потужність, затрачену на нагрів діелектрика, що знаходиться в електричному полі. Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі, оскільки в технічних матеріалах виявляється наскрізний струм витоку, обумовлений електропровідністю. При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого опорів, які визначають значення R_{iz} (рисунок 3.1). При впливі змінної напруги на діелектрик в ньому крім наскрізної електропровідності можуть проявлятися інші механізми перетворення електричної енергії в теплову. Тому якість матеріалу недостатньо характеризувати тільки опором ізоляції. В інженерній практиці найчастіше для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі використовують кут діелектричних втрат, а також тангенс цього кута.

Кутом діелектричних втрат δ називають кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз φ між струмом і напругою в ємнісному колі. У разі ідеального діелектрика вектор струму в такому колі випереджає вектор напруги на кут 90° ; при цьому кут δ дорівнює нулю. Чим більше розсіюється в діелектрику потужність, тим менше кут зсуву фаз φ і тим більше кут діелектричних втрат δ і значення функції $\operatorname{tg}\delta$. Тангенс кута діелектричних втрат безпосередньо входить в формулу для розрахунку потужності, що розсіюється в діелектрику, тому практично найбільш часто користуються цією характеристикою.

Розглянемо схему, еквівалентну конденсатору з діелектриком, що має втрати (рисунок 3.13).

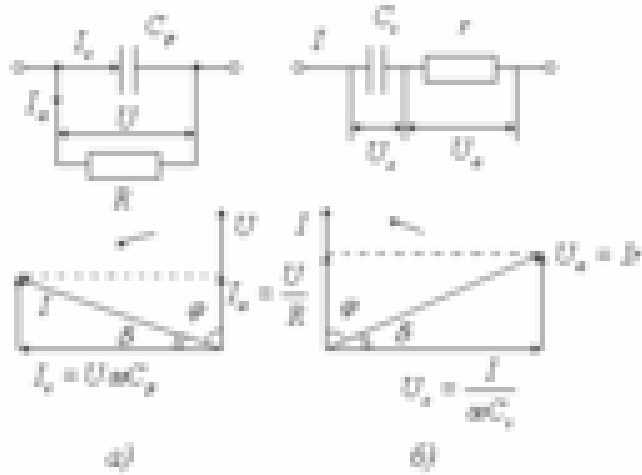


Рисунок 3.13 - Паралельна (а) і послідовна (б) еквівалентні схеми діелектрика з втратами і векторні діаграми для них

Ця схема повинна бути обрана з таким розрахунком, щоб активна потужність, що виділяється в даній схемі, дорівнювала потужності, що розсіюється в діелектрику конденсатора, а струм був би зрушений щодо напруги на той же кут, що і в розглянутому конденсаторі. Поставлену задачу можна вирішити, замінивши конденсатор з втратами ідеальним конденсатором з паралельно включеним активним опором (паралельна схема) або конденсатором з послідовно включеним опором (послідовна схема). Такі еквівалентні схеми, звичайно, не дають пояснення механізму діелектричних втрат і введені тільки умовно. Паралельна і послідовна еквівалентні схеми представлені на рисунку 3.13. там ж наведені відповідні діаграми струмів і напруг. Обидві схеми еквівалентні одна одній, якщо при рівності повних опорів рівні активні і реактивні складові. Ця умова буде дотримана, якщо кути зсуву струму щодо напруги дорівнюють і значення активної потужності однакові.

Для паралельної схеми з векторної діаграми:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c = 1 / \omega C_p R, \quad (3.1)$$

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (3.2)$$

Для послідовної схеми:

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c = \omega C_s r, \quad (3.3)$$

$$P_a = IU_a = I^2 r = \frac{U^2 r}{x^2 + r^2} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (3.4)$$

Прирівнюючи вирази (3.2) і (3.4), а також (3.1) і (3.3), знайдемо співвідношення:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad R = r \left(1 + \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (3.5)$$

Для доброякісних діелектриків можна знехтувати значенням $\operatorname{tg}^2\delta$ порівняно з одиницею в формулі (3.5) і вважати $C_p \approx C_s = C$. Вирази для потужності, що розсіюється в діелектрику, в цьому випадку будуть також однакові для обох схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta. \quad (3.6)$$

де P_a виражено в Вт; U - в В; ω - в с^{-1} ; C - в Ф.

Слід зазначити, що при змінній напрузі на відміну від постійної ємність діелектрика з великими втратами стає умовною величиною і залежить від вибору тієї чи іншої еквівалентної схеми. Звідси і діелектрична проникність матеріалу з великими втратами при змінній напрузі також умовна. Для більшості діелектриків параметри еквівалентної схеми залежать від частоти. Тому, визначивши яким-небудь методом значення ємності і еквівалентного опору для даного конденсатора при деякій частоті, не можна використовувати ці параметри до розрахунку кута втрат на інших частотах. Такий розрахунок справедливий тільки в окремих випадках, коли еквівалентна схема має певне фізичне обґрунтування. Так, якщо для даного діелектрика відомо, що втрати в ньому визначаються тільки втратами від наскрізної електропровідності в широкому діапазоні частот, то кут втрат конденсатора з таким діелектриком може бути обчислений для будь-якої частоти, лежачої в цьому діапазоні, за формулою (3.1). Втрати в такому конденсаторі визначаються виразом: $P_a = U^2 / R$.

Якщо ж втрати в конденсаторі обумовлені головним чином опором підвідних та з'єднувальних проводів, а також опором самих електродів (обкладинок), наприклад, тонким шаром срібла в слюдяному або керамічному конденсаторі, потужність розсіяння зростає з частотою пропорційно квадрату частоти:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta = U^2 \omega^2 C^2 r. \quad (3.7)$$

З виразу (3.7) можна зробити вельми важливий практичний висновок: конденсатори, призначені для роботи на високій частоті, повинні мати по можливості малий опір як електродів, так і сполучних проводів і перехідних контактів.

У більшості випадків механізм втрат в конденсаторі складний і його не можна звести тільки до втрат від наскрізної електропровідності або до втрат в контакті. Тому параметри конденсатора необхідно визначати при тій частоті, при якій він буде використаний.

Діелектричні втрати, віднесені до одиниці об'єму діелектрика, називають питомими втратами. Їх можна розрахувати за формулою:

$$p = P_a / V = \omega \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg}\delta E^2, \quad (3.8)$$

де V - об'єм діелектрика між плоскими електродами, м^3 ,

E - напруженість електричного поля, В/м.

Добуток $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \varepsilon''$ називають коефіцієнтом діелектричних втрат. З виразу (3.8) випливає, що при заданих частоті і напруженості електричного поля питомі діелектричні втрати в матеріалі пропорційні коефіцієнту втрат.

В електродинаміці при описі взаємодії електромагнітного поля з речовиною часто використовують величину, звану комплексною діелектричною проникністю:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' . \quad (3.9)$$

Щоб усвідомити це поняття, скористаємося одним з фундаментальних рівнянь електродинаміки (першим рівнянням Максвелла), що встановлює зв'язок між змінами електричного і магнітного полів:

$$\operatorname{rot} H = J + J_{\text{зм}} = \gamma E + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} . \quad (3.10)$$

Наведене рівняння підтверджує той факт, що магнітне поле відмінно від нуля як при переміщенні електричних зарядів (т. е. при наявності струму наскрізної електропровідності через речовину), так і при зміні напруженості електричного поля в часі (т. е. при наявності струму зсуву).

В однорідних ідеальних діелектриках наскрізний струм відсутній, тобто $\gamma = 0$, для випадку гармонійного зміни поля рівняння (3.10) можна записати в комплексній формі: $\operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon \dot{E}$.

Якщо ж маємо справу з недосконалим діелектриком, що має помітні діелектричні втрати, то рівняння повного струму набуває більш складний вигляд:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = (\gamma_f + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon) \dot{E} . \quad (3.11)$$

де γ_f - повна питома активна провідність на даній частоті, що враховує як наскрізну електропровідність, так і активні складові поляризаційних струмів.

Задачу про поширення електромагнітного поля в частково провідному середовищі можна звести до випадку ідеального діелектрика, якщо в рівняння (3.11) ввести комплексну діелектричну проникність:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon} \dot{E} . \quad (3.12)$$

де $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \frac{j\gamma_f}{\omega \varepsilon_0} .$

З зіставлення (3.9) і (3.12) випливає, що дійсна складова комплексної діелектричної проникності $\varepsilon' = \varepsilon$, а уявна $\varepsilon'' = \frac{\gamma_f}{\omega \varepsilon_0} .$

Раніше було показано, що $\operatorname{tg} \delta$ є відношення активної складової провідності до ємнісної складової (рисунк 3.13, а). Тому для плоского конденсатора при даній частоті справедливе співвідношення: $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' .$

З виразів (3.6) і (3.8) ясно, що діелектричні втрати мають важливе значення для матеріалів, використовуваних в установках високої напруги, в високочастотній

апаратурі і особливо в високовольтних, високочастотних пристроях, оскільки значення діелектричних втрат пропорційно квадрату прикладеної до діелектрика напруги і частоти. Матеріали, призначені для застосування в зазначених умовах, повинні відрізнятися малими значеннями кута втрат і діелектричної проникності, так як потужність, що розсіюється в діелектрику, може досягти неприпустимо великих значень. Великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування. Якщо діелектрик використовується в коливальному контурі, то діелектричні втрати перешкоджають досягненню високої добротності (гострої настройки на резонанс), так як з збільшенням еквівалентного опору втрат посилюється загасання коливань в контурі.

Види діелектричних втрат.

Діелектричні втрати по їх фізичну природу і особливостям підрозділяють на чотири основних види:

1. втрати на електропровідність;
2. релаксаційні втрати;
3. іонізаційні втрати;
4. резонансні втрати.

3.2.2 Втрати на електропровідність

Втрати на електропровідність виявляються в діелектриках, що мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Якщо при цьому втрати від інших механізмів несуттєві, то частотні залежності P_a і $\operatorname{tg} \delta$ можуть бути отримані при використанні паралельної еквівалентної схеми заміщення реального діелектрика, вони показані на рисунку 3.14, а. Діелектричні втрати цього виду не залежить від частоти прикладеної напруги; $\operatorname{tg} \delta$ зменшується з частотою за гіперболічним законом.

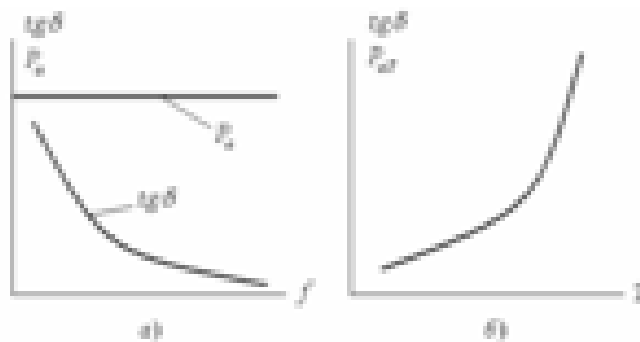


Рисунок 3.14 - Частотні (а) і температурні (б) залежності втрат на електропровідність

Значення тангенса кута діелектричних втрат при даній частоті може бути обчислено за формулою:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon f \rho}, \quad (3.13)$$

якщо відомі питомий опір ρ , виміряний на постійному струмі, і ϵ , виміряна при даній частоті. Втрати наскрізний електропровідності зростають із ростом

температури за експоненціальним законом: $P_{aT} = A \exp(-b/T)$, де A , b - постійні матеріалу. Залежно від температури $\tan \delta$ змінюється за тим же законом, так як реактивна потужність від температури практично не залежить.

3.2.3 Релаксаційні втрати

Релаксаційні втрати обумовлені активними складовими поляризаційних струмів. Вони характерні для діелектриків, що мають уповільнені види поляризації, і проявляються в області достатньо високих частот, коли позначається відставання поляризації від зміни поля. Розглянемо походження релаксаційних втрат на прикладі дипольно-релаксаційної поляризації полярних рідин, де фізична картина більш проста і виразна. За подачі на діелектрик синусоїдальної напруги високої частоти дипольні молекули не встигають орієнтуватися в в'язкому середовищі і слідувати за зміною поля. Відставання поляризації можна охарактеризувати залежностями, показаними на рисунку 3.15, а. За допомогою кривих рисунку 3.15, а легко показати, що залежність $P_{др}(E)$ при наявності фазового зсуву між ними має форму еліпса (рисунок 3.15, б). Вона виражається в появі деякого кута фазового запізнювання ψ між поляризованістю діелектрика і напруженістю поля. Інтеграл по замкнутому контуру 0-б-г-е-0, тобто площа петлі переполізації, характеризує енергію, що витрачається електричним полем на поляризацію одиниці об'єму діелектрика за один період.

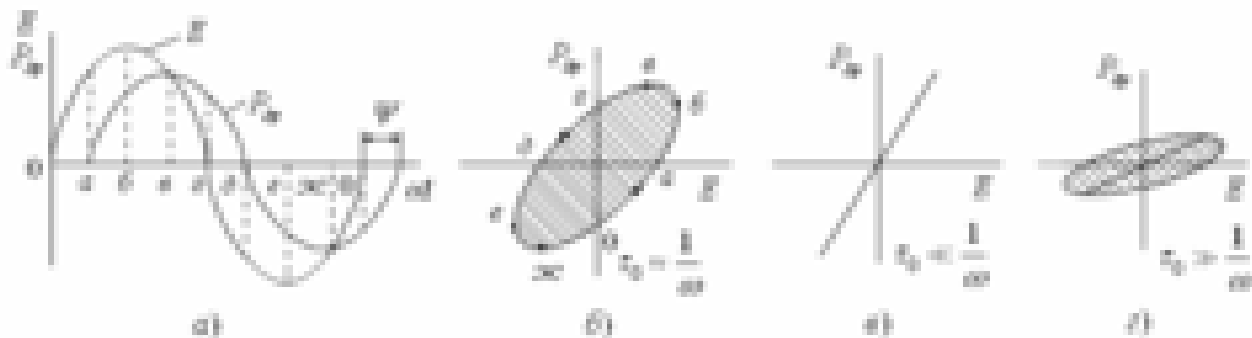


Рисунок 3.15 - Пояснення механізму релаксаційних втрат в діелектриках

При незмінній напруженості поля площа петлі залежить від амплітудного значення поляризованості P і кута фазового зсуву ψ , які в свою чергу визначаються співвідношенням часу релаксації τ_0 та періоду зміни поля. Якщо виконується умова $\tau_0 \ll 1/\omega$, то за час кожного напівперіоду поляризації отримує повний розвиток, її відставання від зміни поля практично відсутнє. При цьому еліпс, що характеризує залежність $P_{др}(E)$, вироджується в пряму лінію (рисунок 3.15, в), тобто якщо немає запізнювання поляризації по відношенню до поля, то немає і релаксаційних втрат.

У протилежному випадку, коли $\tau_0 \gg 1/\omega$, релаксаційна поляризація виражена дуже слабо, середній кут повороту диполів за короткий час напівперіоду виявляється досить незначним. Тому втрати енергії за період будуть також малі (рисунок 3.15, г). Максимуму втрат відповідають такі умови, при яких період зміни поля порівняні з часом встановлення поляризації (рисунок 3.15, б). Розглянутий механізм релаксаційних втрат дозволяє пояснити температурну і частотну

залежності $\operatorname{tg}\delta$, які відрізняються наявністю взаємопов'язаних максимумів (рисунк 3.16, а, б).

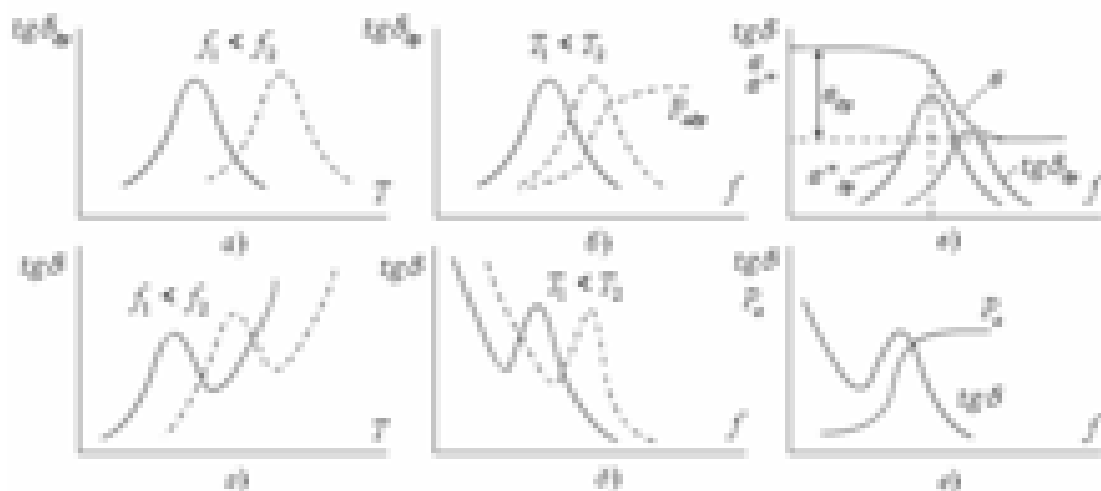


Рисунок 3.16 - Особливості релаксаційних втрат в діелектриках

При низькій температурі через велику в'язкість рідкого діелектрика великий час релаксації поляризації, можливості повороту диполів у в'язкому середовищі вкрай обмежені. Тому амплітудне значення поляризованості P виявляється незначним; відповідно, малий і тангенс кута діелектричних втрат. З підвищенням температури в'язкість рідини зменшується, а час релаксації наближається до часу періоду зміни поля. Дипольно-релаксаційна поляризація отримує більший розвиток, завдяки чому зростає $\operatorname{tg}\delta$. При ще вищих температурах час релаксації стає істотно менше часу періоду зміни напруженості поля. Тому практично зникає запізнювання поляризації відносно поля (тобто зменшується кут відставання по фазі ψ) і зменшуються релаксаційні втрати. З підвищенням частоти максимум $\operatorname{tg}\delta$ зміщується в область більш високої температури. Це пов'язано з тим, що при меншому часі періоду інерційність повороту диполів позначатиметься навіть при малих τ_0 , тобто при більш високих температурах. На рисунку 3.16, б наведено два максимуми частотної залежності $\operatorname{tg}\delta$ при двох температурах; ще раз підкреслюється відмінність в частотних залежностях $\operatorname{tg}\delta$ і активної потужності $P_{\text{адр}}$ (на малюнку крива дана тільки для температури T_2). Зростання втрат з ростом частоти зумовлено дедалі більшим відставанням поляризації від зміни поля (зростає кут ψ). Коли ж частота стає настільки велика, що $\tau \gg 1/\omega$, дб дипольно-релаксаційна поляризація виражена дуже слабо, тобто амплітудне значення поляризованості P виявляється незначним. Тому малі втрати енергії за період E , а відповідно малі значення $\operatorname{tg}\delta$, що характеризує ці втрати. Однак на високих частотах велике число циклів поляризації діелектрика в одиницю часу і активна потужність, що виділяється в діелектрику, залишається практично постійною, незважаючи на зменшення $\operatorname{tg}\delta$ з ростом частоти, що знаходиться у відповідності з формулою (3.6). На рисунку 3.16, в показано взаємне розташування частотних залежностей трьох параметрів діелектрика, ϵ , ϵ'' і $\operatorname{tg}\delta$, що характеризують дипольно-релаксаційну поляризацію. Цей малюнок являє собою вибірку вузького частотного діапазону з широкого спектра частот. Рисунок 3.16, г-е характеризують зміну втрат з урахуванням вкладів релаксаційного механізму і електропровідності діелектрика. Релаксаційні втрати спостерігаються і у

лінійних діелектриків з іонно-релаксаційним та електронно-релаксаційним механізмами поляризації. Втрати, зумовлені міграційною поляризацією, мають місце на матеріалах зі випадковими домішками або окремими компонентами, навмисно введеними в діелектрик для необхідної зміни його властивостей. Випадковими домішками в діелектрику можуть бути, зокрема, напівпровідні речовини, наприклад, відновлені окисли, що утворилися в діелектрику або потрапили в нього в процесі виготовлення. Зважаючи на розмаїття структури неоднорідних діелектриків і особливостей їх компонентів, не існує загальної формули розрахунку діелектричних втрат.

3.2.4 Іонізаційні втрати

Іонізаційні втрати властиві діелектрикам в газоподібному стані. Механізм цього виду втрат наведено далі при розгляді діелектричних втрат в зв'язку з агрегатним станом речовини.

3.2.5 Резонансні втрати

Резонансні втрати спостерігаються в деяких газах при строго певній частоті і виражаються в інтенсивному поглинанні енергії електромагнітного поля. Резонансні втрати можливі і в твердих тілах, якщо частота вимушених коливань, що викликається електричним полем, збігається з частотою власних коливань твердої речовини. Наявність максимуму в частотній залежності $\operatorname{tg}\delta$ характерно і для резонансного механізму втрат, однак при зміні температури максимум не зміщується.

3.2.6. Залежність діелектричних втрат від агрегатного стану речовини

Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різна в залежності від стану речовини: газоподібного, рідкого, твердого.

Діелектричні втрати в газах

Діелектричні втрати в газах при напруженості поля, що лежать нижче значення, необхідного для розвитку ударної іонізації молекул газів, дуже малі. В цьому випадку газ можна розглядати як ідеальний діелектрик. Джерелом діелектричних втрат газу може бути в основному тільки електропровідність, так як орієнтація дипольних молекул газів при їх поляризації не супроводжується діелектричними втратами. Як відомо, всі гази відрізняються дуже малою провідністю, і в зв'язку з цим кут діелектричних втрат у них мізерно малий, особливо при високих частотах. Значення $\operatorname{tg}\delta$ може бути обчислено за формулою (3.13). Питомий об'ємний опір газів порядку 10^{16} Ом·м, $\epsilon \approx 1$ і $\operatorname{tg}\delta$ при $f = 50$ Гц (за відсутності іонізації) менше $4 \cdot 10^{-8}$. При високих напругах і найчастіше в неоднорідному полі, коли напруженість у окремих місцях перевершує деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, внаслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію. Наближено іонізаційні втрати можуть бути обчислені за

формулою: $P_{ai} = A_1 f (U - U_i)^3$, де A_1 - постійний коефіцієнт; f - частота; U - прикладена напруга; U_i - напруга, що відповідає початку іонізації.

Формула справедлива при $U > U_i$ та лінійної залежності $\tan \delta$ від значення E . Напруга іонізації залежить від тиску газу, оскільки розвиток ударної іонізації молекул пов'язаний з довжиною вільного пробігу електронів. Зі збільшенням тиску газу вище атмосферного значення напруги початку іонізації зростає. Іонізаційні втрати є додатковим механізмом діелектричних втрат для твердого діелектрика, що містить газові включення. Іонізація газу в таких включеннях особливо інтенсивно відбувається при радіочастотах. На рисунку 3.17 показано вплив газових включень на характер зміни $\tan \delta$ із збільшенням напруги.

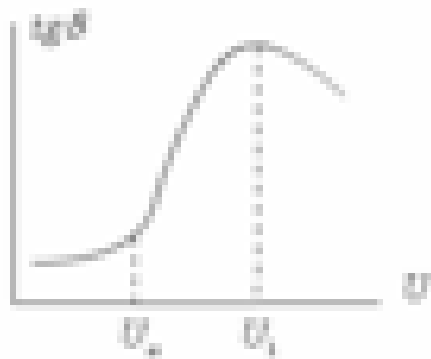


Рисунок 3.17 - Зміна $\tan \delta$ залежно від напруги для твердої ізоляції з газовими включеннями

При зростанні напруги понад U_i , $\tan \delta$ зростає. При $U > U_1$, коли газ у включеннях вже іонізований, потрібна менша енергія на подальший розвиток процесу і $\tan \delta$ зменшується. Криву $\tan \delta = F(U)$ часто називають кривою іонізації. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може привести до розігріву та руйнування виробів з газовою ізоляцією, якщо напруга перевищує іонізаційне значення.

Виникнення іонізації газу, що заповнює пори в твердій ізоляції, нерідко також призводить до її руйнування. Іонізація повітря супроводжується утворенням озону і окислів азоту, які в одних випадках викликають хімічне руйнування органічної ізоляції, що містить газові включення, в інших - ланцюгову реакцію окислення, ініційовану бомбардуванням матеріалу зарядженими частинками.

Діелектричні втрати в рідких діелектриках

Якщо неполярна рідина не містить домішок з дипольними молекулами, то втрати в них обумовлені тільки електропровідністю. Питома провідність нейтральних частин рідин дуже мала, тому малі і діелектричні втрати. Прикладом може служити ретельно очищене від домішок нафтове конденсаторне масло, $\tan \delta$ якого дуже малий і піддається розрахунку за формулою (3.13).

Полярні рідини в залежності від умов (температури, частоти) можуть мати помітні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією, крім втрат на електропровідність. Питома провідність таких рідин при кімнатній температурі становить 10^{-10} - 10^{-11} См/м. Дипольно-релаксаційні втрати, спостережувані в в'язких рідинах при змінній напрузі, особливо при високих частотах, значно перевершують втрати на електропровідність. Дипольно-релаксаційні втрати в малов'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менше втрат на

електропровідність. При радіочастотах дипольно-релаксаційні втрати навіть в малов'язкій рідині великі й перевершують втрати на електропровідність. Зважаючи на це полярні рідини не можуть бути використані при високій частоті.

Діелектричні втрати в твердих діелектриках

Діелектричні втрати в твердих діелектриках залежать від структури матеріалів. Різні тверді речовини мають різний склад і будову; в них можливі всі види діелектричних втрат.

Діелектричні втрати в речовинах з молекулярною структурою.

В залежності від виду молекул діелектрики, що мають молекулярну структуру з неполярними молекулами і не містять домішок, володіють мізерно малими діелектричними втратами. До таких діелектриків відносяться сірка, церезин, неполярні полімери - поліетилен, політетрафторетилен, полістирол і ін. Зазначені речовини у зв'язку з їх малими втратами застосовують як високочастотні діелектрики.

Тверді діелектрики, що складаються з полярних молекул, являють собою головним чином органічні речовини, широко використовувані в техніці: полярні полімери - епоксидні компаунди, кремнійорганічні і феноло-формальдегідні смоли, поліаміди(капрон), поліетилентерефталат (лавсан), гетинакс та ін. Всі вони завдяки властивій їм дипольно-релаксаційній поляризації мають великі втрати, особливо при радіочастотах.

Діелектричні втрати в речовинах з іонною структурою

В залежності від особливостей упаковки іонів в решітці в речовинах з кристалічною структурою і щільною упаковкою іонів в відсутність домішок, які деформують решітку, діелектричні втрати дуже малі. При підвищених температурах в цих речовинах виявляються втрати на електропровідність. До речовин даного типу відносяться численні кристалічні неорганічні сполуки, що мають велике значення в сучасному виробництві електротехнічної кераміки, наприклад, корунд, що входить до складу ультрафарфору. Прикладом сполук такого роду є також кам'яна сіль, чисті кристали якою володіють нікчемними втратами; найменші домішки, які спотворюють решітку, різко збільшують діелектричні втрати.

До діелектриків, які мають кристалічну структуру з нещільної упаковкою іонів, відноситься ряд кристалічних речовин, що характеризуються релаксаційною поляризацією, викликає підвищені діелектричні втрати. Багато хто з них входять до складу керамічних мас, ізоляторного порцеляни, вогнетривкої кераміки і т. д.

Діелектричні втрати в квазіаморфних речовинах з іонною структурою - неорганічних стеклах - відрізняються деякими особливостями. В стеклах за релаксацію відповідальні слабкопов'язані іони, які вчиняють перескоки з одного осередку просторової структурної решітки в іншу.

Потенційні бар'єри, що обмежують рух слабкопов'язаних іонів, неоднакові внаслідок локальної неоднорідності структури скла. Тому релаксаційні втрати в стеклах визначаються широким набором часів релаксації, що призводить до розширення і деякого згладжування максимумів в температурній і частотній залежностях тангенса кута діелектричних втрат (рисунок 3.18).

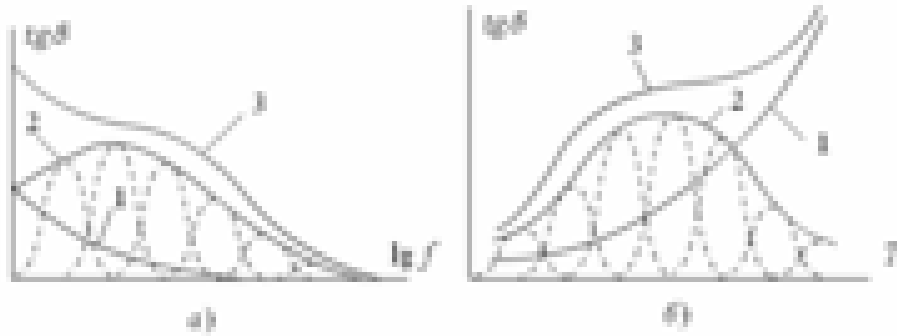


Рисунок 3.18 - Частотна і температурна залежності тангенса кута діелектричних втрат для неорганічного скла: 1 - втрати на електропровідність; 2 - релаксаційні втрати; 3 - сумарні втрати

Чим більший набір часів релаксації, тим менше значення релаксаційного максимуму, так як зменшується число релаксатора кожного типу. Згладжені максимуми релаксаційних втрат можуть значною мірою маскуватися втратами на електропровідність і не проявлятися в явному вигляді. При дуже високих частотах, що наближаються до частот власних коливань іонів, в стеклах можливі також резонансні втрати.

Контрольні питання до підрозділу 3.2

1. Що таке діелектричні втрати? За яких напруг вони більші - при постійній або змінній?
2. Що таке кут діелектричних втрат?
3. Що таке питомі втрати і як вони розраховуються?
4. При яких параметрах діелектричні втрати мають велике значення якими властивостями повинні володіти матеріали, використовувані в даних умовах?
5. Як змінюється тангенс кута діелектричних втрат при зміні температури у рідкого діелектрика при релаксаційних втратах?
6. Як залежить $\tan \delta$ від частоти, коли втрати в діелектрику обумовлені наскрізною електропровідністю?
7. Як залежить тангенс кута діелектричних втрат від напруги в діелектриках з пористою структурою?
8. Які втрати переважають в рідкому діелектрику, в залежності від його в'язкості?
9. Які діелектричні втрати можливі в твердих діелектриках залежно від будови речовини? Наведіть приклади цих матеріалів.

3.3 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.3.1 Основні поняття

Діелектрик, перебуваючи в електричному полі, може втратити ізоляційні властивості, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Явище створення провідного каналу в діелектрику під дією електричного поля називають **пробоем**. Мінімальну прикладену до діелектрика напругу, що приводить до його

пробою, називають **пробивною напругою** $U_{пр}$. Передпробійний стан діелектрика характеризується різким зростанням струму, відступом від закону Ома в бік збільшення провідності. Формально за пробивну приймають таку напругу, при якій $dI/dU = \infty$, тобто диференціальна провідність стає нескінченно великою (рисунок 3.19). Значення пробивної напруги залежить від товщини діелектрика h і форми електричного поля, зумовленої конфігурацією електродів і самого діелектрика. Тому воно характеризує не стільки властивості матеріалу, скільки здатність конкретного зразка протистояти сильному електричному полю.

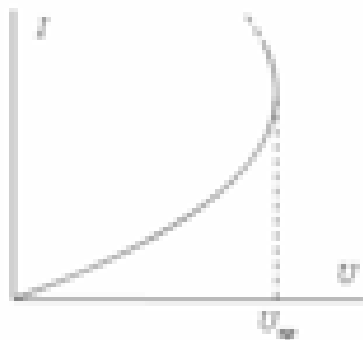


Рисунок 3.19 - Вольт-амперна характеристика електричної ізоляції

Для порівняння властивостей різних матеріалів зручнішою характеристикою є електрична міцність. **Електричною міцністю називають мінімальну напруженість однорідного електричного поля, що приводить до пробію діелектрика:** $E_{пр} = U_{пр} / h$. Якщо пробій стався в газоподібному діелектрику, то завдяки високій рухливості молекул пробита ділянка після зняття напруги відновлює свої електричні властивості. На противагу цьому пробій твердих діелектриків закінчується руйнуванням ізоляції. Однак руйнування матеріалу можна попередити, обмеживши наростання струму при пробіі допустимою межею. Пробій діелектриків може виникати в результаті чисто електричних, теплових, а в деяких випадках і електромеханічних процесів, обумовлених дією електричного поля.

3.3.2 Пробій газів

Повітря є ізоляційною середовищем для різної електронної апаратури. В разі сильних електричних полів фізичні процеси в повітрі відбуваються при нормальному атмосферному тиску. Однак в радіоелектроніці доводиться мати справу з пробоем при значному розрідженні і підвищеному тиску. Пробивна напруженість повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з більшістю рідких і твердих діелектриків. Пробій повітря та інших газів слід розглядати як наслідок розвитку процесів ударної і фотоіонізації.

Механізм пробію газу

Невелика кількість позитивних і негативних іонів і електронів які перебувають у газі, як і нейтральні молекули газу, знаходяться в безладному тепловому русі, під дією поля отримують деяку додаткову швидкість і починають в залежності від знака заряду переміщатися в напрямку поля або проти. При цьому заряджена частка набуває додаткову енергію:

$$W = qU_1, \quad (3.14)$$

де q - заряд; U_1 - різниця потенціалів на довжині вільного пробігу.

Якщо поле досить однорідне, то можна вважати:

$$U = El, \quad (3.15)$$

де E - напруженість поля; l - середня відстань, пройдена зарядженою часткою без зіткнення, тобто довжина вільного пробігу.

Підставляючи (3.14) в (3.15) отримаємо:

$$W = Eql. \quad (3.16)$$

Додаткова енергія заряджених частинок повідомляється атомам або молекулам газу, з якими ці частинки стикаються. Якщо енергія досить велика, відбувається збудження атомів, пов'язане з переходом електрона на більш віддалену від ядра орбіту або іонізація молекул, т. е. їх розщеплення на електрони і позитивні іони.

Умовою, що визначає можливість іонізації, є:

$$W \geq W_i, \quad (3.17)$$

причому W включає в себе і енергію теплового руху, звичайно невелику при нормальній температурі. З виразів (3.16) і (3.17) маємо:

$$Eql \geq W_i. \quad (3.18)$$

Енергію іонізації зазвичай характеризують іонізаційним потенціалом $U_i = W_i / q$. Іонізаційний потенціал різних газів лежить в межах 4-25 В, що відповідає енергії іонізації від 4 до 25 еВ.

При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при певному значенні напруженості поля, оскільки q і l постійні для кожного газу. Цю напруженість поля E називають початковою напруженістю, а відповідну напругу - початковою.

Найбільше число актів іонізації припадає на електрони, так як довжина вільного пробігу їх майже на порядок вище, ніж у іонів, і відповідно до виразу (3.16) вони набирають під впливом поля велику енергію. Крім того електрони порівняно з іонами володіють в 100 - 1000 разів більшою рухливістю. Тому за однаковий проміжок часу вони пройдуть в 100-1000 разів більшу відстань і, відповідно, вироблять більше число актів іонізації. Слід враховувати також, що, якщо позитивний іон, розігнаний полем, випробовує співудар з периферичним електроном нейтральної частинки, то умови для іонізації електрона виявляються несприятливими, так як при великому розходженні маси енергія, що віддається електрону при пружному ударі, мала. При явищах розряду позитивні іони вивільняють електрони з металу, бомбардуючи поверхню катода. У ряді випадків електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а привести її в

«збуджений стан» - викликати зміну в русі електронів, пов'язаних з молекулою. В наступний момент ця «збуджена» молекула віддає свою надлишкову енергію у формі випромінювання - випускає фотон. Деякі з фотонів мають енергію, що перевищує енергію іонізації молекул. Такі фотони народжуються за рахунок ударного збудження електронів, що знаходяться на внутрішніх оболонках атомів. При поглинанні фотона, що володіє великою енергією, інший молекулою можлива її іонізація. Внутрішня фотонна іонізація газу завдяки великій швидкості поширення випромінювання призводить до особливо швидкому розвитку в розрядному проміжку каналів з підвищеною провідністю газу.

На рисунку 3.20 представлена схема, пояснює, чому зростання електропровідного каналу (стримеру) відбувається швидше, ніж просування електронної лавини.

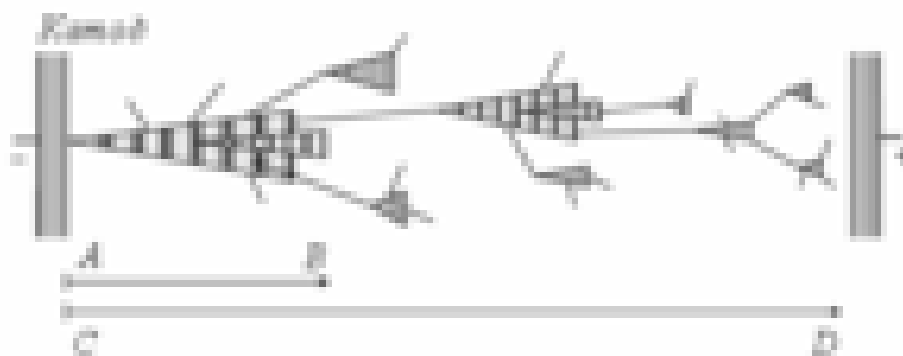


Рисунок 3.20 - Схема розвитку негативного стримеру

На цьому рисунку лавини умовно показані у вигляді заштрихованих конусів, а лініями зображені шляхи фотонів. Усередині кожного конуса газ іонізується ударами електронів. Вибиті електрони, розганяються полем, іонізують частинки газу. Так лавиною наростає число електронів, що рухаються до анода, і число позитивних іонів, що прямують до катода. Початки ліній виходять з атомів, які були порушені ударом електрона і слідом за тим випустили фотон. Рухаючись зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с, фотони обганяють лавину і в якомусь місці, що відповідає кінцю лінії, іонізують частинку газу. Вибитий тут електрон, прямуючи до анода, породжує нову лавину далеко попереду першої лавини. Таким чином, поки перша лавина виростає, припустимо, на відстань, рівну довжині стрілки АВ (рисунок 3.20), канал підвищеної провідності газу, тобто стример, поширюється на відстань, рівну довжині стрілки CD. На наступній стадії окремі лавини в негативний стример, наганяючи один одного, зливаються, утворюючи суцільний канал іонізованого газу. Одночасно з ростом стримера, спрямованого від катода до анода, починається створення зустрічного лавинного потоку позитивно заряджених частинок, спрямованого до катода. Позитивний стример являє собою канал газорозрядної плазми, виникнення і розвиток якого схематично показано на рисунку 3.21. електронні лавини залишають на своєму шляху велике число новостворених позитивних іонів, концентрація яких особливо велика там, де лавини отримали свій найбільший розвиток, тобто близько анода. Якщо концентрація позитивних іонів тут досягає певного значення (близького до 10^{18} іонів в 1 м^3), то, по-перше, виявляється інтенсивна фотоіонізація, по-друге, електрони, що звільняються частинками газу, поглинувши фотони, притягуються позитивними просторовими зарядами в головну

частину позитивного стримеру, і, по-третє, внаслідок фотоіонізації концентрація позитивних іонів на шляху стримеру збільшується.

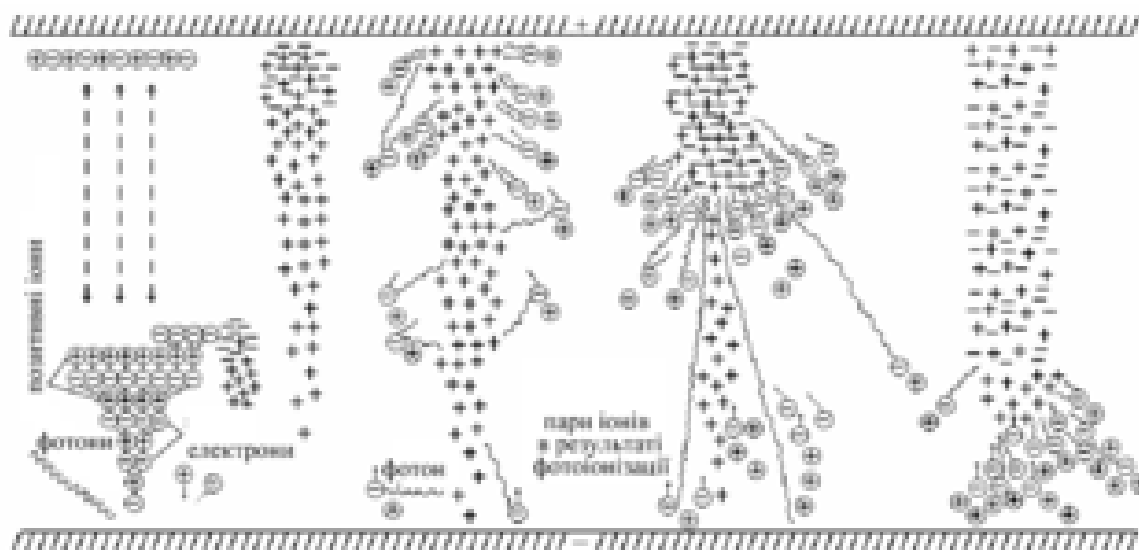


Рисунок 3.21 - Схема виникнення та розвитку позитивного стримеру (розвиток стадій розряду показано зліва направо)

З рисунку 3.21 видно, що багато електронів втягуються в область найбільшої концентрації позитивних іонів - в головну частину позитивного стримеру. Насичення електронами простору, заповненого позитивними зарядами, перетворює цю область у провідну газорозрядну плазму. Під впливом ударів позитивних частинок на катоді виникає катодна пляма, яка випромінює електрони. В результаті вказаних процесів і виникає пробій газу. Чим більша напруга, прикладена до газового проміжку, тим швидше розвивається пробій. Якщо тривалість впливу напруги дуже мала, то пробивна напруга підвищується. Це підвищення звичайно характеризують коефіцієнтом імпульсу: $\beta = U_{пр\,імн} / U_{пр}$, де $U_{пр\,імн}$ - пробивна напруга при даному імпульсі; $U_{пр}$ - пробивна напруга при постійній або змінній (частотою 50 Гц) напрузі. Коефіцієнт імпульсу розрядних проміжків з різко неоднорідним електричним полем може досягати 1,5.

Явище пробію газу залежить від ступені однорідності електричного поля, в якому відбувається пробій.

Пробій газу в однорідному полі

Однорідне поле реалізується між плоскими електродами з закругленими краями, а також між сферами, якщо відстань між ними не більш їх діаметра. В такому полі тривалість підготовки пробію газу (для проміжку 1 см) становить 10^{-7} - 10^{-8} с при досягненні напругою строго певного значення, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами раптово виникає іскра, яка потім переходить в дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. Залежність електричної міцності повітря (амплітудні значення) від відстані між електродами показана на рисунку 3.22.

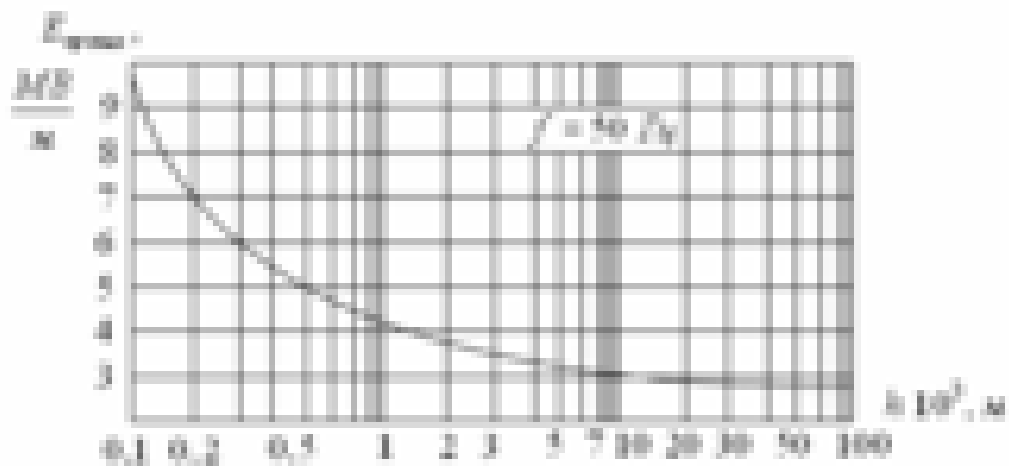


Рисунок 3.22 - Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами в випадку однорідного поля

У нормальних умовах, тобто при тиску 0,1 МПа і температурі 20°C, електрична міцність повітря при відстані між електродами в 1 см становить близько 3,2 МВ/м. При малих відстанях між електродами електрична міцність значно збільшується, що пояснюється трудностю формування розряду. На рис. 3.23 представлена залежність пробивної (початкової) напруги від добутку тиску газу на відстань між електродами при незмінній температурі.

Слід відзначити наявність мінімуму, який відповідає визначенню для даного газу значенню додатка ph . Мінімальні значення пробивних напруг для різних газів складають 280 - 420 В; для повітря - близько 300 В. При незмінній відстані між електродами, рівному одиниці, криві рисунку 3.23 можуть характеризувати залежність електричної міцності повітря і водню від тиску, т. е. від щільності газу, якщо температура постійна.

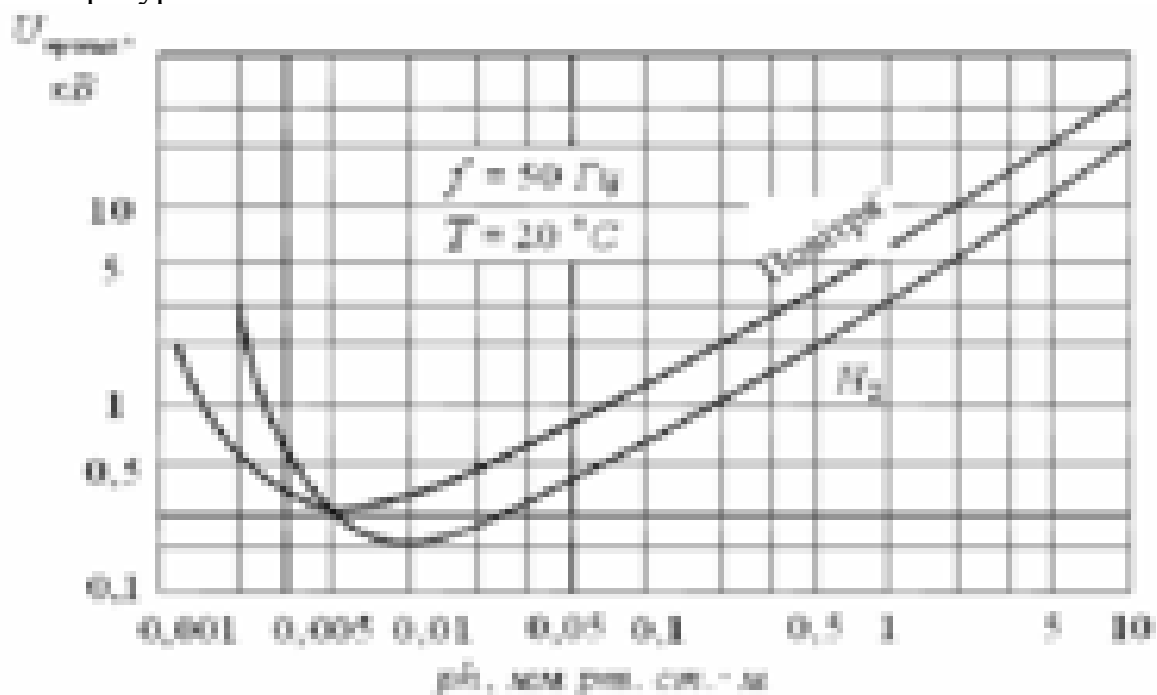


Рисунок 3.23 - Залежність пробивної напруги від добутку тиску газу p на відстань h між електродами для повітря і водню

При збільшенні тиску понад 1 атм і, відповідно, підвищенні щільності газу відстань між окремими молекулами стає менше. В результаті цього зменшується довжина вільного пробігу електронів і, як випливає з формули (3.18), електрична міцність газу зростає; при відстані між електродами, наприклад, в 1 см вона складе більше 3,2 МВ/м.

При зменшенні тиску нижче атмосферного спочатку спостерігається падіння електричної міцності (рисунок 3.23), але коли тиск доходить до деякого значення, електрична міцність починає знову зростати. це пояснюється зменшенням числа молекул газу в одиниці об'єму до такої малої кількості, при якій ймовірність зіткнень електронів з молекулами значно зменшується. при високому вакуумі пробій можна пояснити явищем «виривання» електронів з поверхні електрода (холодна емісія).

В цьому випадку електрична міцність доходить до вельми високих значень (порядку 10^2 МВ/м) і залежить від матеріалу та стану поверхні електродів. Велику електричну міцність вакууму використовують в техніці при конструюванні високочастотних вакуумних конденсаторів, призначених для підвищених напруг. Пробивна напруга газу в однорідному полі змінюється в залежності від частоти, особливо при радіочастотах. На рисунку 3.24 показана залежність пробивної напруги повітря від частоти.

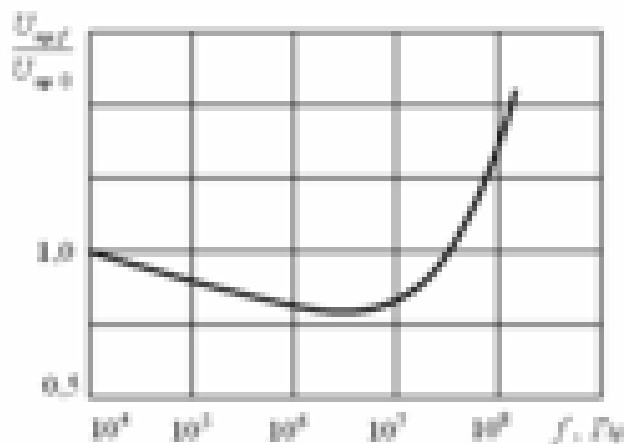


Рисунок 3.24 - Відношення пробивної напруги повітря при заданій частоті до пробивній напрузі при постійному струмі в залежності від частоти

При невеликих частотах амплітудне значення пробивної напруги збігається зі значенням пробивної напруги при постійному струмі; при більш високих частотах пробивна напруга трохи зменшується і доходить до мінімуму при частоті близько $5 \cdot 10^6$ Гц, після чого знову зростає і досягає значень, переважаючих пробивну напругу при постійному струмі більш ніж на 1,5 рази.

Зменшення пробивної напруги з ростом частоти пояснюється викривленням поля, обумовленим утворенням об'ємних зарядів в газі внаслідок різної рухливості позитивних іонів і електронів. Процеси, що протікають при цьому відображає діаграма на рисунку 3.25.

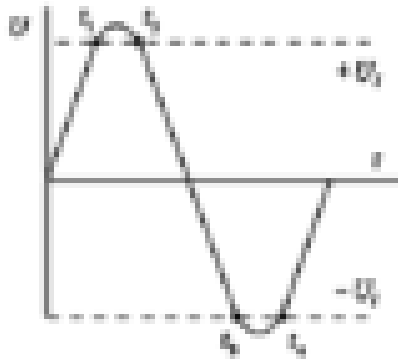


Рисунок 3.25 - Діаграма, яка пояснює особливості іонізації газу в змінному полі

Іонізація газу і проростання електронних лавин відбувається лише в ті проміжки часу, коли миттєве значення напруги перевершує поріг іонізації U_i (інтервали $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ і т. п. на рисунку 3.25). При зниженні напруги до рівня нижче порогу, іонізація припиняється і починається розсмоктування утворився об'ємного заряду в міжелектродному просторі. Швидкість розсмоктування визначається швидкістю дрейфу іонів в напрямку до катода. На високих частотах час напівперіоду настільки малий, що іони не встигають нейтралізуватися на катоді. накопичення об'ємного позитивного заряду збільшує напруженість електричного поля, що полегшує подальшу іонізацію і знижує напругу пробою. В області ще вищих частот тривалість напівперіоду зміни поля стає сумірною з часом формування електронних лавин. Тому для повного розвитку і завершення процесу ударної іонізації необхідно підвищити напругу на електродах.

Електрична міцність значною мірою залежить від хімічного складу газу. Зниженою в порівнянні з повітрям електричної міцністю володіють інертні гази, використовувані для заповнення електровакуумних приладів і джерел світла. підвищеної електричної міцності характеризуються деякі важкі гази з високою молекулярною масою. До їх числа належать, зокрема, елегаз (SF_6) і фреон (CCl_2F_2), у яких пробивна напруженість приблизно в 2,5 рази вище, ніж у повітря.

Пробій газу в неоднорідному полі

Пробій газу в неоднорідному і однорідному полях помітно різниться. Однорідне поле виникає між двома вістрями, вістрям і площиною, проводами, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери і т. д.

Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги. У разі несиметричних електродів голка - площа і позитивної полярності на голці пробій відбувається при меншій напрузі, ніж при зворотній полярності (рисунок 3.26, а)

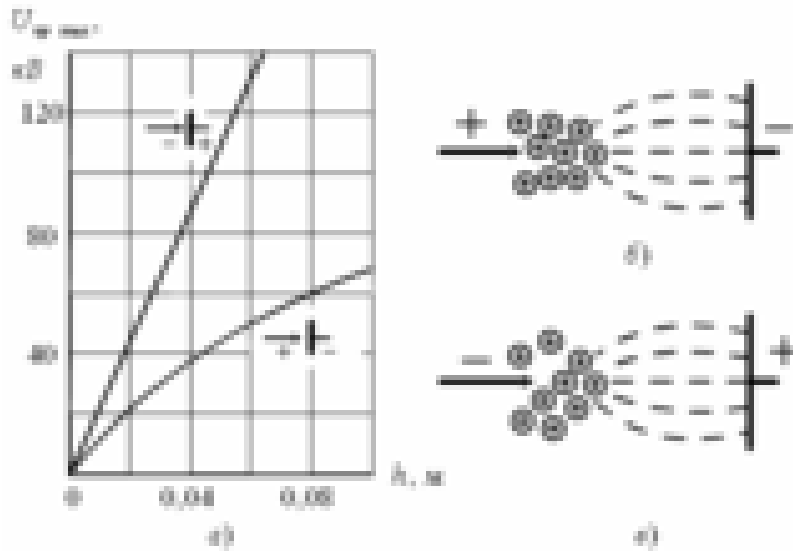


Рисунок 3.26 - Залежності пробивної напруги повітря від відстані між електродами в неоднорідному полі (а) і модель об'ємного заряду в розрядному проміжку при позитивній (б) і негативній (в) полярності на голці

Це пояснюється наступним чином. Іонізація газу при будь-якій полярності на електродах відбувається в районі гілки, де існують найбільші напруженості електричного поля. В результаті іонізації виникають електрони і іони, причому електрони швидко нейтралізуються на аноді, а поблизу гілки залишаються малорухомі позитивно заряджені іони. «Хмара» об'ємного заряду змінює первинний розподіл потенціалу. При позитивній полярності на голці (рисунок 3.26, б) об'ємний заряд послаблює напруженість поля поблизу голки і, навпаки, підсилює її в неіонізованій області. Створюються сприятливі умови для подальшої іонізації газу, тобто подальшого проростання об'ємного заряду в напрямку до катода. У розглянутому випадку об'ємний заряд фактично є продовженням голки і скорочує ефективну довжину розрядного проміжку. При негативній полярності на голці (рисунок 3.26, в) хмара позитивного заряду зменшує напруженість поля в неіонізованій області. Тому подальша іонізація газу можлива лише при більш високій напрузі на електродах. Таким чином, в даному випадку об'ємний позитивний заряд грає роль екрану, що згладжує максимальні неоднорідності поля в розрядному проміжку.

3.3.3 Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються більш високими значеннями електричної міцності, ніж гази в нормальних умовах. Гранично чисті рідини отримати дуже важко. Постійними домішками в рідині є вода, гази і найдрібніші механічні частинки. Наявність домішок значно посилює явище пробою рідких діелектриків і утрудняє з'ясування механізмів пробою. В максимально очищених від домішок рідинах при високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися викидання електронів з металевих електродів і руйнування молекул самої рідини за рахунок зіткнень з зарядженими частинками, як і у випадку пробою газів. При цьому підвищена електрична міцність рідкого діелектрика порівняно з газоподібним обумовлена значно зменшеною довжиною вільного пробігу електронів. Пробій

технічно чистих рідин пояснюють частковим перегрівом рідини і скипанням її в місцях найбільшої кількості домішок, яке призводить до утворення газового містка між електродами. Досвід свідчить про великий вплив домішок на електричну міцність рідкого діелектрика. Вплив домішок в меншій мірі позначається при пробіі рідких діелектриків імпульсами. Пробіі рідини при радіочастотах зумовлений її розігрівом за рахунок діелектричних втрат, що може призводити до термічного руйнування рідини. Тому гранично допустимі робочі напруженості поля для рідких діелектриків на радіочастотах виявляються нижче, ніж на промисловій частоті.

3.3.4 Пробіі твердих діелектриків

У твердих діелектриків можуть спостерігатися три основних механізми пробою:

1. електричний;
2. тепловий;
3. електрохімічний.

Кожен із зазначених механізмів пробою може мати місце в одному і тому ж матеріалі в залежності від характеру електричного поля, в якому він знаходиться - постійного або змінного, імпульсного, низької або високої частоти; часу впливу напруги; наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пор; товщини матеріалу; умов охолодження і т. д.

Електричний пробіі

Електричний пробіі твердих діелектриків характеризується досить швидким розвитком. Він протікає за час не більше 10^{-7} - 10^{-8} с, не зумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробіі незначно залежить від температури, і супроводжується в своїй початковій стадії руйнуванням діелектрика в дуже вузькому каналі. Електричний пробіі за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з малої кількості початкових електронів в твердому тілі створюється електронна лавина. Розвиток лавин супроводжується фотоіонізацією (як в газах), яка прискорює утворення провідного каналу. Прискорені полем електрони при зіткненнях передають свою енергію вузлам решітки і розігрівають її аж до плавлення. В розрядному каналі створюється значний тиск, який може привести до появи тріщин або повного руйнування ізолятора. Чисто електричний пробіі має місце, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, що обумовлюють нагрівання матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. У разі однорідного поля і повної однорідності матеріалу пробивні напруженості при електричному пробіі можуть служити мірою електричної міцності речовини. Такі умови вдається спостерігати у монокристалів багатьох окислів, лужно - галоїдних сполук і деяких органічних полімерів. При цьому $E_{пр}$ досягає більш 1000 МВ/м. Електричний пробіі спостерігається у більшості діелектриків при короткочасному (імпульсному) впливі напруги. Тонкі плівки можуть володіти істотно більш високою електричною міцністю, ніж масивні зразки. Це властивість отримало назву електричного зміцнення матеріалів. Його використання дозволяє підвищити надійність плівковою ізоляції мікроелектронних елементів і пристроїв, оскільки експлуатаційні значення

напруженості поля в тонких плівках (10^8 В/м)близькі до пробивних для об'ємних зразків.

Тепловий пробій

Тепловий пробій виникає в тому випадку, коли кількість теплової енергії, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, перевищує ту кількість енергії, яке може розсіюватися в даних умовах; при цьому порушується теплова рівновага, а процес набуває лавиноподібний характер. Явище теплового пробою зводиться до розігріву матеріалу в електричному полі до температур, відповідних розплавленню, обугленню і пр. Електрична міцність при тепловому пробіє є характеристикою не тільки матеріалу, але і виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробіє служить характеристикою самого матеріалу. Пробивна напруга, обумовлена нагріванням діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою навколишнього середовища та ін. Крім того, «Електротеплова пробивна напруга» залежить від нагрівостійкості матеріалу; органічні діелектрики (наприклад, полістирол) мають більш низькі значення електротеплових пробивних напруг, ніж неорганічні (кварц, кераміка), за інших рівних умов внаслідок їх малої нагрівостійкості. Типовими ознаками теплового пробою є експоненціальне зменшення пробивної напруги з ростом температури навколишнього середовища, а також зниження електричної міцності зі збільшенням часу витримки діелектрика в електричному полі (при відносно малих значеннях температури). Розглянемо методику спрощеного розрахунку пробивної напруги при тепловому пробіє.

Нехай пластинка однорідного діелектрика, що володіє втратами, знаходиться між двома електродами, як показано на рисунку 3.27, а.

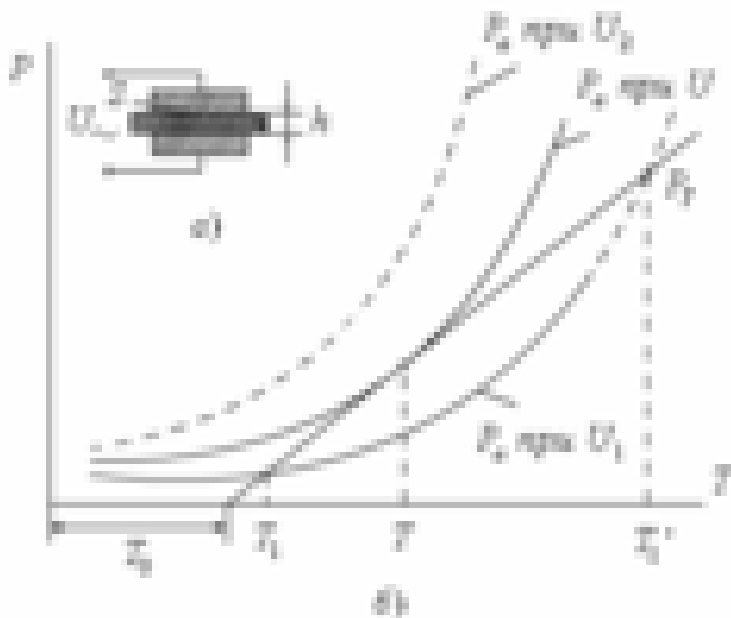


Рисунок 3.27 - Пояснення до розрахунку пробивної напруги при тепловому пробіє

До електродів від досить потужного джерела змінного струму прикладається напруга, яке можна збільшувати до пробою зразка. Значення потужності, що розсіюється в діелектрику визначається виразом (3.6). Механізм теплового пробою найбільш вірогідний при підвищених температурах, коли можна очікувати, що

переважаючими будуть втрати наскрізний електропровідності. Тому при використанні експонентної залежності $\operatorname{tg}\delta$ від температури після перетворення виразу (3.6) для розсіювання потужності отримаємо:

$$P_a = \frac{U^2 f \varepsilon S \operatorname{tg} \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,8 \cdot 10^{10} h}, \quad (3.19)$$

де U - прикладена напруга;

f - частота;

ε - відносна діелектрична проникність (вважаємо її не залежною від температури);

$\operatorname{tg}\delta_0$ - тангенс кута втрат діелектрика при температурі навколишнього середовища;

α - температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат;

T - температура нагрітого за рахунок діелектричних втрат матеріалу;

T_0 - температура навколишнього середовища;

S - площа електрода;

h - товщина діелектрика.

Температура T по всьому об'єму матеріалу, що знаходиться в полі між електродами(крайовим ефектом нехтуємо), однакова, якщо товщина діелектрика не дуже велика і теплопровідність його не дуже погана (досить справедливе припущення). Так як теплопровідність металу електродів за рідкісним винятком на два-три порядки більше, ніж теплопровідність діелектрика, будемо вважати, що тепловідвід з нагрівається обсягу виробляється в навколишнє середовище через електроди (тепловідводом через торцеву поверхню діелектрика нехтуємо). Потужність, що відводиться від діелектрика, висловимо за допомогою формули Ньютона:

$$P_T = 2\sigma S(T - T_0), \quad (3.20)$$

де σ - сумарний коефіцієнт теплопередачі від діелектрика в зовнішнє середовище.

Для наочності подальших міркувань скористаємося графічною побудовою, показаною на рисунку 3.27, б, де в обраній системі координат зображені експоненти тепловиділення $P_a = F(T)$ при різних значеннях прикладеної напруги і пряма теплопередачі $P_T = \varphi(T)$.

При значенні прикладеної напруги U_1 пряма теплопередачі є січною кривої тепловиділення, а отже, діелектрик нагріється до температури T_1 , при якій настане стан стійкої теплової рівноваги, так як потужність тепловиділення дорівнює потужності, що відводиться від зразка. Якби з якихось причин температура хоча б трохи перевищила значення T_1 , то ординати потужності, що відводиться були б більше ординат тепловиділення і зразок мимовільно мав би повернутися в стійкий стан при температурі T_1 . (Вважаємо, що ніяких зовнішніх джерел радіації, здатних підвищити температуру зразка вище T_1' , немає). Напруга U_1 буде не небезпечною для зразка діелектрика в даних умовах, якщо нагрів до температури T_1 не призведе до механічного або хімічного руйнування структури матеріалу. Тому почнемо збільшувати напругу і доведемо його до такого значення U , при якому пряма теплопередача виявиться дотичною до кривої тепловиділення, і, отже, буде тільки

нестійка теплова рівновага при температурі T . При значенні прикладеної напруги U_2 , більшої U , ніякої теплової рівноваги не буде, температура стане наростати безмежно до руйнування діелектрика. Таким чином, напруга U , при якій має місце нестійкий граничний режим, може бути прийнято за напругу теплового пробою $U_{пр}$. Її можна визначити за двома умовами:

$$P_a = P_T, \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial T} = \frac{\partial P_T}{\partial T}. \quad (3.22)$$

Умова (3.22) справедлива тільки для граничного режиму, тоді як умова (3.21) виконується для всіх випадків стійкої роботи діелектрика під напругою. Використовуючи (3.19) – (3.20), маємо:

$$\frac{U^2 f \varepsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2 \sigma S (T - T_0), \quad (3.23)$$

$$\frac{\alpha U^2 f \varepsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2 \sigma S. \quad (3.24)$$

Розділивши вираз (3.23) на (3.24), отримаємо:

$$1/\alpha = T - T_0. \quad (3.25)$$

Підставляючи (3.25) в (3.24) і вирішуючи його відносно U , маємо:

$$U_{пр} = K \sqrt{\frac{\sigma h}{f \varepsilon \alpha t g \delta_0}}, \quad (3.26)$$

де K - числовий коефіцієнт, що дорівнює $1,15 \cdot 10^5$, якщо всі величини, що мають розмірності, виражені в одиницях СІ.

Отриманий вираз показує, що напруга теплового пробою буде вище, якщо умови тепловідводу кращі (σ більше), а діелектрик товщі; вона буде менше при високих частотах, великих значеннях коефіцієнта діелектричних втрат $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ і температурного коефіцієнта тангенса кута втрат α . Якщо перегрів діелектрика обумовлений тільки втратами на електропровідність, то вираз (3.26) за допомогою (3.25) можна привести до вигляду:

$$U_{пр} = K_1 \sqrt{\frac{\sigma h}{\alpha \gamma_0}},$$

де $K_1 = 0,86$; $\alpha = \alpha_\gamma$ - температурний коефіцієнт питомої провідності.

У реальних умовах явище теплового пробою протікає складніше, ніж було розглянуто. За товщиною діелектрика мається перепад температури, середній шар виявляється нагрітим вище, ніж прилеглі до електродів, опір його різко падає, що веде до спотворення електричного поля і підвищенню градієнтів напруги в

поверхневих шарах. Має значення також і теплопровідність матеріалу електродів. всі це сприяє пробою зразків при більш низьких напругах, ніж одержані з наближеного розрахунку.

Різновидом теплового пробою можна вважати іонізаційний пробій. Він характерний для твердих пористих діелектриків і обумовлений іонізацією газу в порах. За рахунок іонізаційних втрат розігрівається поверхня закритих пір, виникають локальні перепади температури в діелектрику та пов'язані з ними термомеханічні напруги. Такі процеси особливо небезпечні в тендітних матеріалах, оскільки термомеханічні напруги можуть перевершити межа міцності матеріалу і викликати розтріскування діелектрика.

Електрохімічний пробій

Електрохімічний пробій електротехнічних матеріалів має суттєве значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробою спостерігається при постійній і змінній напрузі низької частоти, коли в матеріалі розвиваються процеси, що зумовлюють необоротне зменшення опору ізоляції (електрохімічне старіння). Крім того, електрохімічний пробій може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, супроводжується тепловим ефектом і відновленням, наприклад в кераміці, окислів металів змінної валентності. Для розвитку електрохімічного пробою потрібен тривалий час, оскільки він пов'язаний з явищем електропровідності. В кераміці, яка містить оксиди металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж в кераміці, що складається з оксидів алюмінію, кремнію, магнію, барію. електрохімічний пробій спостерігається і у багатьох органічних матеріалів; він багато в чому залежить від матеріалу електродів.

Поверхневий пробій

При випробуванні та експлуатації твердих діелектриків з високою електричною міцністю може спостерігатися явище поверхневого пробою, під яким розуміють пробій газу або рідини поблизу поверхні твердого діелектрика.

По суті в разі поверхневого пробою електрична міцність твердого діелектрика не порушується, однак створюється провідний канал на поверхні, що істотно обмежує робочі напруги ізолятора. Значення поверхневої пробивної напруги багато в чому визначається конфігурацією електродів, габаритними розмірами і формою твердого діелектрика.

Якщо ізолятор експлуатується на повітрі, то напруга поверхневого пробою залежить від тиску, температури, відносної вологості повітря, частоти електричного поля. В деяких конструкціях напруга поверхневого пробою може бути навіть нижче напруги пробою газу в тих же умовах. Однією з причин подібного ефекту є спотворення однорідності електричного поля, яке викликається перерозподілом зарядів в вологі, що адсорбована плівкою. В результаті зсуву іонів по поверхні твердого діелектрика сильно зростає напруженість поля електродів. Чим різкіше виражені гідрофільні властивості діелектрика, тим сильніше падає поверхнева пробивна напруга в умовах підвищеної вологості.

Проте вплив вологості повітря на цю пробивну напругу слабо позначається в радіочастотному діапазоні, коли поверхня діелектрика підсушується завдяки підвищеним діелектричним втратам в адсорбованій плівці. Для запобігання

поверхневого пробою необхідно по можливості збільшувати довжину розрядного шляху уздовж поверхні твердого діелектрика. Цьому сприяє створення ребристою поверхні ізоляторів, проточка різного роду канавок, виготовлення конструкцій з «утопленими» електродами (рисунок 3.28).



Рисунок 3.28 - Конструкція для збільшення напруги поверхневого пробою

Підвищення робочих напруг досягається також згладжуванням неоднорідності електричного поля за рахунок зміни форми електродів або оптимізації конструкції ізолятора. Аналогічний ефект може бути отриманий при нанесенні на поверхню ізолятора напівпровідних покриттів або діелектричних плівок з підвищеної діелектричної проникності. Ефективним заходом боротьби з поверхневим пробоєм є заміна повітря рідким діелектриком, наприклад, трансформаторним маслом. Як відомо, багато рідини володіють більш високою електричною міцністю. Крім того, підвищена в порівнянні з повітрям діелектрична проникність рідин сприяє зниженню напруженості поля на поверхні твердого діелектрика. Тому зануренням ізолятора в рідкий діелектрик можна домогтися підвищення граничних робочих напруг.

Контрольні питання до підрозділу 3.3

1. Що таке пробій діелектриків?
2. Який механізм утворення і розвитку позитивного стрімеру?
3. Як електрична міцність газу в однорідному полі залежить від тиску?
4. Як змінюється пробивна напруга газу в однорідному полі залежно від частоти?
5. Чому при несиметричних електродах голка – площа і позитивної полярності на голці пробій відбувається при меншій напрузі?
6. Чим викликаний пробій в рідких діелектриках і в якій формі він проявляється?
7. Як відбувається електричний пробій?
8. Коли виникає тепловий пробій і які його основні характеристики?
9. Як можна запобігти поверхневому пробою?

3.4 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.4.1 Основні поняття

Поляризаційні процеси зсуву будь-яких зарядів в речовині, протікаючи в часі до моменту отримання рівноважного стану, зумовлюють появу поляризаційних струмів, або струмів зміщення в діелектриках. Струми зміщення пружно пов'язаних зарядів при електронній та іонній поляризації настільки короткотривалі, що їх зазвичай не вдається зафіксувати приладом. Струми зміщення при сповільненій поляризації, які спостерігаються у багатьох технічних діелектриках, називають

абсорбційними струмами (або струмами абсорбції) $I_{аб}$. При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрям, проходять тільки в періоди включення і виключення напруги. При змінній напрузі вони мають місце протягом усього часу перебування матеріалу в електричному полі. Наявність в технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів, а також інжекція їх з електродів призводять до виникнення невеликих струмів наскрізної електропровідності (або наскрізних струмів). Таким чином, повна щільність струму в діелектрику, званого струмом витоку, являє собою суму густин струмів абсорбційного і наскрізного: $J_{вит} = J_{аб} + J_{нск}$. Щільність струму зміщення визначається швидкістю зміни вектора електричного зміщення (індукції) D : $J_{зм} = \frac{dD}{dt} \approx J_{аб}$, що включає до себе миттєві (електронне, іонне) і уповільнені зміщення зарядів. На рисунку 3.29 показана залежність від часу щільності струму і ємності конденсатора.

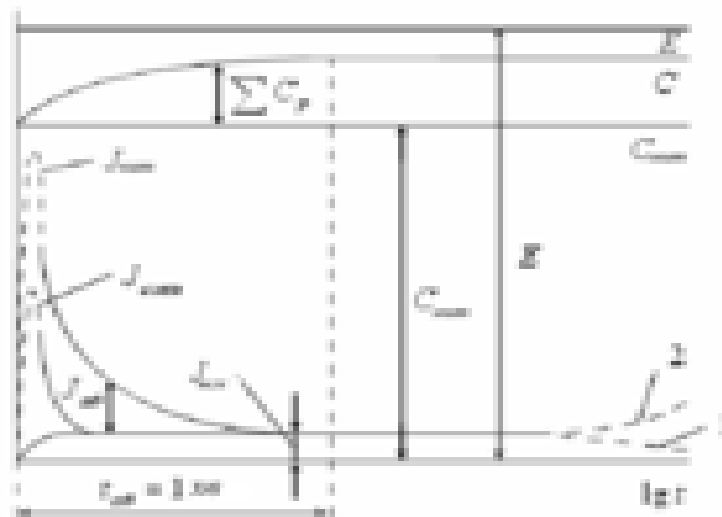


Рисунок 3.29 - Залежності ємності і щільності струму від часу в конденсаторі з діелектриком, що володіє різними механізмами поляризації і наскрізний електропровідністю (електричне поле прикладається миттєво і надалі з часом не змінюється): ΣC_p - ємність, обумовлена уповільненими (релаксацийними) механізмами поляризації; $C_{мит}$ - ємність від миттєвих механізмів поляризації

З рисунка видно, що після завершення процесів поляризації через діелектрик проходить тільки наскрізний струм.

Провідність діелектрика при постійній напрузі визначається наскрізним струмом, який супроводжується виділенням і нейтралізацією зарядів на електродах. При змінній напрузі активна провідність визначається не тільки наскрізним струмом, а й активними складовими поляризаційних струмів. У більшості випадків електропровідність діелектриків іонна, рідше - електронна.

Опір діелектрика, укладеного між двома електродами, при постійній напрузі, тобто опір ізоляції $R_{із}$, можна обчислити за формулою: $R_{із} = \frac{U}{(I_{вит} - \Sigma I_{нов})}$, де U - прикладена напруга; $I_{вит}$ - спостережуваний струм витоку; $\Sigma I_{нов} = I_{аб}$ - сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації, струм абсорбції.

У твердих ізоляційних матеріалів розрізняють об'ємну і поверхневу електропровідності. Для порівняльної оцінки об'ємної та поверхневої електропровідності різних матеріалів використовують також питомий об'ємний ρ і питомий поверхневий ρ_s опори. Питомий об'ємний опір ρ чисельно дорівнює опору куба з ребром в 1 м, подумки виділеного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба; ρ виражають у Ом·м; 1 Ом·м = 100 Ом·см.

У разі плоского зразка матеріалу при однорідному полі питомий об'ємний опір розраховують за формулою: $\rho = RS/h$, де R - об'ємний опір, Ом; S - площа електрода, м²; h - товщина зразка, м.

Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), подумки виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні сторони цього квадрата (ρ_s виражають в омах): $\rho_s = R_s d/l$, де R_s - поверхневий опір зразка матеріалу між паралельно поставленими електродами шириною d , що відстають один від одного на відстані l (рисунок 3.30).

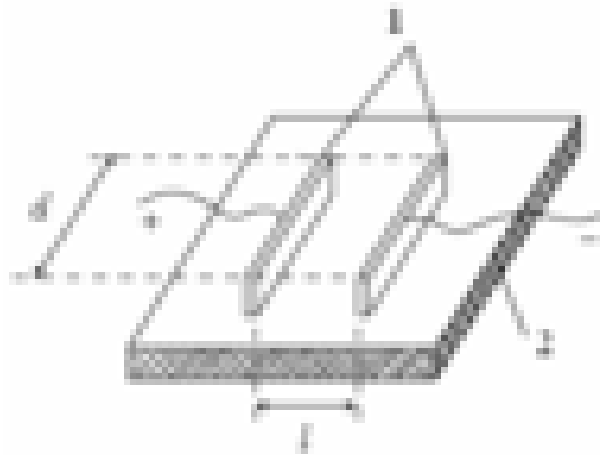


Рисунок 3.30 - Ескіз розміщення електродів (1) на поверхні зразка з електроізоляційного матеріалу (2) при вимірюванні ρ_s

За питомим об'ємним опором можна визначити питому об'ємну провідність $\gamma = 1/\rho$ і відповідно питому поверхневу провідність $\gamma_s = 1/\rho_s$.

Повна провідність твердого діелектрика, відповідна його опору R_{i3} , складається з об'ємної та поверхневої провідностей.

Додаток опору ізоляції діелектрика конденсатора на його ємність називають постійною часу конденсатора: $\tau_0 = R_{i3}C$. Легко показати, що в системі Сі постійна часу: $\tau_0 = R_{i3}C = 0,884 \cdot 10^{-11} \rho \epsilon$.

Електропровідність діелектриків залежить від їх агрегатного стану, а також від вологості і температури навколишнього середовища. При тривалій роботі під напругою наскрізний струм через тверді або рідкі діелектрики з плином часу може зменшуватися або збільшуватися, як показано на рисунку 3.29.

Зменшення наскрізного струму з часом говорить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричної очистки зразка (крива 1).

Збільшення струму з часом (крива 2) свідчить про участь в ньому зарядів, які є структурними елементами самого матеріалу, і про що протікає в діелектрику

незворотному процесі старіння під напругою, здатному поступово привести до руйнування - пробою діелектрика.

3.4.2. Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля володіють дуже малою провідністю. Струм в газах може виникнути тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень іонізованих частинок самого газу, прискорених електричним полем, з молекулами газу (ударна іонізація). Зовнішніми чинниками, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські, ультрафіолетові та космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильний нагрів газу).

Одночасно з процесом іонізації, при якому відбувається утворення позитивних і негативних іонів або електронів, частина позитивних іонів, з'єднуючись з негативними частками, утворює нейтральні молекули. Цей процес називають рекомбінацією. Наявність рекомбінації перешкоджає безмежного росту числа іонів в газі і пояснює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора. Припустимо, що іонізований газ знаходиться між двома плоскими паралельними електродами, до яких докладено електричну напругу. Іони під впливом напруги переміщуються, і в колі виникає струм. Частина іонів нейтралізується на електродах, частина зникає за рахунок рекомбінації. На рисунку 3.31 показана залежність струму від напруги для газу.

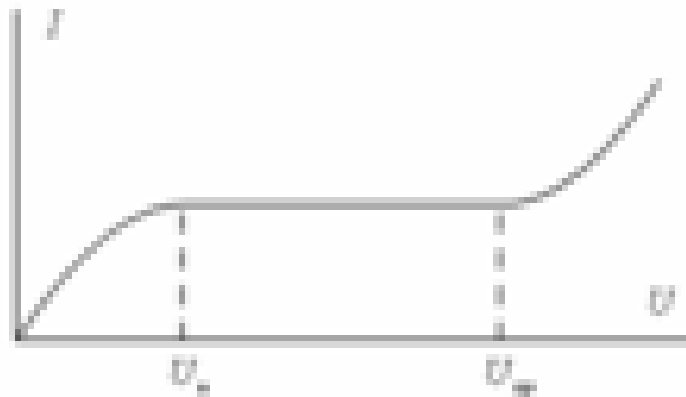


Рисунок 3.31 - Залежність струму від напруги для газу

Початкова ділянка кривої до напруги U_n відповідає виконанню закону Ома, коли число позитивних і негативних іонів n можна вважати не залежним від напруги. В газовому проміжку струм пропорційний напрузі, щільність струму пропорційна напруженості поля. По мірі зростання прикладеної напруги іони несуться до електродів, що не встигаючи рекомбінувати, і при певній напрузі всі іони, створювані в газовому проміжку, розряджаються на електродах.

Подальше збільшення напруги вже не викличе зростання струму, що відповідає горизонтальній ділянці кривої рисунку 3.31 (струм насичення при напругах від U_n до $U_{кр}$). Струм насичення для повітря в нормальних умовах і відстані між електродами 1 см спостерігаються при напруженості поля близько 0,6 В/м. Щільність струму насичення в повітрі вельми мала і становить близько 10^{-15}

А/м^2 . Тому повітря можна розглядати як досконалий діелектрик, до тих пір, поки не створяться умови для появи ударної іонізації. Струм при збільшенні напруги залишається постійним, поки іонізація здійснюється під дією зовнішніх факторів. При виникненні ударної іонізації (вище $U_{\text{кр}}$ на рисунку 3.31) струм починає швидко збільшуватися із зростанням напруги.

3.4.3 Електропровідність рідких діелектриків

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з будовою молекул рідини. В неполярних рідинах електропровідність визначається наявністю дисоційованих домішок, у тому числі вологи. В полярних рідинах електропровідність залежить не тільки від домішок; іноді вона викликається дисоціацією молекул самої рідини. Струм в рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням щодо великих заряджених колоїдних частинок. Неможливість повного видалення здатних до дисоціації домішок з рідкого діелектрика ускладнює отримання електроізоляційних рідин з малою питомою провідністю. Полярні рідини в порівнянні з неполярними завжди мають підвищену питому провідність, причому зростання діелектричної проникності призводить до зростання провідності. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою питомою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонної електропровідністю. Очищення рідких діелектриків від містяться в них домішок дає помітне підвищення їх питомого об'ємного опору. Питома провідність будь-якої рідини в значній мірі залежить від температури. Із збільшенням температури в результаті зменшення в'язкості зростає рухливість іонів і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Ці чинники впливають на збільшення питомої провідності: $\gamma = A \exp(-a/T)$, де A і a - постійні, що характеризують матеріал.

3.4.4 Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих тіл обумовлена як пересуванням іонів самого діелектрика, так і іонів випадкових домішок, а у деяких матеріалів може бути викликана наявністю вільних електронів. Вид електропровідності встановлюють експериментально, використовуючи закон Фарадея. Іонна електропровідність супроводжується перенесенням речовини на електроди. при електронній електропровідності це явище не спостерігається. В процесі проходження електричного струму через твердий діелектрик іони домішок можуть частково віддалятися, виділяючись на електродах; останнім з плином часу призводить до зменшення провідності і струму (рисунки 3.29). В твердих діелектриках іонної будови електропровідність обумовлена головним чином переміщенням іонів, що вириваються з решітки під впливом флуктуації теплового руху. При низьких температурах пересуваються слабо закріплені іони, зокрема іони домішок. При високих температурах рухаються основні іони кристалічної решітки. В діелектриках з атомною або молекулярною ґратками електропровідність залежить від наявності домішок. Питома провідність (в $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$) при температурі T :

$$\gamma = qN_T\mu_T, \quad (3.27)$$

де q - заряд носія, Кл;

N_T - число носіїв в одиниці об'єму (концентрація), м^3 ;

μ_T - рухливість, $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

При відносно невисокій напруженості електричного поля концентрація носіїв заряду і рухливість μ не залежить від E , тобто швидкість їх переміщення v пропорційна напруженості поля: $v = \mu E$ - дотримується закон Ома. Рухливість електронів на багато порядків більше, ніж рухливість іонів. В двоокису титану, наприклад, рухливість електронів становить близько $10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, тоді як рухливість іонів в алюмосилікатної кераміці всього 10^{-13} - $10^{-16} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В діелектрику з електронною електропровідністю концентрація електронів в 10^9 - 10^{12} разів менше, ніж концентрація носіїв в діелектрику з іонною електропровідністю при однаковому заряді носіїв і однаковому значенні питомої провідності.

При іонній електропровідності число дисоційованих іонів знаходиться в експонентній залежності від температури: $N_T = N \exp(W_D/kT)$, де N - загальне число іонів в 1 м^3 ; W_D - енергія дисоціації; kT - теплова енергія. Рухливість іона також висловлюється експонентною залежністю від температури: $\mu_T = \mu_{\max} \exp(-W_{\text{пер}}/kT)$, де $\mu_{\max}$ - гранична рухливість іона; $W_{\text{пер}}$ - енергія переміщення іона, що визначає перехід його з одного нерівноважного положення в інше. Тоді рівняння (3.27) можна перетворити

$$\gamma = \exp((-b/T)), \quad (3.28)$$

де $b = (W_D + W_{\text{пер}})/k$.

Формула показує, що чим більше значення енергії дисоціації і переміщення, тим різкіше змінюється провідність при зміні температури.

Зазвичай $W_D \gg W_{\text{пер}}$, температурна залежність провідності визначається головним чином зміною концентрації носіїв. Величина b для твердих речовин лежить в межах $10\,000$ - $22\,000 \text{ К}$.

Якщо в діелектрику струм обумовлений пересуванням різнорідних іонів, вираз (3.28) приймає вигляд: $\gamma = \sum A_i \exp(-W_i/kT)$. У зв'язку з цим криві логарифмічної залежності питомої провідності від температури мають злами. При низьких температурах електропровідність обумовлена іонізованими домішками, при високих температурах вона стає власною. В деяких випадках злам кривої температурної залежності логарифма питомої провідності пояснюється тим, що іони основної речовини мають різні енергії дисоціації. Практично при розгляді залежностей γ і ρ від температури можна використовувати наближені формули виду: $\gamma = \gamma_0 \exp[\alpha_\gamma(T - T_0)]$, $\rho = \rho_0 \exp[\alpha_\rho(T - T_0)]$, γ_0 - питома об'ємна провідність при $T = T_0$; ρ_0 - питомий об'ємний опір $T = T_0$; $|\alpha_\gamma| = |\alpha_\rho|$ - відповідні температурні коефіцієнти.

Власна електропровідність твердих тіл і зміна її в залежності від температури визначаються структурою речовини і її складом. У тілах кристалічної будови з

іонною решіткою електропровідність пов'язана з валентністю іонів. Кристали з одновалентними іонами мають більшу питому провідність ніж кристали із багатовалентними іонами. Так, для кристалу NaCl питома провідність значно більше, чим для кристалів MgO або Al_2O_3 . В анізотропних кристалах питома провідність неоднакова по різних його осях. Наприклад, в кварці питома провідність в напрямку, паралельному головній осі, приблизно в 1000 раз більше, чим в напрямку, перпендикулярному цій осі. В кристалічних тілах із молекулярною решіткою (сірка, алмаз) питома провідність мала і визначається в основному домішками. У твердих пористих діелектриків при наявності в них вологи навіть у незначних кількостях значно збільшується питома провідність. Висушування матеріалів підвищує їх електричний опір, але при знаходженні висушених матеріалів у вологому середовищі опір знову зменшується. Найбільш помітне зниження питомої об'ємної опору під впливом вологості спостерігається у пористих матеріалів, які містять розчинні у воді домішки, що створюють електроліти з високою провідністю. для зменшення волого поглинання і вологопроникності пористі ізоляційні матеріали піддають просочуванню. При великій напруженості електричного поля необхідно враховувати можливість появи в твердих діелектриках електронного струму, швидко зростаючого з збільшенням напруженості поля, в результаті чого спостерігається відступ від закону Ома.

Поверхнева електропровідність твердих діелектриків

Поверхнева електропровідність обумовлена наявністю вологи, забрудненнями і різними дефектами поверхні діелектрика. Вода володіє значною провідністю. Досить тонкого шару вологи на поверхні діелектрика, щоб виявити помітну провідність, яка визначається в основному товщиною цього шару. Однак, оскільки опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою матеріалу, на поверхні якого вона знаходиться, питому поверхневу провідність зазвичай розглядають як властивість самого діелектрика.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика знаходиться в тісній залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Тому відносна вологість є вирішальним фактором, що визначає значення питомої поверхневої провідності діелектрика.

Питома поверхнева провідність тим нижче, чим менше полярність речовини і чим чистіше поверхня діелектрика. Причому наявність забруднень на поверхні відносно мало позначається на питомій поверхневої провідності гідрофобних діелектриків і сильно впливає на провідність гідрофільних діелектриків. До перших в основному відносяться неполярні діелектрики, чиста поверхня яких не змочується водою, до других - полярні та іонні діелектрики із змочуваною поверхнею. Найбільш значне збільшення питомої поверхневої провідності має місце у полярних діелектриків, що частково розчинені у воді, у яких на поверхні утворюється плівка електроліту. Крім того, до поверхні полярних діелектриків можуть прилипати різні забруднення, що також призводять до зростання поверхневої провідності. Високою поверхневою провідністю володіють і об'ємно-пористі матеріали, так як процес поглинання вологи вглиб матеріалу стимулює також створення її плівки на поверхні діелектрика. З метою зменшення поверхневої провідності застосовують різні прийоми очищення поверхні - промивку спиртом, водою з наступним просушуванням і т. п. Найбільш ефективним очищенням поверхні досить

нагрівостійкого виробу, не вбираючого воду, є тривале кип'ятіння в дистильованій воді. Покриття кераміки і стекол плівками кремнійорганічних лаків сприяє збереженню низької поверхневої провідності виробів у вологому середовищі.

Поверхнева електропровідність твердих діелектриків обумовлена наявністю вологи, забрудненнями та різними дефектами поверхні. Опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою речовини. Чим більша чистота поверхні тим більший поверхневий опір діелектрика. За ступенем адсорбції вологи усі тверді діелектрики підрозділяються:

1. **Гідрофобні діелектрики.** Це діелектрики, поверхня яких не змочується вологою, та які не розчиняються у воді. Вони мають найбільше значення опору поверхні, який практично не залежить від вологості повітря. Такі діелектрики найбільш стійкі до відносної вологості повітря. До них відносяться неполярні діелектрики, такі як фторопласт-4, парафін, віск, емалі та ін.

2. **Гідрофільні діелектрики.** Це діелектрики, поверхня яких частково змочується вологою та не розчиняється в ній. Забруднення поверхні таких діелектриків дуже позначається на поверхневій електропровідності. Це більш за все полярні діелектрики, такі як поліетилен, лаки, смоли.

3. **Діелектрики, які частково розчиняються у волозі.** Яскравим типом таких діелектриків є скло. При появі на поверхні такого діелектрика вологи, іони лужних металів переходять у неї, утворюючи електроліт. Тому поверхневий опір таких діелектриків залежить від вологості повітря.

4. **Поруваті діелектрики.** Наявність пор у таких діелектриках приводить до проникнення вологи у об'єм діелектрика, що стимулює утворення плівки вологи. Такі діелектрики дуже чутливі до вологи повітря. До них відносять папір, кераміку, деякі пластмаси та ін. З метою зниження поверхневої електропровідності, поверхні діелектрика очищають та покривають тонкими плівками гідрофобних діелектриків.

Контрольні питання до підрозділу 3.4

1. Які параметри використовують для оцінки об'ємної та поверхневої електропровідності різних матеріалів?
2. Як поводить наскрізний струм при тривалій роботі під напругою?
3. Які процеси відбуваються в газоподібному діелектрику крім іонізації? Опишіть процеси, відповідні ділянкам вольт-амперної характеристики.
4. Чим обумовлений струм в рідких діелектриках і які рідини мають більшу провідність?
5. Чим обумовлена електропровідність в діелектриках іонної будови?
6. Як змінюється питома провідність залежно від структури речовини? Наведіть приклади речовин.
7. Чим обумовлена поверхнева провідність, і які речовини володіють високим її значенням?
8. Які застосовують заходи для зменшення поверхневої провідності?
9. Як класифікуються діелектрики за ступенем адсорбції вологи?

3.5. ПАСИВНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

3.5.1. Класифікація пасивних діелектриків

Пасивні діелектрики використовують як електроізоляційні матеріали. Вони призначені для утворення електричної ізоляції, яка розв'язує частини електричних приладів, що випроводжують електричний струм чи відокремлює один від одного елементи схеми, чи конструкції, які знаходяться під різними електричними потенціалами. Класифікація пасивних діелектриків приведена на рис. 3.32. При виборі ізоляційного матеріалу для виготовлення приладів необхідно знати не тільки його електричні властивості, але і його теплові, вологісні, механічні та інші властивості.

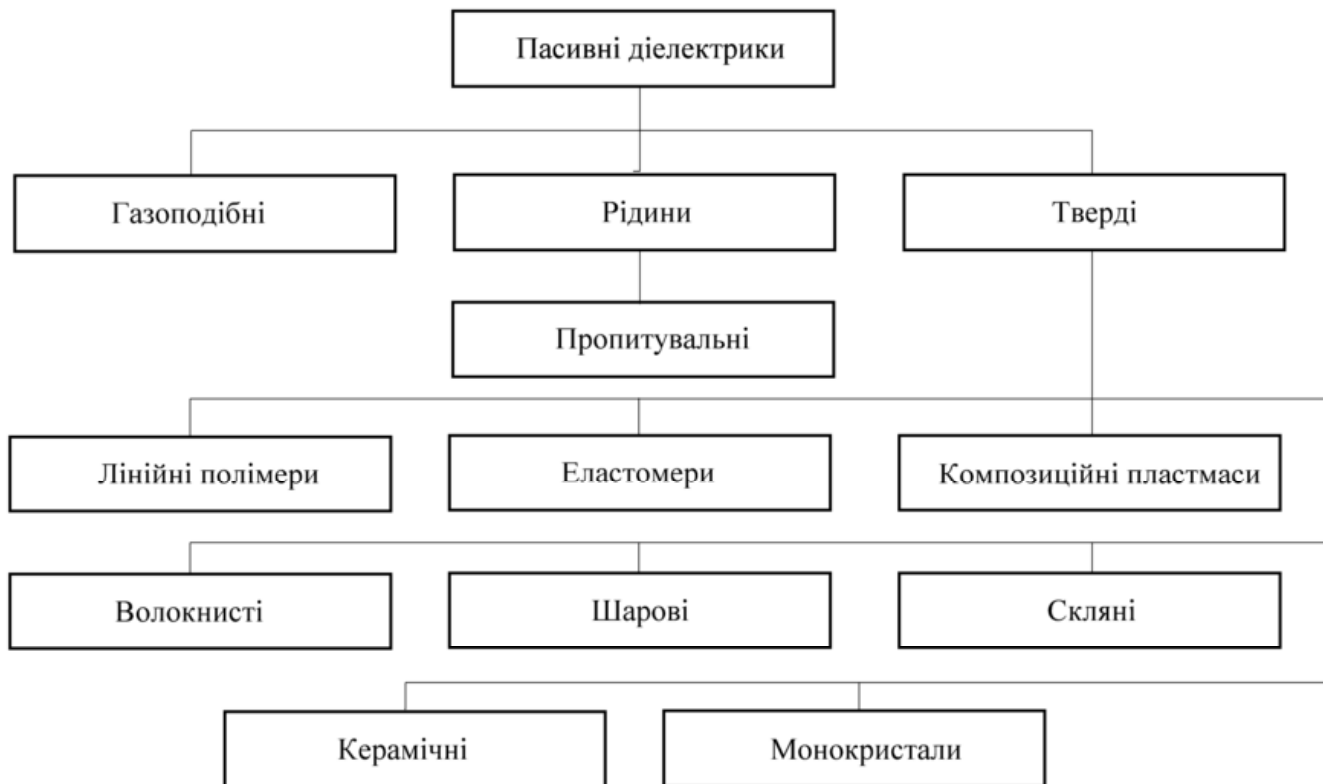


Рис. 3.32. Класифікація пасивних діелектриків

3.5.2. Хіміко-фізичні властивості діелектриків

Розглянемо основні фізико-хімічні властивості діелектриків, знання яких необхідне при експлуатації електротехнічних матеріалів.

Вологісні властивості діелектриків

Електроізоляційні матеріали мають можливість усмоктувати до себе вологу із оточуючого середовища. Повітря завжди має деяку кількість водяного пару.

Абсолютну вологість повітря оцінюють масою водяного пару, який утримується в одиниці об'єму повітря. **Відотною вологістю повітря** називають відношення маси водяного пару до максимальної його маси при даній температурі $\Psi_A = m/m_{\max} \cdot 100\%$.

Нормальними умовами називають вологість 60-70 % при температурі 20 ± 5 °С. Оскільки вода є дуже сильним дипольним діелектриком з низьким питомим опором, її присутність у порах твердих діелектриків приводить до різкого зниження якості діелектриків.

Стійкість діелектриків до вологи оцінюють за такими параметрами:

Вологостійкість - це здібність діелектрика поглинати вологу із повітря, що близьке до стану насичення водяним паром. Її оцінюють у відсотках по такій методиці. Зразок витримують спочатку при 55 ± 2 °С і відносній вологості повітря не більше 20 % на протязі 24 годин. Після чого охолоджують до 23 ± 2 °С в ексикаторі, з речовиною яка адсорбує водяний пар. Знаходять масу такого зразка. Після чого зразок витримують при 23 ± 2 °С при відносній вологості повітря 95 ± 2 % на протязі 1 - 28 діб, що залежить від типу діелектрика. Після чого його теж зважують. Вологостійкість оцінюють як $(m_1 - m)/m \cdot 100$ %, де m - маса сухого зразка; m_1 - маса вологого зразка.

Водостійкість - це здібність діелектрика поглинати воду при довгому знаходженні у воді. Її оцінюють як і вологостійкість, але зразки витримують у дистильованій воді при температурі $23 \pm 0,5$ °С на протязі 1 - 56 діб. Перед зважуванням із зразка залишок води знімають тканиною. Вологостійкість відрізняється від водостійкості, оскільки пористі матеріали дуже легко абсорбують вологу з повітря і значно трудніше воду. Вода внаслідок поверхневих сил не може попасти у пори.

Вологопроникність - це властивість матеріалу просувати пари води при наявності різниці тиску водяної пари з різних боків діелектрика. Кількість вологи m , яка проходить через діелектрик $m = \Pi \cdot S \cdot t \cdot (P_1 - P_2)/d$, де P_1, P_2 - тиск водяної пари з двох боків діелектрика; S - площа діелектрика; d - товщина діелектрика; t - час; Π - коефіцієнт питомої вологопроникності [с]. Чим він менший, тим трудніше діелектрик просуває скрізь себе вологу.

Вологість діелектриків приводить до зміни їх лінійних розмірів. Тому контролюють також відносну зміну розмірів діелектрика (*набухання*). Найбільшу вологостійкість та водостійкість мають неорганічні матеріали: скло, слюда, глазуrowаний фарфор та інші. Пористі неорганічні речовини поглинають відносно багато води, наприклад, азбест. З органічних матеріалів менше всього поглинають вологу неполярні діелектрики. Дуже легко звожуються матеріали на основі целюлози (папір, картон, тканини, гетинакси та ін). Ці діелектрики використовують тільки після захисту їх поверхні (просочуванням, лакуванням, герметизацією).

Теплові властивості діелектриків

Нагрівостійкість - здібність діелектрика витримувати дію високої температури на протязі часу, який дорівнює терміну нормальної експлуатації, без недопустимого погіршення його властивостей, які встановлені технічними умовами. Нагрівостійкість діелектриків оцінюють частіше методом Мартенса під вагою. Зразок закріплюють консольне одним кінцем. На другий кінець закріплюють рейку з вагою та стрілкою. При нагріванні системи при якійсь температурі зразок різко деформується. Ця температура і є нагрівостійкістю зразка.

Згідно ГОСТ 8865-70 діелектрики підрозділяються на класи нагрівостійкості (таблиця 3.1):

Таблиця 3.1 - Класи нагрівостійкості

Клас	У	А	Е	Д	Ф	Н	С
Найбільша робоча температура, °С.	90	105	120	130	155	180	>180

До класу **У** відносять волокнисті матеріали на основі целюлози та шовку, якщо вони не чим не просочені. До цього класу належать полістирол, парафін, віск.

До класу **А** відносять ті ж самі матеріали, але якщо вони просочені лаками, чи компаундами. Це лакотканини, лакопапір та ін. До цього класу відносять також поліамідні плівки, емаль дротів.

До класу **Е** відносять пластмаси з органічним наповнювачем та термореактивною зв'язкою. Це гетинакс, текстоліт. До них відносять також лавсан, поліуретанові смолки та компаунди.

До класу **В** входять матеріали, які мають велику кількість неорганічних речовин. Наприклад, слюда, азбест, склотекстоліт, склотканини.

До класу **Ф** належать матеріали на основі слюд та скла. Наприклад, міканіти, мікалекси, поліефірні смолки.

До класу **С** відносять чисто неорганічні речовини: кераміка, скло, слюди, кварц. З органічних тільки фторопласт-4 та матеріали на основі поліамідів.

Треба підкреслити, що при високих температурах прискорюється старіння матеріалу, змінюються його механічні властивості.

Холодостійкість - здатність діелектриків витримувати тривалу дію низьких ($-60...-70^{\circ}\text{C}$) температур без недопустимого змінювання властивостей.

Оцінюють її як і нагрівостійкість. Але при низьких температурах багато еластичних та пружних речовин стає крихкими та жорсткими. Наприклад, гума, яка при температурах $-30...-50^{\circ}\text{C}$ стає крихкою, як скло. Ось чому такі матеріали неможливо використовувати при низьких температурах.

Теплопровідність - це властивість матеріалів проводити тепло. Практичне значення теплопровідності пов'язане з тим, що теплота, яка виділяється внаслідок втрат потужності переходить у повітря крізь різні матеріали. Теплопровідність оцінюють коефіцієнтом теплопровідності λ_T , який входить у рівняння Фур'є $\Delta P_T = \lambda_T \cdot (dT/dx) \cdot \Delta S$, де ΔP_T - потужність теплового потоку крізь площину ΔS ; dT/dx - градієнт температури; λ_T - коефіцієнт теплопровідності.

Діелектричні матеріали мають низьку теплопровідність, особливо ті, які мають повітряні включення.

Так, для повітря $\lambda_T = 0.05$ Вт/м·К; для паперу - 0,1 Вт/м·К; текстоліт - 0,25 Вт/м·К; кварц - 1,25 Вт/м·К.

Оксид берилію має аномально велике значення теплопровідності (218,0 Вт/м·К), тому він використовується у теплопровідних пастах, які використовуються для охолодження напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів та інших).

Треба пам'ятати, що BeO шкодить здоров'ю людини. При його використанні треба дотримуватися правил безпеки.

Механічні властивості діелектриків

До них відносять:

1. **Міцність на розтяг, стиск та вигин.** Це статична міцність матеріалів. Вимірюється у [Па]. Слід пам'ятати, що деякі матеріали (полістирол, фторопласт-4) при довгій дії механічних напружень течуть, тобто деформуються вже при кімнатних температурах.

2. **Крихкість** - здібність матеріалу руйнуватися без значної пластичної деформації. Тобто це стійкість матеріалу до ударної напруги. Крихкість часто оцінюють ударною в'язкістю. Ударною в'язкістю називають затрачену на злом зразка енергію відносно до площини перетину матеріалу. Вимірюється у Дж/м². Дуже високу ударну в'язкість має поліетилен (100 кДж/м²), а малу - кераміка (2-5 кДж/м²).

3. **Твердість** - це здібність поверхневого шару матеріалу протидіяти деформації від стиску через речі малих розмірів. Твердість матеріалів оцінюють по шкалі за Моосом, де 10 стандартних мінералів розташовуються за ступенем росту твердості. Якщо матеріал, досліджується, зшкрябується мінералом з твердістю $n + 1$, а сам шкрябає мінерал з твердістю n , то його твердість має значення більше n , та менше $n+1$ (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Шкала твердості за Моосом.

Твердість	Еталон	Заміна
1	Тальк	М'який олівець
2	Гіпс	М'який алюмінієвий дріт
3	Кальцій	Мідна монета
4	Флюорит	Залізний дріт
5	Апатит	Скло
6	Полевой шпат	Сталевий дріт
7	Кварц	Запильник
8	Топаз	-
9	Корунд	-
10	Алмаз	-

Твердість матеріалів оцінюють також вдавленням в поверхню зразка алмазної піраміди чи сталеві кулі. По відбитку розраховують твердість у [Па]. Це більш точний засіб.

Розчинність

Це маса твердих діелектриків, яка розчиняється з одиниці площини за одиницю часу. Розчинність матеріалів треба знати при виготовленні приладів, щоб не порушити їх працю. Так неполярні діелектрики (парафін, каучук) розчиняються у рідких вуглеводах (толуолі, бензолі); дипольні смоли (фенол -формальдегіди, каніфоль) - у спирті.

Стійкість до цвілі

Електроізоляційні матеріали руйнуються перш за все під впливом пліснявих грибів та бактерій. На ріст та розвиток пліснявих грибів впливають чи фактори: температура, вологість, світло, рух повітря. Вплив пліснявих грибів на діелектричні матеріали проявляється так:

1. - Будуються електропровідні ділянки на поверхні матеріалів, що знижує поверхневий, а іноді і об'ємний питомий опір.

2. - Має місце хімічна дія на діелектрики, зумовлена продуктами життєдіяльності пліснявих грибів, що пошкоджує електричні та механічні властивості діелектриків.

3. - Плісняві гриби всмоктують та зв'язують воду, що може руйнувати матеріал внаслідок руйнування його окремих компонентів (пластифікаторів, заповнювачів).

Захист діелектричних матеріалів від цвілі проводиться фунгіцидами та вентиляцією. Як фунгіциди використовують солі ртуті та міді.

Стійкість до цвілі оцінюють за 5-бальною системою:

- 0 - нема росту цвілі;
- 1 - дуже слабкий ріст цвілі;
- 2 - слабкий ріст цвілі;
- 3 - помірний ріст цвілі;
- 4 - сильний ріст цвілі.

Контрольні питання до підрозділу 3.5.

1. Наведіть класифікацію пасивних діелектриків.
2. Які фізико-хімічні властивості діелектриків вам відомі?
3. Наведіть вимоги до діелектриків, що використовуються на водному транспорті.

3.6. АКТИВНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Активними діелектриками називають ті, властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх факторів та використовувати ці фактори для створення функціональних елементів електроніки. Частіше за все активні діелектрики класифікують згідно фізичним ефектам, які можна використовувати для керування властивостями матеріалів. Тобто можна виділити сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики, електрети, рідкі кристали та ін. Але хоча така класифікація є логічною дуже нелегко розподілити одну групу матеріалів від другої. Це пов'язане з тим, що багато активних діелектриків мають високу чуйність по відношенню декількох видів енергетичних впливів. Найбільшу універсальність мають сегнетоелектрики. Вони можуть мати властивості п'єзоелектрику, піроелектрику, електретів, нелінійно-оптичних матеріалів.

3.6.1. Сегнетоелектрики

Сегнетоелектриками називають речовини, які мають спонтанну поляризацію, направлення якої може бути змінено за допомогою зовнішнього електричного поля.

Їх особливості такі:

1. При відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики мають, як правило, доменну структуру. Домен - це макроскопічні зони, які мають спонтанну поляризацію, що виникає під впливом внутрішніх процесів у діелектрику. Направлення електричних моментів у різних доменах різне. Тому сумарна поляризованість зразка дорівнює нулю. В принципі, якщо кристал має

дуже малі розміри, то він може утримувати тільки один домен. Але крупні зразки завжди розбиваються на велику кількість доменів, оскільки однодомений стан енергетично не вигідний. Лінійні розміри доменів 10^{-4} - 10^{-1} см.

2. Зовнішнє електричне поле змінює доменну структуру, що створює ефект сильної поляризації. Вона пов'язана з процесами росту доменів, електричний момент яких близький до напрямлення зовнішнього поля. Тому сегнетоелектрики мають велике значення діелектричної проникності, та нелінійну залежність вектора поляризації від напруженості електричного поля, яка має ділянку насичення (рисунок 3.33).



Рисунок 3.33 - Основна крива поляризації (а) та петля діелектричного гістерезису (б)

3. Сегнетоелектрики мають діелектричний гістерезис, тобто зниження електричного поля до 0, після повної поляризації діелектрика не приводить до повної його деполіризації (рисунок 3.33).

4. Специфічні властивості сегнетоелектриків мають місце тільки у деякому інтервалі температур. При нагріванні сегнетоелектриків вище деякої критичної температури (точка Кюрі), має місце розпад доменної структури: спонтанна поляризація зникає.

5. Сегнетоелектрики у визначених умовах постають п'єзоелектриками та піроелектриками.

Класифікація сегнетоелектриків

За типом хімічного зв'язку та фізичних властивостей сегнетоелектрики підрозділяють на дві групи:

1. **Іонні сегнетоелектрики.** Ці матеріали мають кристалічну ґратку, основою якої є кисневий октаедр. До них відносять метатитанат барію (BaTiO_3), ніобат літію (LiNbO_3), танталат літію (LiTaO_3), барій-натрієвий ніобат ($\text{BaNaNb}_5\text{O}_{15}$). Ці сегнетоелектрики мають велику механічну міцність, не розчиняються у воді, дуже легко отримуються за керамічною технологією, мають досить високу температуру Кюрі (наприклад, LiNbO_3 - 1483K, BaTiO_3 - 393K) та велике значення спонтанної поляризації.
2. **Дипольні сегнетоелектрики.** Ці матеріали мають готові полярні групи атомів, які займають різні положення рівноваги. До них відносять сегнетову сіль

($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), триглісульфат ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$), дігідрофосфат калію (KH_2PO_4), нітрит натрію (NaNO_2) та ін. Ці діелектрики мають низькі механічні властивості, легко розчиняються у воді, мають низьку температуру Кюрі (часто нижче кімнатної). Їх дуже легко ростити з водних розчинів у вигляді монокристалів. В техніці найбільш поширені іонні сегнетоелектрики. Тому подалі ми будемо розглядати тільки цю групу сегнетоелектриків.

Механізм спонтанної поляризації

Цей механізм розглянемо на прикладі метатитанату барію (BaTiO_3). При температурі вище температури Кюрі ($T_K = 120^\circ\text{C}$) BaTiO_3 має кристалеву решітку типа перовскіту (рисунок 3.34).

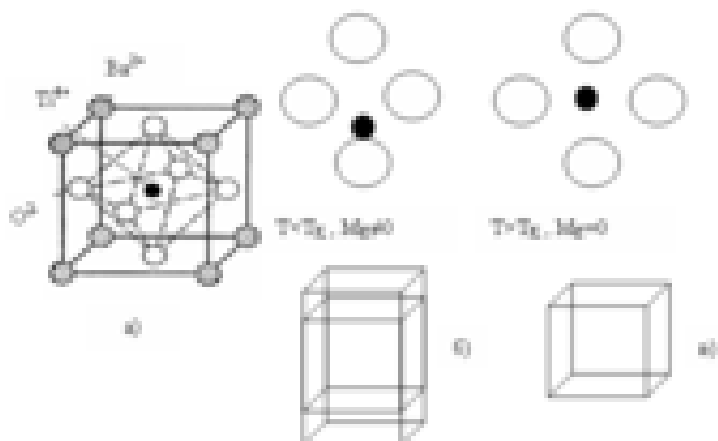


Рисунок 3.34 - До пояснення механізму поляризації в метатитанаті барію:

а) кристалева решітка метититанату барію; б) деформація елементарної комірки при температурі нижче точки Кюрі; в) елементарна комірка при температурі вище точки Кюрі.

Основу цієї структури складають кисневі октаедри, у центрі яких знаходяться іони титана, а у вершинах - іони кисню. Розмір елементарної комірки більше подвоєної суми іонних радіусів титану та кисню. Тому іон титана має деяку волю пересування у межах кисневого октаедра.

Якщо температура висока ($T > T_K$), то внаслідок інтенсивного теплового руху іон титана безперервно перекидається від одного кисневого іона до іншого, так що усереднено у часі його положення співпадає з центром елементарної комірки, тобто така комірка не має електричного моменту (рисунок 3.34, в). Це приводить до відсутності доменів та спонтанної поляризації.

При температурі нижче температури Кюрі ($T < T_K = 120^\circ\text{C}$), енергії теплового руху недостатньо для перекиду іонів титана з одного положення рівноваги до другого, тому іон титана локалізується поблизу одного із оточуючих іонів кисню. Внаслідок цього кубічна симетрія у розташуванні заряджених часток порушується та елементарна комірка має електричний момент (рисунок 3.34, б). Одночасно з цим викривляється і форма комірки - вона витягується вздовж напрямлення електричного моменту, приймаючи тетрагональну симетрію. Електричний момент комірки діє на іони титану у сусідніх комірках та зміщує останні у тому ж напрямку. Внаслідок цього споруджується домен, тобто макроскопічна ділянка, яка має електричний момент. Одночасно у будь-якому іншому місці виникає аналогічно другий домен, з напрямком електричного моменту інакшим. У тетрагональній модифікації BaTiO_3 зміщення іонів може проходити у напрямку будь-якого ребра

елементарної комірки, тобто можливі шість напрямків спонтанної поляризації. Оскільки напрямки електричних моментів доменів випадкові, то сумарний електричний момент речовини у відсутності зовнішнього електричного поля дорівнює нулю.

При прикладанні зовнішнього електричного поля до сегнетоелектрика ті іони титана, які дуже зміщені у напрямку електричного поля, свого положення не змінюють. Але ті іони, які розташовані не по напрямку зовнішнього електричного поля, зміщуються у напрямку електричного моменту сусіднього домену, який має електричний момент сприятливий до напрямку зовнішнього електричного поля. Тобто розростаються домени з переважною орієнтацією електричного моменту, а з протилежною зменшуються у розмірах. У слабких електричних полях домінують процеси звернутого зміщення доменних меж, тому в слабких полях залежність $D = f(E)$ носить лінійний характер (рисунок 3.33, ОА). При деякій напруженості поля (вище точки В) усі іони стають у напрямку електричного поля, тобто сегнетоелектрик має монодомений стан. У цьому разі при зростанні електричного поля вектор електричного зміщення не змінюється, тобто настає насичення поляризації.

Якщо в поляризованому до насичення зразку зменшити напруженість поля до нуля, то поляризація до нуля не зменшиться, а буде мати деяке залишкове значення D_r . Тобто у змінних електричних полях сегнетоелектрики мають електричний гістерезис.

Нелінійний характер залежності $D=f(E)$ з ділянкою насичення приводить до залежності діелектричної проникності від напруженості електричного поля (рисунок 3.35).

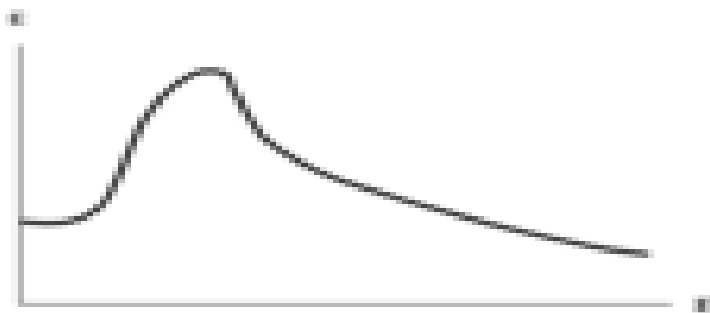


Рисунок 3.35 - Залежність діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля

Наявність ділянки насичення приводить згідно (3.1) до зменшення ϵ при зростанні напруженості електричного поля, тому що вектор D не змінюється в сильних електричних полях, а напруженість поля зростає. Специфічні властивості сегнетоелектриків мають місце тільки у визначеному інтервалі температур (рисунок 3.36).

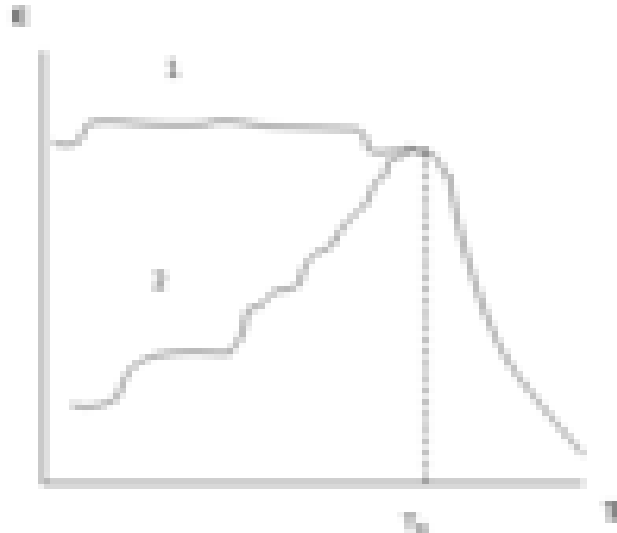


Рисунок 3.36 - Залежність діелектричної проникності від температури при сильному (1) і слабкому (2) електричному полі

У сильному електричному полі сегнетоелектрик має монодомений стан, тому підвищення температури слабо відбивається на поляризації. Але після температури Кюрі має місце розпад доменного стану і діелектрик втрачає спонтанну поляризацію.

В слабких електричних полях підвищення температури приводить до послаблення зв'язків між іонами титану та кисню. Під впливом електричного поля іони титану у доменах, що мають не сприятливо зорієнтований електричний момент пересуваються у напрямку електричного моменту сусіднього домену, який має більш сприятливий момент. Тому останні зростають у розмірах та поляризація теж зростає аж до точки Кюрі.

Метатитанат барію має також п'єзоелектричні властивості. Це пов'язане з електричною асиметрією кристалічної решітки у сильних електричних полях. Під впливом “поляризуючого” поля елементарна комірка деформується, набуваючи тетрагональну форму, тобто кристал стає подібним великому електричному диполю (рисунок 3.37 а,б).

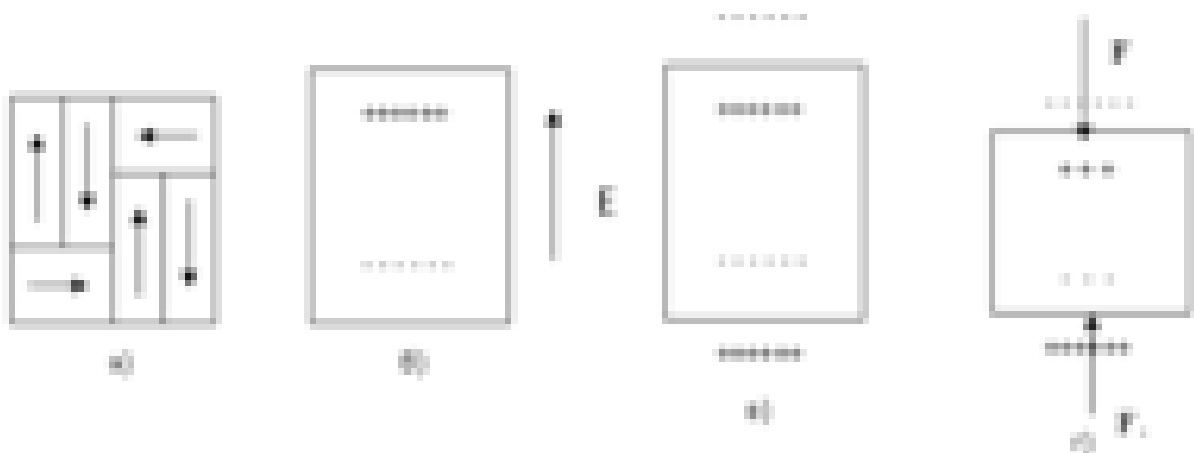


Рисунок 3.37 - До пояснення п'єзоефекту у метатитанаті барію: а – розташування доменів до дії електричного поля; б – виникнення деформації кристала під впливом електричного поля; в – виникнення подвійного шару зарядів після поляризації; г – порушення рівноваги у подвійному шарі зарядів під впливом механічної деформації

На його протилежних гранях з'являються електричні заряди, рівні по значенню, але протилежні по знаку. Ці заряди швидко компенсуються зарядженими частками протилежного знаку, які завжди є у зовнішньому середовищі. Тобто виникає подвійний шар зарядів (рисунок 3.37 в).

Якщо такий кристал піддати механічній напрузі, наприклад, стиснути, по напрямку осі вздовж напрямку поляризації, то розміри кристала вздовж осі зменшаться, а перпендикулярно – збільшаться (рисунок 3.37, г). Але оскільки спонтанна поляризація пов'язана з розміром елементарної комірки, то її значення зменшується. Це приводить до звільнення поверхневого заряду подвійного шару. Тобто виникає збитковий заряд пропорційний механічній напрузі - прямий п'єзоефект. Якщо до поляризованого кристала метатитанату барію прикласти різницю потенціалів, то під впливом електричного поля змінюється розмір елементарної комірки, тобто виникає деформація кристала, яка пропорційна прикладеній напрузі - оборотний п'єзоефект.

Використання сегнетоелектриків

У техніці найбільше використовують іонні сегнетоелектрики, що пов'язане з їх механічними властивостями та вологістю. Важливішими напрямками використання сегнетоелектриків є:

1. Низькочастотні конденсатори з великою питомою ємністю.
2. Вариконди - тобто конденсатори, ємність яких змінюється від напруги. Вони використовуються для модуляторів, підсилювачів, генераторів.
3. Комірки пам'яті для ЕОМ. Наявність гистерезису дозволяє мати два стани, що є необхідним для запам'ятовуючих комірок.
4. П'єзоелектрики. Тобто сегнетоелектрики використовують згідно прямому та оборотному п'єзоефектам (дивись п'єзоелектрики).
5. Піроелектрики. Тобто сегнетоелектрики використовують як перетворювачі теплової енергії в електричну (дивись піроелектрики).

Слід підкреслити, що крім указаних вище сегнетоелектриків дуже поширена сегнетокераміка. Ці матеріали виготовляють на основі BaTiO_3 з різними домішками по керамічній технології. Це дозволяє керувати необхідними їх властивостями.

3.6.2. П'єзоелектрики

П'єзоелектриками називають діелектрики, які мають дужий прямий та оборотний п'єзоелектричний ефекти.

Прямим п'єзоелектричним ефектом називають явище поляризації під впливом механічних напруг. Електричний заряд, що виникає на кожній поверхні діелектрика, змінюється згідно лінійному закону від механічних зусиль

$$Q = d \cdot F, \quad (3.29)$$

$$q_s = Q/S = d \cdot F/s = d \cdot \sigma_s, \quad (3.30)$$

де Q - заряд;

d - п'єзомодуль;

F - сила;

S - площа;

q_s - заряд на одиницю поверхні;

σ_s - механічна напруга у перерізі діелектрика.

Тобто п'єзомодуль - це поверхневий заряд на одиниці поверхні діелектрика, що виникає під впливом одиниці тиску. Його розмірність [Кл/Н].

Оборотним п'єзоелектричним ефектом називають зміну розмірів діелектрика $\Delta L/L$ під впливом напруженості електричного поля за лінійним законом

$$\Delta L/L = d \cdot E, \quad (3.31)$$

де $\Delta L/L$ - відносна деформація зразка.

П'єзомодулі прямого та оборотного п'єзоефектів рівні. Деформація п'єзоелектрика залежить від напрямку електричного поля та змінює знак при зміні напрямку останнього. Якщо прикласти до п'єзоелектрика синусоїдальне електричне поле, то у ньому виникнуть синусоїдальні деформації тієї ж частоти (рисунок 3.38).

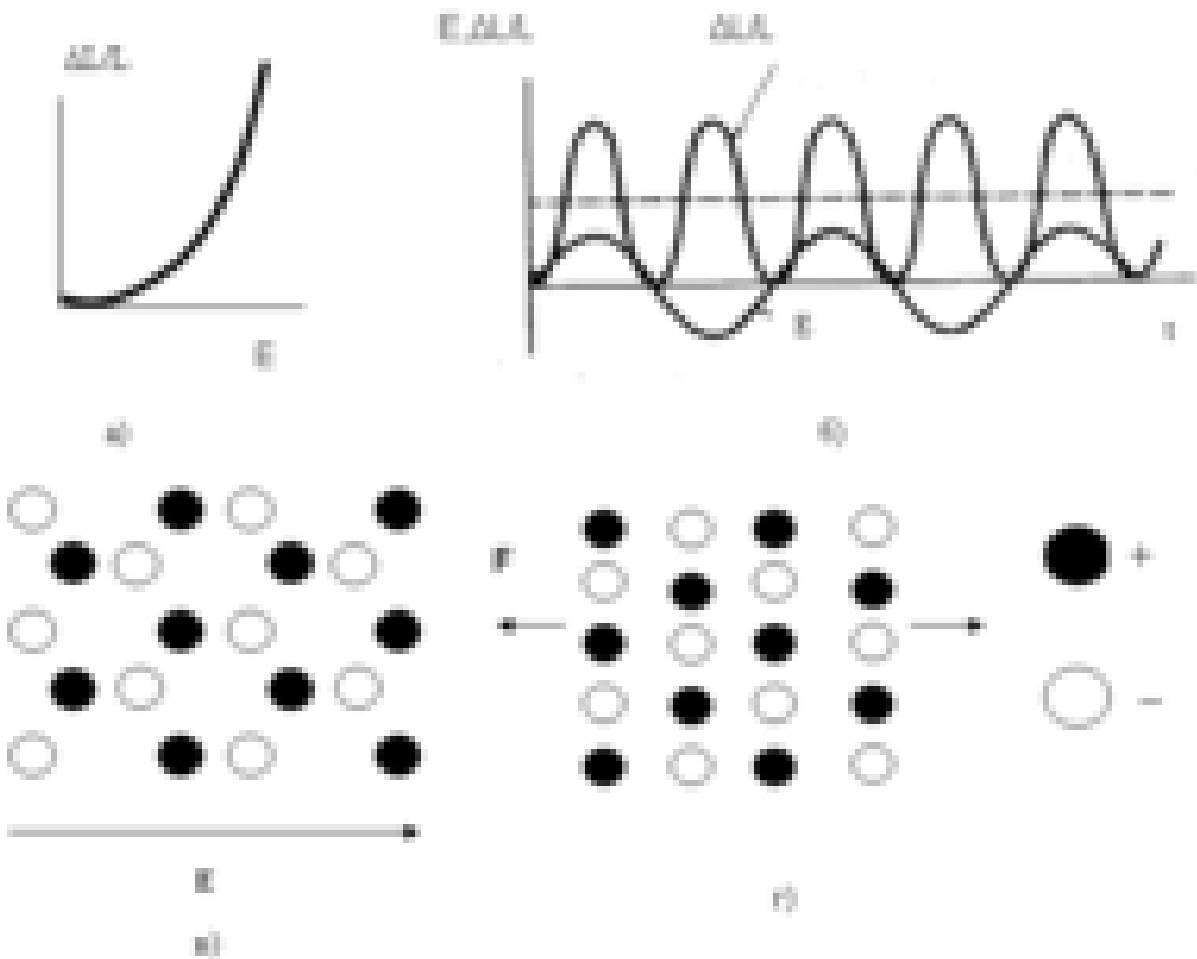


Рисунок 3.38 - Закономірності ефекту електрострикції у діелектриках: а) ефект електрострикції; б) ефект електрострикції у синусоїдальному полі; в) прикладання електричного поля; г) прикладання механічної напруги

Розділяють повздовжній та поперечний п'єзоелектричні ефекти. Під першим розуміють такий ефект, коли виникнення електричних зарядів на протилежних гранях зразка визначають у тому ж напрямку, у якому були прикладені механічні зусилля, а при оборотному п'єзоефекті деформацію вимірюють у напрямку протилежному прикладеному електричному полю.

При поперечному п'єзоелектричному ефекті, заряди чи деформації, які виникають, вимірюють у напрямку перпендикулярному напрямку механічних зусиль чи електричному полю, відповідно.

Оборотний п'єзоелектричний ефект не слід переплутувати з явищем електрострикції, яке має місце у будь-яких діелектриках при будь-яких механізмах поляризації.

Електрострикцією називають зміну геометричних розмірів діелектрика внаслідок зміщення електричних зарядів його структури, пропорційне квадрату напруженості поля і яке не залежить від його напрямку:

$$\Delta L/L = \chi \cdot E^2, \quad (3.32)$$

де χ - модуль електрострикції

Якщо до зразка у цьому випадку прикласти синусоїдальну напругу, то деформація зразка буде проходити з подвійною частотою (рис. 3.38, б):

$$\Delta L/L = \chi \cdot E_M^2 \sin^2 \omega t = \chi \cdot E_M^2 (1 - \cos 2\omega t). \quad (3.33)$$

Явище електрострикції не зворотне. Якщо до іонного діелектрика з симетричною структурою прикласти електричне поле, то під його впливом позитивні іони змістяться по полю, а негативні - протилежне полю, що приведе до деформації зразка. При механічній деформації розтягнення, кількість іонів протилежного знаку, зміщених у будь-якому напрямку, буде однаковою і ніякого заряду на поверхні зразка не виникає (рисунок 3.38, г). П'єзоєфекти виникають тільки в речовинах з гетерополярним хімічним зв'язком, тобто п'єзоелектриками можуть бути лише іонні чи дуже полярні діелектрики. Крім того необхідною умовою наявності п'єзоєфекту є відсутність центра симетрії кристала. П'єзоелектриками можуть бути тільки речовини з великим значенням питомого опору. Інакше п'єзоелектрична поляризація швидко компенсується вільними носіями заряду.

П'єзоелектричні властивості мають багато речовин, але практично використовують тільки деякі.

Перш за все це кварц (SiO_2). П'єзоелектричні властивості мають місце тільки у β - кварцу до температури 573°C . Кварц має форму шестигранної призми (рисунок 3.39). У кристалах кварцу розділяють три головних осі: X - електрична; Y - механічна; Z - оптична.

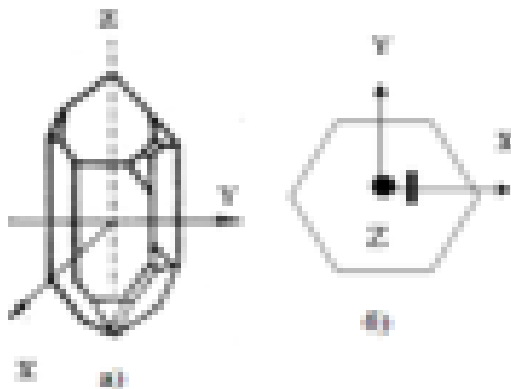


Рисунок 3.39 - Кристал кварцу (а) та його перетин відносно осі Z (б)

Пластини кварцу, вирізані перпендикулярно осі Z, не мають п'єзоефектів. Найбільший п'єзоефект мають пластини, які вирізані перпендикулярно електричній осі X.

Якщо взяти плоскопаралельну пластину кварцу, нанести на її бокові поверхні металеві електроди та помістити у тримач, то матимемо п'єзоелектричний резонатор з визначеною резонансною частотою. Остання залежить від товщини пластини та напрямлення кристалографічного різку. Перевагою кварцових резонаторів є дуже велика добротність (до 10^6 - 10^7). Це забезпечує високу частотну вибірковість кварцових резонаторів. Такі резонатори використовують для стабілізації частоти генераторів, як фільтри.

Крім того використовують кристали турмаліну (складні алюмоборосилікати), який використовується для резонаторів на більші частоти ніж кварцові.

Значну конкуренцію кварцу, перевищуючи його по добротності на великих частотах, складають ніобат та танталат літію (LiNbO_3 та LiTaO_3). Але для того, щоб LiNbO_3 та LiTaO_3 мали п'єзоелектричні ефекти, їх переводять у монокристалний стан відпалюванням у сильному електричному полі (тобто це сегнетоелектрики). Найбільш поширена, як п'єзоелектрик, сегнетокераміка (п'єзокераміка). Її виготовляють з твердих розчинів PbZrO_3 - PbTiO_3 та обов'язково поляризують у сильному електричному полі.

Такі матеріали використовують для побудови потужних ультразвукових випромінювачів для дефектоскопії, механічної обробки матеріалів, гідроакустики. З п'єзокераміки виготовляють мікрофони, телефони, гучномовці, датчики тиску, деформації, прискорень. Подвійне перетворювання енергії використовують для фільтрів, ліній затримки та п'єзотрансформаторів. Останні дозволяють одержувати великі напруги і використовують для живлення електронно-випромінювальних трубок, лічильників Гейгера та ін.

3.6.3. Піроелектрики

До піроелектриків відносять діелектрики, які мають значний піроелектричний ефект. *Піроелектричним ефектом* називають змінювання спонтанної поляризації діелектриків при зміні температури

$$\Delta P_{\text{сп}} = - p \cdot \Delta T, \quad (3.34)$$

де $\Delta P_{\text{сп}}$ - змінювання спонтанної поляризації діелектрика;

ΔT - змінювання температури;

p - піроелектричний коефіцієнт.

При незмінній температурі спонтанний електричний момент діелектрика компенсується вільними зарядами протилежного знаку за рахунок процесів електропровідності чи адсорбції заряджених часток з повітря.

Змінювання спонтанної поляризації супроводжується звільненням деякого заряду на поверхні діелектрика, тобто в замкнутому колі виникає електричний струм.

Температурне змінювання спонтанної поляризації зумовлено двома причинами. Перш за все підвищення температури порушує упорядкованість у розташуванні елементарних дипольних моментів (первинний чи дійсний піроефект), а по-друге, нагрів змінює лінійні розміри діелектрика та п'єзоелектричну поляризацію, зумовлену деформацією (вторинний піроефект). Піроелектричний коефіцієнт p враховує обидва ці фактори. Якість піроелектричного матеріалу характеризують приведеним параметром

$$R_B = P/(\epsilon \cdot C_T), \quad (3.35)$$

де C_T - питома об'ємна теплоємність.

Чим більше значення R_B , тим більшу різницю потенціалів можна мати на зразку при тій же потужності.

Піроелектричними властивостями володіють деякі лінійні діелектрики (наприклад, турмалін, сульфат літію) і усі сегнетоелектрики. В лінійних піроелектриках, на відміну від сегнетоелектриків, направлення поляризації не може змінюватися за допомогою зовнішнього поля. Сегнетоелектрики мають піроелектричні властивості тільки в моноклоновому стані, чого досягають витриманням сегнетоелектрика у постійному полі при температурі трохи нижче точки Кюрі. Значення піроелектричного коефіцієнта зростає по мірі наближення до температури Кюрі, оскільки

$$p = dP/dT = A/2 \cdot (T_K - T)^{1/2}, \quad (3.36)$$

де T_K - точка Кюрі;

A - деяка постійна;

T - температура.

Добрими піроелектриками є триглінусульфат ($p = 360$ мкКл/(м²·К)), ніобат барія-стронція ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$) - $p = (4-38) \cdot 10^{-4}$ Кл/м²·К, ніобат літію LiNbO_3 та танталат літію LiTaO_3 . Крім того піроелектричний ефект має сегнетокераміка та деякі полімери, наприклад, полівінілденфторід та полівінілденхлорід. Останні мають просту технологію, невелику вартість, малу інерційність піроефекту на великих частотах.

Піроелектрики використовують як теплові датчики та приймачі випромінювальної енергії (ІЧ та НВЧ-діапазону). Специфічною властивістю піроелектричних приймачів є відсутність вибірності по спектру випромінювання та відсутність охолодження при детектуванні також в далекій ІЧ- області спектра. Швидкодія їх досягає 10 МГц.

3.6.4. Електрети

Електретами називають діелектрики, які довго зберігають поляризацію та утворюють біля себе електричне поле.

Згідно умовам виготовлення, електрети розподіляються:

1. Термоелектрети виготовляють в сильному електричному полі з розплавів матеріалу.
2. Фотоелектрети виготовляють у сильному електричному полі та впливу світла.

3. Електроелектрети виготовляють при дії тільки сильного електричного поля.

Термоелектрети зберігають поляризацію на протязі декількох місяців і майже років. Фотоелектрети довго зберігають поляризацію у темряві.

Виникнення електретного стану пояснюється рисунком 3.40.

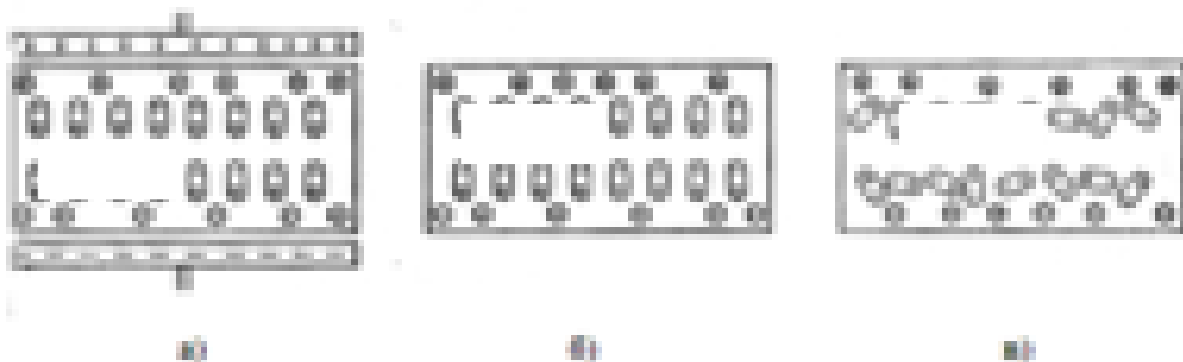


Рисунок 3.40 - Зміна стану зарядів електрета у часі: а – при виготовленні; б – одразу після виготовлення; в – через деякий час після виготовлення

При виготовленні електрета, на кожній його поверхні, що знаходиться під електродом, виникають електричні заряди обох знаків. Заряди, які переходять з електрода в твердий діелектрик, мають такий же знак як і електрод, їх називають *гомозарядами*.

Заряди з протилежним значенням полярності електродів виникають в електретах під впливом поляризації, їх називають *гетерозарядами*.

Різниця гетеро- та гомо зарядів дає результуючий заряд поверхні електрета. Зразу після виготовлення домінує гетерозаряд, а через деякий час, коли тепловий рух дезорієнтує диполі, домінує гомозаряд. Тому має місце інверсія заряду поверхні електрету після його виготовлення (рисунок 3.41). Гомозаряди зберігаються на протязі більшого часу ніж гетерозаряди. В органічних полярних діелектриках домінують гетерозаряди, а у керамічних та органічних неполярних діелектриках - гомозаряди. Гомозаряди локалізуються у поверхневих шарах діелектрика, тоді як гетерозаряди - в об'ємі. Час життя електретів досягає кілька років, але він швидко зменшується при зростанні температури, вологості середовища, світла.

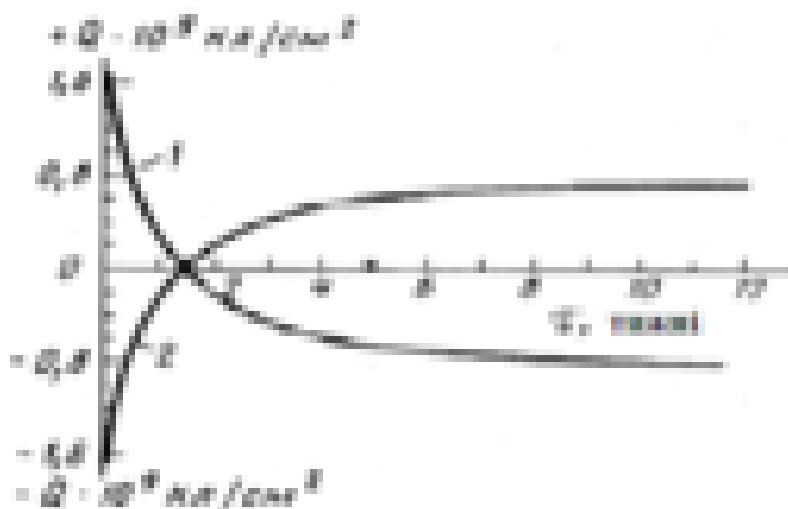


Рисунок 3.41 - Зміна знаку заряду поверхні електрета у часі

У теперішній час найбільш поширені електрети на основі полімерних плівок (політетрафторетилен, поліметилметакрилат, поліетилентерефталат). Електрети використовують для виготовлення мікрофонів, телефонів, пилюкоуловлювачів, дозиметрів, електрополімерів та ін. Частіше за все використовують тонкі плівки (3-20 мкм) металізовані з однієї поверхні.

3.6.5. Рідкі кристали

Рідкі кристали - це фазовий стан, в яке переходять деякі речовини при певних умовах (температура, тиск, концентрація в розчині). Рідкі кристали володіють одночасно властивостями як рідин (текучість), так і кристалів (анізотропія). За структурою ЖК являють собою в'язкі рідини, що складаються з молекул витягнутої або дископодібної форми, певним чином упорядкованих у всьому обсязі цієї рідини. Найбільш характерним властивістю ЖК є їх здатність змінювати орієнтацію молекул під впливом електричних полів, що відкриває широкі можливості для застосування їх в промисловості. За типом ЖК зазвичай поділяють на дві великі групи: нематичні і смектичні. У свою чергу нематичні підрозділяються на власне нематичні і холестеричні рідкі кристали (рисунок 3.42). За загальною симетрією усі рідкі кристали підрозділяються на три типи: нематичні, холестеричні, смектичні.

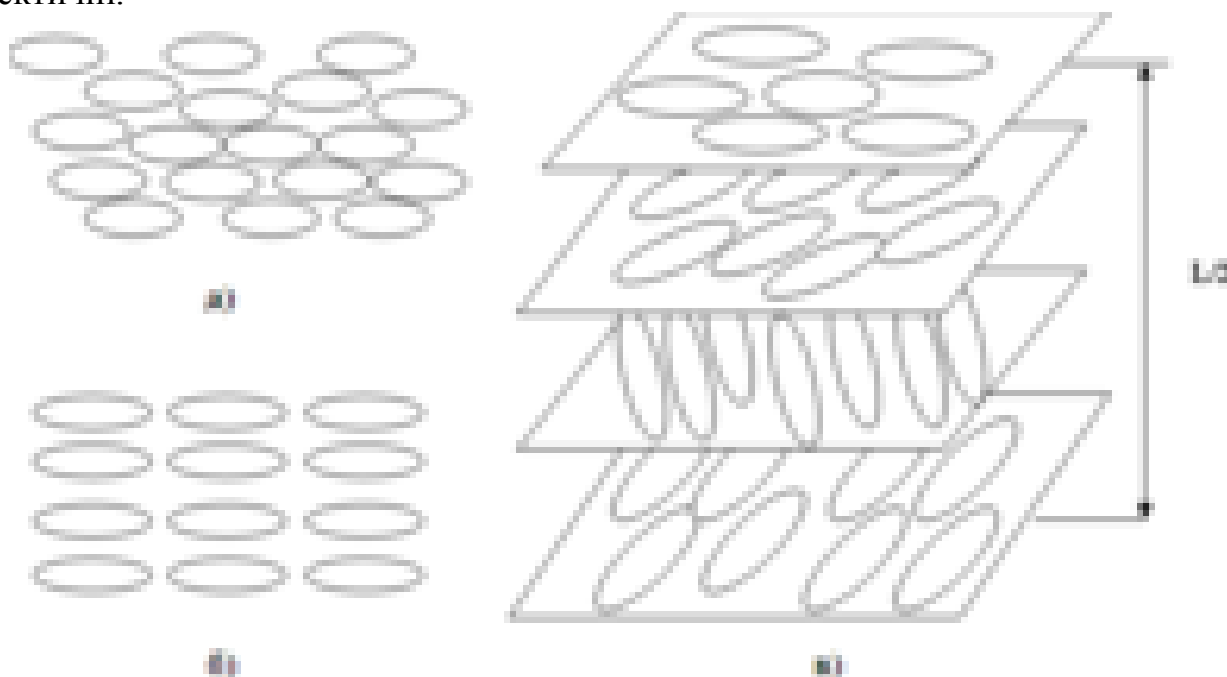


Рисунок 3.42 - Схематичне зображення будови рідких кристалів: а - нематичні; б – смектичні; в – холестеричні (L – крок спіралі)

В *нематичних* кристалах довгі осі молекул орієнтовані вздовж одного загального напрямлення, яке зветься нематичним директором (рисунок 3.42,а). Але центри важкості молекул розташовані безладно, так що взаємне ковзання молекул можливе тільки в напрямку нематичного директора.

В *смектичних* кристалах має місце шарова будова молекул (рисунок 3.42,б). Центри важкості молекул знаходяться у площинах, рівновіддалених одна

від одної. У кожному шарі молекули орієнтовані паралельно за рахунок пружної взаємодії. За рахунок великої в'язкості не мають поширеного використання.

В *холестеричних* кристалах орієнтація молекул в окремих шарах подібна нематичній, але кожний шар закручений навколо осі, перпендикулярній молекулярним шарам (рисунок 3.42,в). Тобто маємо гвинтову шарову структуру з кроком спіралі L біля 300 нм.

Крім того, рідкі кристали підрозділяються на термотропні та ліотропні.

Термотропні кристали мають мезоморфний стан в залежності від температури, тобто їх властивості перш за все залежать від зміни температури. Прикладом термотропного рідкого кристала є бензойнокислий холестерин (холестеричний кристал). Якщо такий кристал освітлити, то його поведінка подібна інтерференційному фільтру, тобто згідно умові Вульфа-Бреґу:

$$2L \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda_0, \quad (3.37)$$

де θ - кут падіння проміння;

L - період спіралі рідкого кристала;

λ_0 - довжина хвилі, яка відповідає умові Вульфа-Бреґу.

Якщо плоский шар такого кристала освітлювати білим світлом, то у відбитому світлі він буде кольоровим, до того ж колір буде змінюватися від кута спостереження. Оскільки крок спіралі L залежить від температури, то змінюється і λ_0 , тобто колір шару кристала. Такі рідкі кристали використовують, як термометри чи датчики температур. Такими кристалами можна вимірювати температури від -40 до 200 $^{\circ}\text{C}$, а температурний проміжок може бути від десятків до 0.01 $^{\circ}\text{C}$.

Ліотропні кристали мають мезоморфний стан в залежності від розчинення. Вони мають важливу властивість - амфіфільність, тобто мають дві частки - гідрофільну та ліофільну. Перша - розчиняється водою, а друга - жиром. Тобто розчинення водою змінює і орієнтацію молекул. Ліотропні рідкі кристали відіграють важливу роль життєдії живих організмів - кліткова мембрана, перш за все. У техніці вони використовуються для виготовлення поліароїдів.

Але найбільший практичний інтерес рідкі кристали здобули для керування індикаторів відображення.

Якщо ми маємо великий об'єм рідкого кристала, то він завжди буде мутним, тому що він розіб'ється на невеликі ділянки - домени. Тому для практичного використання треба мати тонкі однорідне орієнтовані шари. При цьому розподіляють гомогенну (горизонтальну) та гомеотропну (вертикальну) орієнтацію молекул відносно скляних підкладок. Потрібна орієнтація молекул досягається спеціальною обробкою поверхні скла або додатком поверхнево-активних речовин у мезофазу.

По електричним властивостям нематичні рідкі кристали відносять до полярних діелектриків з відносно невеликим питомим опором (10^6 - 10^{10} Ом·м). В молекулі нематика можливі два напрямлення дипольного моменту; вздовж довгої осі молекули та перпендикулярно їй. Рідкі кристали, в яких дипольний момент має напрямлення вздовж довгої осі, в електричному полі орієнтуються вздовж силових ліній поля, їх діелектрична проникність вздовж директора $\epsilon_{\parallel}$ більша ніж уперек $\epsilon_{\perp}$. Такі кристали мають позитивну діелектричну анізотропію ($\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} > 0$). У

кристалах з негативною анізотропією ($\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp} < 0$) дипольний момент перпендикулярний молекулі. Тому в електричному полі вони витягуються довгою віссю уперек силовим лініям поля. Тобто для нематиків з негативною діелектричною анізотропією характерна гомогенна орієнтація, а для позитивних - гомеотропна орієнтація.

Такі властивості нематичних кристалів використовують для керування світловим потоком, використовуючи електрооптичні комірки (рисунок 3.43).

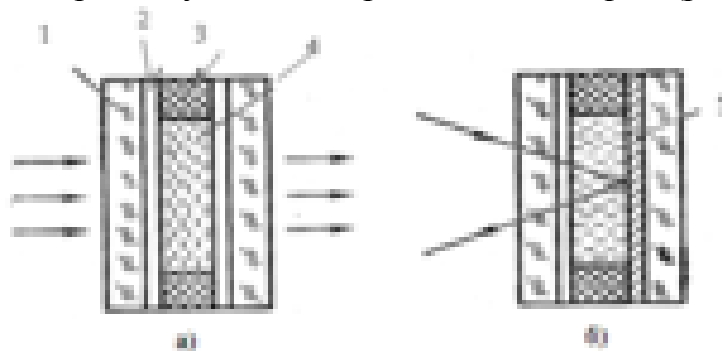


Рисунок 3.43 - Електрооптичні комірки на рідких кристалах: а – праця на просвіт (гомогенна орієнтація); б – праця на відбиття (гомеотропна орієнтація молекул) 1 – скляні підкладки; 2 – прозорі електроди ($\text{SnO}_2\text{:Sb}$); діелектричні прошарки; 4 – рідкі кристали; 5 – непрозорий електрод (Al)

Між скляними пластинами, які розділені діелектричними прошарками, знаходиться шар рідкого кристалу товщиною 5-30 мкм. На внутрішній поверхні скла нанесено прозорі електроди. Комірки можуть працювати як на просвіт, так і на відбиток. В останньому випадку один з електродів роблять непрозорим.

Для будови приладів відображення інформації на рідких кристалах використовують ефект динамічного розсіювання, “твіст ефект”, та ефект “гість хазяїн”.

Ефект динамічного розсіювання має місце тільки в рідких кристалах з негативною діелектричною анізотропією. При відсутності електричного поля вихідний стан - гомеотропна орієнтація молекул (рисунок 3.43,б). Тоді, згідно внутрішнього порядку, така комірка прозора для падаючого світла. Під впливом зовнішнього поля виникає поворот диполів та орієнтація змінюється на гомогенну. Одночасно сильне електричне поле генерує потік іонів, який порушує статичний порядок в розташуванні молекул, що приводить до виникнення турбулентності в мезофазі, тобто виникають центри розсіювання та комірка стає непрозорою. Ефект динамічного розсіювання має місце як на постійному, так і змінному полі (до 10^2 - 10^4 Гц). В постійному полі мають місце процеси електролізу, а в змінному вони значною мірою слабші.

Ефект динамічного розсіювання використовують як оптичні затвори (штори, жалюзі, світові сигнальні пристрої). Недоліком цього ефекту є великі керуючі напруги.

“Твіст”-ефект використовують для рідких нематичних кристалів з позитивною анізотропією властивостей та холестеричних рідких кристалів. Відповідною обробкою скла досягають гомогенної орієнтації молекул з закрученням структури по азимуту на 90° (рисунок 3.44). Внаслідок цього шар рідкого кристала має можливість повертати площину поляризації вхідного світла на чверть обороту.

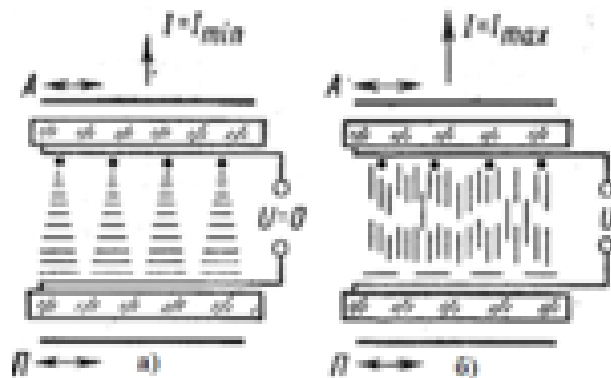


Рисунок 3.44 - Схема «твіст»-ефекту в нематичних рідких кристалах:

а – вихідний стан ($U=0$); б – збуджений стан ($U>U_{\text{пор}}$)

А та П – поляроїди з перехрещеним напрямом поляризації

Коли електричне поле не прикладене, то світ, падаючи на верхній поляроїд стає поляризованим. При проходженні крізь рідкий кристал поляризоване світло змінює своє напрямлення згідно оптичній осі нематика і на виході має таке ж напрямлення, як і нижній поляроїд, проходячи без втрат через останній, він відбивається від дзеркала і йде назад. При накладанні зовнішнього поля більше деякого межового значення, за рахунок позитивної діелектричної анізотропії орієнтація стає гомеотропною. Тоді для світла, яке пройшло через рідкий кристал, матимемо схрещені поляроїди, тобто поле стане темним. Тому можна малювати темні фігури на фоні кольору рідкого кристала (сіро-зеленому). “Твіст”-ефект використовують для індикаторів наручних годинників, екранів телевізорів (рисунок 3.45) та ін.

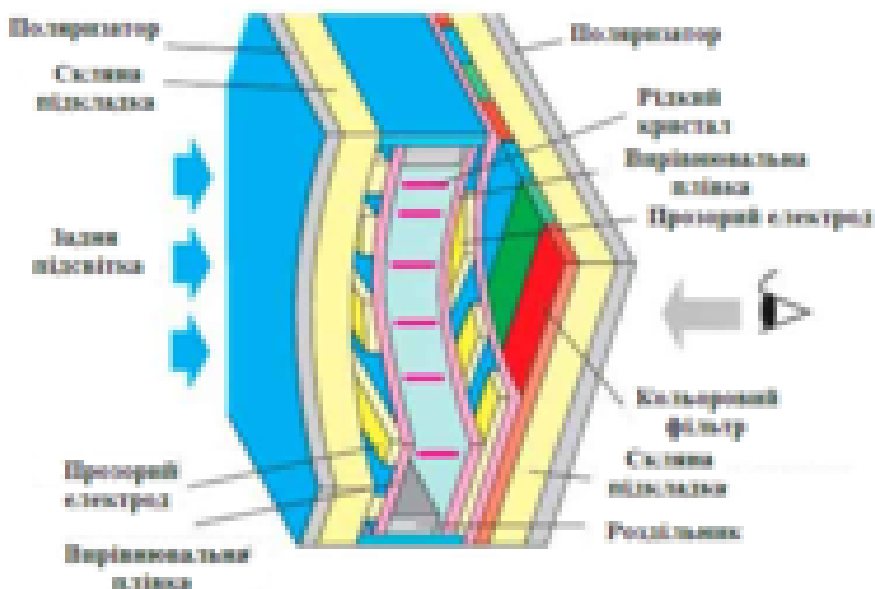


Рисунок 3.45 - Екран на рідких кристалах

Ефект “гість-хазяїн” використовують для кольорових зображень. Для цього в рідкі кристали домішують молекули фарби, які мають східну до молекул рідкого кристала форму і орієнтуються паралельно молекулам мезофази за рахунок пружної взаємодії. Спектр поглинання таких молекул є функцією їх орієнтації відносно напрямлення поляризації падаючого світла. Поглинання максимальне, коли довгі осі

молекул паралельні коливанням електричного вектора світлової хвилі. Таким чином будують кольорові зображення. Рідкі кристали використовують як датчики температури, ІЧ-випромінювання, вимірювання температурних полів, як індикаторні пристрої. Основні переваги такі: добрий контраст при яскравому освітлюванні, низька потужність, малі напруги, простота виготовлення, низька вартість. Недоліки - невелика швидкодія та наявність електро- та фотохімічного старіння.

Контрольні питання до підрозділу 3.6.

1. Що таке сегнетоелектрики?
2. Пояснить виникнення самодовільної поляризації у сегнетоелектриках.
3. Назвіть галузі використання сегнетоелектриків.
4. Які п'єзоефекти використовуються у техніці? В яких галузях?
5. Що таке електрети?
6. Як використовують піроелектрики?
7. Що таке рідкі кристали?
8. Як класифікують рідкі кристали?
9. Які оптичні ефекти використовують у індикаторах, світлових фільтрах, індикаторах кольорових зображень на рідких кристалах?
10. Що таке дипольні і йонні сегнетоелектрики? Які з них використовують в техніці?

3.7. ЗАСТОСУВАННЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.7.1. Загальні відомості

Всі діелектричні матеріали можна розділити на групи, використовуючи різні принципи. Наприклад, розділити на неорганічні і органічні матеріали.

Неорганічні діелектрики: скла, слюда, кераміка, неорганічні плівки (оксиди, нітриди, флуориди), металофосфати, електроізоляційний бетон. Особливості неорганічних діелектриків - негорючі, як правило, стійкі до дії світла, озону, температури, мають складну технологію виготовлення. Старіння на змінній напрузі практично відсутнє, схильні до старіння на постійній напрузі.

Органічні діелектрики: полімери, віск, лаки, гуми, паперу, лакотканини. Особливості органічних діелектриків - горючі (в основному), мають малу стійкість до атмосферних і експлуатаційних впливів, мають (в основному) просту технологію виготовлення, як правило, дешевші в порівнянні з неорганічними діелектриками. Старіння на постійній напрузі практично відсутнє, на змінній напрузі старіють за рахунок часткових розрядів, дендритів і водних деревовидних пробойів.

Застосування в енергетиці:

- ізоляція ліній і підстанцій - це фарфор, скло та кремнійорганічна гума в підвісних ізоляторах ПЛ, фарфор в опорних і прохідних ізоляторах, склопластики в якості несучих елементів, поліетилен, папір в високовольтних вводах, папір, полімери в силових кабелях;

- ізоляція електричних приладів - папір, гетинакс, склотекстоліт, полімери, слюдяні матеріали;
- машин, апаратів - папір, картон, лаки, компаунди, полімери;
- конденсатори різних видів-полімерні плівки, папір, оксиди, нітриди.

З практичної точки зору в кожному випадку вибору матеріалу електричної ізоляції слід аналізувати умови роботи і вибирати матеріал ізоляції відповідно до комплексом вимог. Для орієнтування доцільно розділити основні діелектричні матеріали на групи за умовами застосування.

1. Електрична ізоляція стійка до нагріву. Це в першу чергу вироби з слюдяних матеріалів, деякі з яких здатні працювати до температури 700°C . Скло та матеріали на їх основі (склотканини, склослюдиніти). Органосілікатні і металофосфатні покриття. Керамічні матеріали, зокрема нітрид бору. Композиції з кремнійорганіки з термостійкими з'єднаннями. З полімерів високу нагрівостійкість мають полііміди, фторопласт.

2. Вологостійка електрична ізоляція. Ці матеріали повинні бути гідрофобні (незмочування водою) і негігроскопічні. Яскравим представником цього класу є фторопласт. В принципі можлива гідрофобізація шляхом створення захисних покриттів.

3. Ізоляція стійка до радіації. Це, в першу чергу, неорганічні плівки, кераміка, склотекстоліт, слюдинітові матеріали, деякі види полімерів (полііміди, поліетилен).

4. Ізоляція стійка до тропічних умов. Матеріал повинен бути гідрофобним, щоб працювати в умовах високої вологості і температури. Крім того, він повинен бути стійким проти цвілевих грибків. Кращі матеріали: фторопласт, деякі інші полімери, гірші - папір, картон.

5. Морозостійка ізоляція. Ця вимога характерно, в основному для гум, тому що при зниженні температури все гуми втрачають еластичність. Найбільш морозостійка кремнійорганічна гума з фенільними групами (до -90°C).

6. Ізоляція для роботи у вакуумі (космос, вакуумні прилади). Для цих умов необхідно використовувати вакуумно-щільні матеріали. Придатні деякі, спеціально приготовлені керамічні матеріали, полімери малопридатні.

3.7.2. Конденсатори

Конденсатор - двополюсник з постійним або змінним значенням ємності і малою провідністю; пристрій для накопичення заряду і енергії електричного поля.

Конденсатором називають елемент електричного кола, призначений для використання його ємності. Конденсатор є системою з двох електродів (обкладань), розділених діелектриком, і має здатність накопичувати електричну енергію.

Прикладена змінна напруга до конденсатора відстає від змінного струму, що протікає в ній, на кут зрушення фаз рівний 90° .

Конденсатор є пасивним електронним компонентом. У найпростішому варіанті конструкція складається з двох електродів у формі пластин (званих обкладинками), розділених діелектриком, товщина якого мала в порівнянні з розмірами обкладинок (рисунок 3.46).

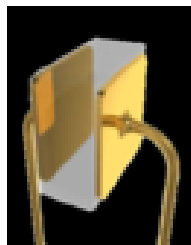


Рисунок 3.46 - Конструкція простішого конденсатора

На практиці конденсатори мають багато шарів діелектрика і багатошарові електроди, або стрічки чергуються діелектрика і електродів, згорнуті в циліндр або паралелепіпед з округленими чотирма ребрами (через намотування). Ємність конденсатора вимірюється в фарадах.

3.7.2.1. Класифікація конденсаторів

Конденсатори класифікуються за наступними ознаками:

1. *Залежно від характеру зміни ємності* конденсатори підрозділяються на постійні (ємність фіксована), змінні (ємність може змінюватися в будь-який час в певних межах багаторазово), підстроювальні (ємність може змінюватися в будь-який час в обмежених межах і обмежене число разів), термоконденсатори (ємність змінюється під впливом тепла), варіконди (ємність залежить від прикладеної напруги).
2. *Залежно від призначення* конденсатори підрозділяються на конденсатори загального призначення (діапазон ємності від 10 пФ до 10 000 мкФ, робоча напруга до 1000 В, допустиме відхилення від номінального від $\pm 5\%$ до $\pm 30\%$, високочастотні (мають малу індуктивність виводів), високовольтні (робоча напруга від 1 кВ до 50 кВ), імпульсні (призначені для роботи в імпульсних ланцюгах), пускові (що допускають роботу при великих короткочасних струмах) і так далі
3. *Залежно від засобу захисту від зовнішніх чинників* конденсатори розділяються на неізольовані (які не допускають зіткнення з корпусом), ізольовані (які допускають зіткнення з корпусом), герметизовані (мають герметичну конструкцію корпусу, незахищені (не мають захисного корпусу), захищені (мають захисний корпус), ущільнені (мають ущільнену органічними речовинами конструкцію корпусу).
4. *За матеріалом використовуваного діелектрика* конденсатори розділяються на конденсатори з органічним, неорганічним, газоподібним і оксидним діелектриками.
5. *За способом монтажу* конденсатори підрозділяються на конденсатори поверхневого та об'ємного монтажу (рисунки 3.47-3.49)



Рисунок 3.47 - Зліва конденсатори поверхневого монтажу, справа – об'ємного монтажу

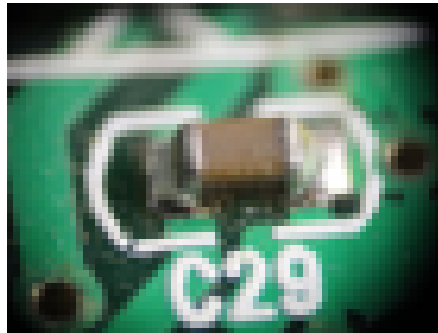


Рисунок 3.48 - SMD-конденсатор на платі



Рис. 3.49 - Різні конденсатори об'ємного монтажу

3.7.2.2 Параметри постійних конденсаторів

- **Ємність.** Основною характеристикою конденсатора є його ємність, що характеризує здатність конденсатора накопичувати електричний заряд. В позначенні конденсатора фігурує значення номінальної ємності, в той час як реальна ємність може значно змінюватися в залежності від багатьох факторів. Реальна ємність конденсатора визначає його електричні властивості.

Так, за визначенням ємності, заряд на обкладанні пропорційний напрузі між обкладинками ($q = CU$).

Типові значення ємності конденсаторів складають від одиниць пикофарад до тисяч мікрофарад. Однак існують конденсатори (іоністори) з ємністю до десятків фарад.

Ємність плоского конденсатора, що складається з двох паралельних металевих пластин площею S кожна, розташованих на відстані d одна від одної, в системі СІ виражається формулою $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$, де ϵ - діелектрична проникність середовища, що заповнює простір між пластинами (в вакуумі дорівнює одиниці), ϵ_0 - електрична постійна, чисельно рівна $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф / м. Ця формула справедлива, лише коли d набагато менше лінійних розмірів пластин. Для отримання великих ємностей конденсатори з'єднують паралельно.

При цьому напруга між обкладинками всіх конденсаторів однакова. Загальна ємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі ємностей всіх конденсаторів, що входять в батарею. $C = \sum_{i=1}^N C_i$ або $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$. Якщо у всіх паралельно з'єднаних конденсаторів відстань між обкладинками та властивості діелектрика однакові, то ці конденсатори можна уявити як один великий конденсатор, розділений на фрагменти меншої площі.

При послідовному з'єднанні конденсаторів заряди усіх конденсаторів однакові, так як від джерела живлення вони надходять тільки на зовнішні електроди, а на внутрішніх електродах вони виходять тільки за рахунок поділу зарядів, раніше нейтралізувати один одного. Загальна ємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює $C = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}}$ або $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$. Ця ємність завжди

менша за мінімальну ємність конденсатора, що входить в батарею.

Однак при послідовному з'єднанні зменшується можливість пробою конденсаторів, так як на кожен конденсатор доводиться лише частина різниці потенціалів джерела напруги.

Якщо площа обкладинок всіх конденсаторів, з'єднаних послідовно, однакова, то ці конденсатори можна представити у вигляді одного великого конденсатора, між обкладинками якого знаходиться стопка з пластин діелектрика всіх складових його конденсаторів.

- **Номінальне значення ємності**, яке обов'язково вказується на корпусі конденсатора. Згідно ГОСТ 2825-67 конденсаторів мають шість рядів номінальної ємності: Е3, Е6, Е12, Е24, Е48, Е96. Числа вказують кількість номінальних значень в кожній декаді. Так ряд Е6 має 6 значень ємності в межах декади: 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; а ряд Е12 - 12 значень ємності в межах декади: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2.
- **Питома ємність**. Конденсатори також характеризуються питомою ємністю - відношенням ємності до обсягу (або масі) діелектрика. Максимальне значення питомої ємності досягається при мінімальній товщині діелектрика, однак при цьому зменшується його напруга пробою.
- **Допуск** - максимально допустиме відхилення номінальної ємності в %. Згодне ГОСТ 9661-73 допуск для конденсаторів до 10 пФ вказується в пікофарадах, а для конденсаторів з ємністю більше 10 пФ у відсотках. Ряд допусків для конденсаторів і їх кодовані позначення приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Нормоване відхилення ємності від номінального значення і номінальна напруга постійних конденсаторів, а також їх кодовані позначення

Допуск, %	Кодоване позначення		Номінальна напруга, В	Кодоване позначення	
	Латиниця	Кирилиця		Латиниця	Кирилиця
1	2	3	4	5	6
±0,001	E	-	1,0	I	-
±0,002	L	-	1,6	P	-
±0,005	R	-	2,5	M	-
±0,01	P	-	3,2	A	-
±0,02	U	-	4,0	C	-
±0,05	X	-	6,3	B	-
±0,1	B	Ж	10	D	-
±0,25	C	У	16	E	-
±0,5	D	Д	20	F	-
±1	F	Р	25	G	-
±2	G	Л	32	H	-
±5	J	И	40	S	-
±10	K	С	50	J	-
±20	M	В	63	K	-
±30	N	Ф	80	L	-
-- 10.+30	Q	-	100	N	-
-- 10.+50	T	Э	125	P	-
-- 10.+100	Y	Ю	160	Q	-
-- 20.+50	S	Б	200	Z	-
-- 20.+80	Z	А	250	W	-
+100	-	Я	315	X	-
Допуск, пФ	Кодоване позначення				
	Латиниця	Кирилиця			
±0,1	B		350	T	
±0,25	C		400	Y	
±0,5	D		450	U	
±1	F		500	V	

- Опір ізоляції** - це опір конденсатора постійному струму, яке визначається співвідношенням $R_d = U / I_{\text{вит}}$, де U - напруга, прикладена до конденсатора, $I_{\text{вит}}$ - струм витоку. Через струм витоку, що протікає через шар діелектрика між обкладинками та по поверхні діелектрика, попередньо заряджений конденсатор з плином часу втрачає заряд (саморозряд конденсатора). Часто, в специфікаціях на конденсатори, опір витоку визначають через постійну часу T саморозряду конденсатора, яка чисельно дорівнює добутку ємності на опір витоку: $T = R_d / C_0$. T - це час, за який початкова напруга на конденсаторі, не підключеного до зовнішнього кола зменшиться в e раз. Добрі конденсатори з полімерними і керамічними діелектриками мають постійні часу саморозряду, що досягають багатьох сотень тисяч годин.
- Еквівалентний послідовний опір - R_s** . Еквівалентний послідовний опір (ЕПО (англ. ESR), внутрішній опір) обумовлений, головним чином, електричним опором матеріалу обкладинок і виводів конденсатора і контакту (-ів) між ними, а також враховує втрати в діелектрику. Зазвичай ЕПО зростає зі збільшенням

частоти струму, що протікає через конденсатор, внаслідок поверхневого ефекту. В більшості практичних випадків цим параметром можна знехтувати, але, іноді (напр., в разі використання електролітичних конденсаторів у фільтрах імпульсних блоків живлення), досить мале його значення суттєво для надійності і стійкості роботи пристрою. В електролітичних конденсаторах, де один з електродів є електролітом, цей параметр при експлуатації з часом деградує, внаслідок випаровування розчинника з рідкого електроліту і зміни його хімічного складу, викликаного взаємодією з металевими обкладинками, що відбувається відносно швидко в низькоякісних виробках. Деякі схеми (наприклад, стабілізатори напруги) критичні до діапазону зміни ЕПО конденсаторів в своїх колах. Це пов'язано з тим, що при проектуванні таких пристроїв інженери враховують цей параметр в фазочастотній характеристиці (ФЧХ) зворотного зв'язку стабілізатора. Істотна зміна з часом ЕПО застосованих конденсаторів змінює ФЧХ, що може привести до зниження запасу стійкості контурів авторегулювання, і, навіть, до самозбудження. Існують спеціальні прилади (ESR-метр (англ.)) Для вимірювання цього досить важливого параметра конденсатора, за яким можна часто визначити придатність його подальшому використанні в певних цілях. Цей параметр, крім власне ємності (ємність - це основний параметр) - часто має вирішальне значення в дослідженні стану старого конденсатора і прийняття рішення, чи варто використовувати його в певній схемі, або він прогнозовано вийде за межі допустимих відхилень.

- **Еквівалентна послідовна індуктивність** - L_i . Еквівалентна послідовна індуктивність обумовлена, в основному, власної індуктивністю обкладинок і виводів конденсатора. Результатом цієї розподіленої паразитної індуктивності є перетворення конденсатора в коливальний контур з характерною власною частотою резонансу. Ця частота може бути виміряна і зазвичай вказується в параметрах конденсатора або в явному вигляді або у вигляді рекомендованої максимальної робочої частоти.
- **Тангенс кута діелектричних втрат**. Тангенс кута діелектричних втрат - відношення уявної і дійсної частини комплексної діелектричної проникності. $tg\delta = \varepsilon_{im} / \varepsilon_{re} = \sigma / \omega\varepsilon_a$. Втрати енергії в конденсаторі визначаються втратами в діелектрику і обкладинках. При протіканні змінного струму через конденсатор вектори напруги і струму зрушені на кут $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$, де δ - кут діелектричних втрат. При відсутності втрат $\delta = 0$. Тангенс кута втрат визначається відношенням активної потужності P_a до реактивної P_r при синусоїдальній напрузі певної частоти. Величина, зворотна $tg\delta$, називається добротністю конденсатора. Терміни добротності і тангенса кута втрат застосовуються також для котушок індуктивності і трансформаторів.
- **Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)**. ТКЄ - відносна зміна ємності при зміні температури навколишнього середовища на один градус Цельсія (Кельвіна). ТКЄ визначається так: $TK\epsilon = \Delta C / C\Delta T$, де ΔC - зміна ємності, викликана зміною температури на ΔT . Таким чином, зміна ємності від температури (при не дуже великі зміни температури) виражається лінійною функцією: $C(T) = C_{H.Y.} + TK\epsilon C_{H.Y.} \Delta T$, де ΔT - зміна температури в °C або K відносно

нормальних умов, при яких специфіковане значення ємності $C_{н.у.}$ - ємність при нормальних умовах. ТКЄ застосовується для характеристики конденсаторів з практично лінійною залежністю ємності від температури. Однак ТКЄ вказується в специфікаціях не для всіх типів конденсаторів. Для конденсаторів, що мають істотно нелінійну залежність ємності від температури і для конденсаторів з великими змінами ємності від впливу температури навколишнього середовища в специфікаціях нормуються відносна зміна ємності в робочому діапазоні температур або у вигляді графіка залежності ємності від температури. Характеристика і маркування конденсаторів приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Характеристики температурної стабільності ємності постійних конденсаторів з лінійною залежністю ємності від температури

Позначення ТКЄ	Номинальне значення ТКЄ ($10^{-6}, K^{-1}$)	Колірний код (смужка або точка). В якості другого кольору може використовуватися колір корпусу	Буквене кодування
П100	+ 100	Червоний + фіолетовий	A
П60	+ 33	-	G
П33	+ 33	Сірий	N
МП10	0	Чорний	C
М33	- 33	Коричневий	H
М47	- 47	Блакитний + червоний	M
М75	- 75	Червоний	L
М150	- 150	Помаранчевий	P
М220	- 220	Жовтий	R
М330	- 330	Зелений	S
М470	- 470	Блакитний	T
М750	- 750	Фіолетовий	U
М1500	- 1500	Помаранчевий + помаранчевий	V
М2200	- 2200	Жовтий + помаранчевий	K
М3300	- 3300	-	Y

Якщо залежність ємності від температури нелінійна, то температурну стабільність таких конденсаторів характеризують відносною зміною ємності при переході від кімнатної температури ($20^{\circ}C$) до граничних значень робочої температури.

Характеристика і маркування таких конденсаторів приведена в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Характеристики температурної стабільності ємності постійних конденсаторів з нелінійною залежністю ємності від температури

Позначення групи ТКЄ	Допустима зміна ємності в % у інтервалі температур від -60 до $+85^{\circ}C$	Колірний код (смужка або точка). В якості другого кольору може використовуватися колір корпусу	Буквене кодування
H10	± 10	Помаранчевий + чорний	B
H20	± 20	Помаранчевий + червоний	Z
H30	± 30	Помаранчевий + зелений	D
H50	± 50	Помаранчевий + блакитний	X
H70	± 70	Помаранчевий + фіолетовий	E
H90	± 90	Помаранчевий + білий	F

- **Діелектрична абсорбція.** Якщо заряджений конденсатор швидко розрядити до нульової напруги шляхом підключення низькоомного навантаження, а потім зняти навантаження і спостерігати за напругою на виводах конденсатора, то ми побачимо, що напруга на обкладинках знову з'явиться як якби ми розрядили конденсатор не до нуля. Це явище отримало назву діелектрична абсорбція (діелектричне поглинання). Конденсатор поводить себе так, немов паралельно йому підключено безліч послідовних RC-ланцюжків з різною постійною часу. Інтенсивність прояву цього ефекту залежить в основному від властивостей діелектрика конденсатора. Подібний ефект можна спостерігати практично на всіх типах діелектриків. В електролітичних конденсаторах він особливо яскравий і є наслідком хімічних реакцій між електролітом і обкладинками. У конденсаторів з твердим діелектриком (наприклад, керамічних і слюдяних) ефект пов'язаний з залишковою поляризацією діелектрика. Найменшим діелектричним поглинанням володіють конденсатори з неполярними діелектриками: тефлон (фторопласт), полістирол, поліпропілен і т. п. Ефект залежить від часу зарядки конденсатора, часу закоротки, іноді від температури. Кількісне значення абсорбції прийнято характеризувати коефіцієнтом абсорбції, який визначається в стандартних умовах. Особу увагу в зв'язку з ефектом слід приділяти вимірювальним колам постійного струму: прецизійним інтегруючим підсилювачам, пристроїв вибірки-зберігання, деяким схемам на конденсаторах, що перемикаються.
- **Паразитний п'єзоефект.** Багато керамічних матеріалів, що використовуються в якості діелектрика в конденсаторах (наприклад, титанат барію, що володіє дуже високою діелектричною проникністю в не дуже сильних електричних полях) виявляють п'єзоефект - здатність генерувати напругу на обкладинках при механічних деформаціях. Це характерно для конденсаторів з п'єзоелектричними діелектриками. П'єзоефект веде до виникнення електричних перешкод, в пристроях, де використані такі конденсатори при впливі акустичного шуму або вібрації на конденсатор. Це небажане явище іноді називають «мікрофонний ефект». Також подібні діелектрики виявляють і зворотний п'єзоефект - при роботі в колі змінної напруги відбувається знакозмінна деформація діелектрика, яка генерує акустичні коливання, які породжують додаткові електричні втрати в конденсаторі.
- **Самовідновлення.** Конденсатори з металізованим електродом (паперовий і плівковий діелектрик) володіють важливою властивістю самовідновлення (електричної міцності після пробою діелектрика. Механізм самовідновлення полягає в вигорянні металізації електрода після локального пробою діелектрика за допомогою мікродугового електричного розряду.
- **Щільність енергії.** Щільність енергії електролітичного конденсатора залежить від конструктивного виконання. Максимальна щільність досягається у великих конденсаторів, де маса корпусу невелика в порівнянні з масою обкладинок і електроліту. Наприклад, у конденсатора EPCOS B4345 з ємністю 12 000 мкФ, максимально допустимою напругою 450 В і масою 1,9 кг щільність енергії при максимальній напрузі становить 639 Дж / кг або 845 Дж / л. Особливо важливий цей параметр при використанні конденсатора в якості накопичувача енергії, з подальшим миттєвим її вивільненням, наприклад, в гарматі Гауса.

- **Номінальна напруга.** Іншою не менш важливою характеристикою конденсаторів є номінальна напруга - значення напруги, позначене на конденсаторі, при якому він може працювати в заданих умовах протягом терміну служби зі збереженням параметрів в допустимих межах. Номінальна напруга залежить від конструкції конденсатора і властивостей застосовуваних матеріалів. Експлуатаційна напруга на конденсаторі має бути не вище номінальної. Це значення напруги, позначене на конденсаторі при якому він може працювати в заданих умовах в течії терміну служби із збереженням параметрів в допустимих межах. Значення ряду номінальної напруги встановлені ГОСТ 9665-77 і приведені в таблиці 3.3.
- **Полярність.** Багато конденсаторів з оксидним діелектриком (електролітичні) функціонують тільки при коректній полярності напруги через хімічні особливості взаємодії електроліту з діелектриком. При зворотній полярності напруги електролітичні конденсатори зазвичай виходять з ладу через хімічне руйнування діелектрика з подальшим збільшенням струму, скипанням електроліту всередині і, як наслідок, з імовірністю вибуху корпусу.
- **Небезпека руйнування (вибуху).** Вибухи електролітичних конденсаторів - досить поширене явище. Основною причиною вибухів є перегрів конденсатора, що викликається в більшості випадків витоком або підвищенням еквівалентного послідовного опору внаслідок старіння (актуально для імпульсних пристроїв). У сучасних комп'ютерах перегрів конденсаторів часто причина виходу їх з ладу внаслідок близького розташування з джерелами тепла, наприклад, поруч з радіатором охолодження. Для зменшення пошкоджень інших деталей і травматизму персоналу в сучасних конденсаторах великої ємності встановлюють запобіжний клапан або виконують надсічку корпусу (часто її можна помітити у вигляді хреста або в формі букв Х, К або Т на торці циліндричного корпусу, іноді, на великих конденсаторах, вона покрита пластиком) (рисунок 3.50).



Рисунок 3.50 - Конденсатори з надсічкою корпусу (у великих конденсаторів спостерігається здуття корпусу)

При підвищенні внутрішнього тиску вибивається пробка клапана або корпус руйнується по насічці, пари електроліту виходять у вигляді їдкого газу і, навіть, бризок рідини. При цьому руйнування корпусу конденсатора відбувається без вибуху, розкидання обкладинок і сепаратору (рисунок 3.51).

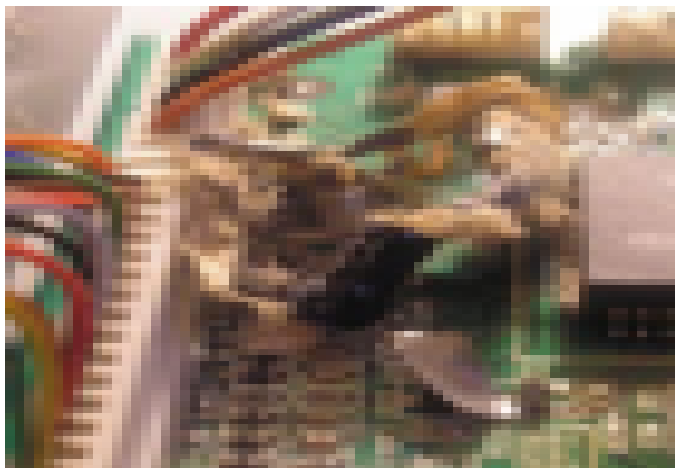


Рисунок 3.51 - Вибухливий електролітичний конденсатор

Видно волокна паперового сепаратора обкладинок і розвернулися фольгові алюмінієві обкладинки. Старі електролітичні конденсатори випускалися в герметичних корпусах і в конструкції їх корпусів не передбачалася вибухонебезпечність. Швидкість розльоту осколків при вибуху корпусу застарілих конденсаторів може бути достатньою для того, щоб травмувати людину. В відміну від електролітичних, вибухонебезпечність оксидних напівпровідникових (танталових) конденсаторів пов'язана з тим, що такий конденсатор фактично являє собою вибухову суміш: як пальне служить тантал, а в як окиснювач - двоокис марганцю, і обидва цих компонента в конструкції конденсатора перемішані у вигляді тонкого порошку. При пробі конденсатора або при його випадковому переполюсованні виділилося при протіканні струму тепло ініціює реакцію між даними компонентами, що протікає у вигляді сильного спалаху з бавовною, що супроводжується розкиданням іскор і осколків корпусу. Сила такого вибуху досить велика, особливо у великих конденсаторів, і здатна зашкодити не тільки сусідні радіоелементи, а й плату. При тісному розташуванні декількох конденсаторів можливий пропал корпусів сусідніх конденсаторів, що призводить до одночасного вибуху всієї групи.

Паразитні параметри. Реальні конденсатори, крім ємності, мають також власними послідовним і паралельним опором і індуктивністю. З достатньою для практики точністю, еквівалентну схему реального конденсатора можна уявити як показано на рисунку 3.52, де все двополюсники маються на увазі ідеальними.

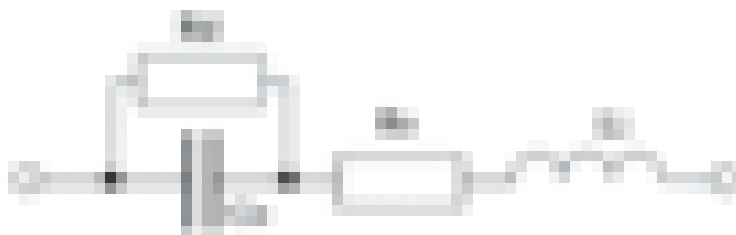


Рисунок 3.52 - Еквівалентна схема реального конденсатора

C_0 - власна ємність конденсатора; R_d - опір ізоляції конденсатора; R_s - еквівалентний послідовний опір; L_i - еквівалентна послідовна індуктивність

3.7.3.3. Зображення конденсаторів на принципових схемах

Зображення конденсаторів на принципових схемах приведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Зображення конденсаторів на принципових схемах

Найменування групи	Опис	Означення
Конденсатори постійної ємності	Конденсатор постійної ємності неполярний	
	Конденсатор постійної ємності полярний	
Конденсатори змінної ємності	Змінний конденсатор	
	Підлаштувальний конденсатор	
Нелінійний конденсатор	Варикап	

3.7.2.3. Система умовних позначень конденсаторів

Позначення конденсаторів, згідно ГОСТ 11076-64 та ОСТ 11.074.008-78, містить три елементи.

Перший елемент (одна або дві букви) означає підклас конденсатора :

К – постійна ємність;

КТ – підстроювальний;

КП - змінний;

КН – нелінійний;

КС – конденсаторна збірка.

Другий елемент – число, яке означає тип діелектрика.

Третій елемент – це порядковий номер розробки.

Повне умовне позначення конденсатора має вигляд:

К75–10 – 250 В – 0,47 мкФ (5 % – В ТУ.

Це означає: конденсатор постійної ємності з комбінованою ізоляцією з порядковим номером розробки 10 на номінальну напругу 250 В, номінальну ємність 0,47 мкФ, допуском $\pm 5 \%$, виконання для усіх кліматів, який поставляється згідно ТУ.

Умовні цифрові позначення груп конденсаторів наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3. 7 - Умовне позначення груп конденсаторів

Підклас конденсаторів	Група конденсаторів	Позначення групи
Постійна ємність	Керамічні з напругою нижче 1600 В	10
	Керамічні з напругою більше 1600 В	15
	Скляні	21
	Тонкоплівкові	26
	Слюдяні	31
	Паперові з напругою нижче 2000 В	40
	Паперові металізовані	42
	Оксидно-алюмінієві	50
	Оксидно-танталові	51
	Об'ємнопористі	52
	Оксидно-напівпровідникові	53
	Іоністори	58
	Повітряні	60
	Полістирольні	71
	Фторопластові	72
	Поліетілентерефталатні	73
	Комбіновані	75
	Полікарбонатні	77
	Поліпропіленові	78

На корпус постійного конденсатора виноситься у вигляді маркування тип конденсатора, кодоване позначення номінального значення ємності, допуск, група ТКЕ і дата виготовлення. Із-за малих габаритних розмірів не усі вказані параметри можуть знаходитися в маркуванні конденсатора.

Кодоване позначення номінальної ємності складається з цифр (від 2 до 4) і букви, яка означає множник і положення десяткової точки.

Наприклад:

n15 - 0,15 нФ=150 пФ;

1500 n - 1500 нФ;

2μ2 - 2,2 мкФ.

Букви p, n, m або μ, відповідно означають множники пікофаради, нанофаради і мікрофаради.

1. Маркування трьома цифрами

У цьому випадку перші дві цифри визначають мантису, а остання - показник ступеня за основою 10, для отримання номіналу в пікофарадах.

Остання цифра "9" позначає показник ступеня "-1".

Якщо перша цифра "0", то ємність менше 1пФ (010 = 0,1 пФ).

Таблиця 3.8 - Маркування трьома цифрами

	Код	109	159	229	339	479	689	
Пікофаради, пФ		1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
Нанофаради, нФ								
Мікрофаради, мкФ								
	Код	100	150	220	330	470	80	
Пікофаради, пФ		10	15	22	33	47	68	
Нанофаради, нФ		0,01	0,015	0,022	0,033	0,047	0,068	
Мікрофаради, мкФ								
	Код	101	151	221	331	471	681	
Пікофаради, пФ		100	150	220	330	470	680	
Нанофаради, нФ		0,1	0,15	0,22	0,33	0,47	0,68	
Мікрофаради, мкФ								
	Код	102	152	222	332	472	682	
Пікофаради, пФ		1000	1500	2200	3300	4700	6800	
Нанофаради, нФ		1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
Мікрофаради, мкФ								
	Код	103	153	223	333	473	683	
Пікофаради, пФ		$1,010^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$	
Нанофаради, нФ		10	15	22	33	47	68	
Мікрофаради, мкФ		0,01	0,015	0,022	0,033	0,047	0,068	
	Код	104	154	224	334	474	684	105
Пікофаради, пФ		$1,010^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$	$4,7 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
Нанофаради, нФ		100	150	220	330	470	680	1000
Мікрофаради, мкФ		0,1	0,15	0,22	0,33	0,47	0,68	1,0

2. Маркування чотирма цифрами.

Це маркування аналогічне описаному вище, але в цьому випадку перші три цифри визначають мантису, а остання - показник ступеня за основою 10, для отримання ємності в пікофарадах. наприклад:

$$1622 = 162 \cdot 10^2 \text{ пФ} = 16200 \text{ пФ} = 16.2 \text{ нФ}.$$

3. Буквено-цифрове маркування.

При такому маркуванні буква вказує на десяткову кому і позначення (мкФ, нФ, пФ), а цифри - на значення ємності:

$$15\text{п} = 15 \text{ пФ}, 22\text{р} = 22 \text{ пФ}, 2\text{н}2 = 2.2 \text{ нФ}, 4\text{н}7 = 4,7 \text{ нФ}, \mu 33 = 0.33 \text{ мкФ}$$

Дуже часто буває важко відрізнити російську літеру "п" від англійської "n".

Іноді для позначення десяткової дробі використовується буква R. Зазвичай так маркують ємності в мікрофарадах, але якщо перед буквою R стоїть нуль, то це пікофаради, наприклад:

$$0\text{R}5 = 0,5 \text{ пФ}, \text{R}47 = 0,47 \text{ мкФ}, 6\text{R}8 = 6,8 \text{ мкФ}$$

4. Планарні керамічні конденсатори.

Керамічні SMD конденсатори зазвичай або взагалі ніяк не маркуються крім кольору (кольорове маркування не знаю, якщо хто розповість - буду радий, знаю тільки, що чим світліше - тим менше ємність) або маркуються однією або двома буквами і цифрою. Перша літера, якщо вона є позначає виробника, друга буква позначає мантису відповідно до наведеної нижче таблиці, цифра - показник ступеня за основою 10, для отримання ємності в пікофарадах. приклад:

N1 / по таблиці визначаємо мантису: $N = 3.3 / = 3.3 * 10^1 \text{ пФ} = 33 \text{ пФ}$

S3 / по таблиці $S = 4.7 / = 4.7 * 10^3 \text{ пФ} = 4700 \text{ пФ} = 4,7 \text{ нФ}$. (Таблиця 3.9)

Таблиця 3.9 - Маркування планарних керамічних конденсаторів

Маркування	Значення	Маркування	Значення	Маркування	Значення	Маркування	Значення
A	1.0	J	2.2	S	4.7	a	2.5
B	1.1	K	2.4	T	5.1	b	3.5
C	1.2	L	2.7	U	5.6	d	4.0
D	1.3	M	3.0	V	6.2	e	4.5
E	1.5	N	3.3	W	6.8	f	5.0
F	1.6	P	3.6	X	7.5	m	6.0
G	1.8	Q	3.9	Y	8.2	n	7.0
H	2.0	R	4.3	Z	9.1	t	8.0

5. Планарні електrolітичні конденсатори (Таблиця 3.10)

Електrolітичні SMD конденсатори маркуються двома способами:

1) Ємністю в мікрофарадах і робочою напругою, наприклад: 10 6.3V = 10мкФ на 6,3.

2) Буква і три цифри, при цьому буква вказує на робочу напругу відповідно до наведеної нижче таблиці, перші дві цифри визначають мантису, остання цифра - показник ступеня за основою 10, для отримання ємності в пікофарадах. Смушка на таких конденсаторах вказує позитивний висновок. приклад:

електrolітичний SMD-конденсатор, по таблиці "A" - напруга 10В, 105 - це $10 * 10^5 \text{ пФ} = 1 \text{ мкФ}$, тобто це конденсатор 1 мкФ на 10В

Таблиця 3.10 – маркування планарних електrolітичних конденсаторів

Буква	e	G	J	A	C	D	E	V	H(T для танталових)
Напруга, В	2.5	4	6.3	10	16	20	25	35	50

На конденсаторах малого розміру кодоване позначення номінальної ємності в нанофарадах складається з 3 або 4 цифр, причому остання цифра означає порядок множника (10^n). Наприклад: 105 відповідає номінальній ємності $10 \cdot 10^5 \text{ нФ} = 1 \text{ мкФ}$.

Згідно з вимогами Публікації 62 МЕК допускається маркування конденсаторів колірним кодом. Її наносять знаками у вигляді кругів або смуг, причому перший знак зчитують від торця конденсатора.

Колірні знаки прочитуються ліворуч на право (або зверху вниз) в наступному порядку:

1. перша смуга - перша і друга цифри;
2. друга смуга - множник;
3. третя смуга - допуск;
4. четверта смуга - номінальна напруга.

У таблиці 3.11 приведений варіант колірного кодування постійних конденсаторів.

Таблиця 3.11 - Кольори знаків маркування постійних конденсаторів для ряду E12

Колір знаку	Номінальна ємність, пФ або мкФ		Допуск, %	Номінальна напруга, В
	1 і 2 цифри	Множник		
Сірий	-	-	-	3,2
Чорний	10	1	±20	4,0
Коричневий	12	10	±1	6,3
Червоний	15	10 ²	±2	10
Помаранчевий	18	10 ³	-	16
Жовтий	22	10 ⁴	-	40
Зелений	27	10 ⁵	±5	25
Блакитний	33	10 ⁶	±1	32
Фіолетовий	39	10 ⁷	-- 20.+50	50
Сірий	47	10 ⁻²	-- 20.+80	-
Білий	56	10 ⁻¹	±10	63
Сріблястий	68	-	-	2,5
Золотий	82	-	-	1,5

3.7.2.4. Основні конструкції конденсаторів постійної ємності

Основні конструкції конденсаторів постійної ємності наведені на рисунку 3.53.

1. *Рулонна*. В цьому випадку тонка плівка діелектрика з двох сторін перекладається металевими обкладаннями, після чого уся система згортається в рулон (рисунок 3.53,а). Таку конструкцію мають паперові (K41, K42), полістирольні (K71), фторопластові (K72), поліетилентерефталатні (K73) і інші конденсатори з пластичним або гнучким діелектриком. В якості металевих обкладань використовують тонку фольгу з олова або алюмінію, або напилюють її на діелектрик. Недоліками такої конструкції є: велика індуктивність і відносно мала питома ємність. Такі конденсатори не можна використовувати як завадозахисні.

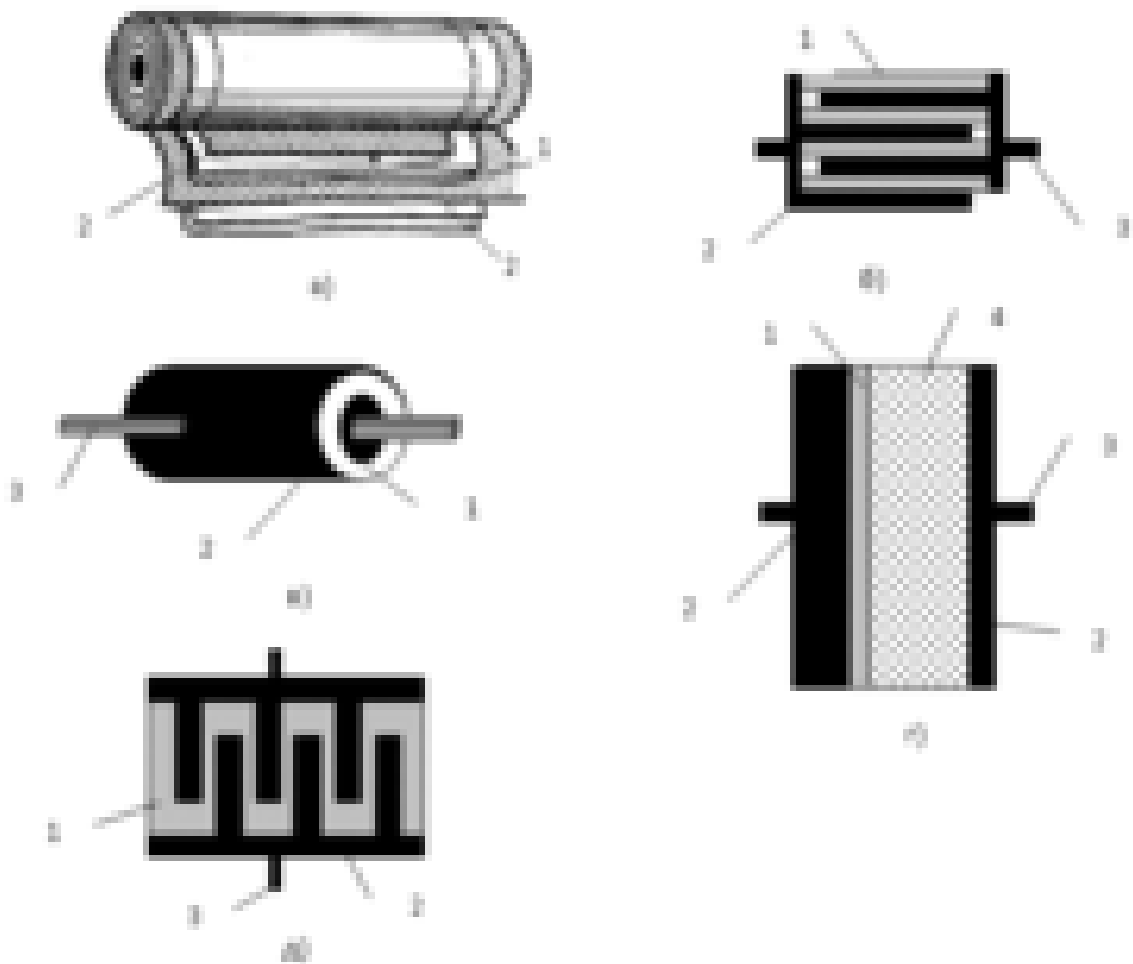


Рисунок 3.53 - Конструкції конденсаторів постійної ємності
 а – рулонна, б – пакетна, в – циліндрична, г – оксидна, д – лита секційна
 1 – діелектрик, 2 – обкладинка, 3 – виводи, 4 – електроліт

2. *Пакетна.* В цьому випадку тонкі пластини діелектрика перекладають металевими обкладаннями по черзі. Після цього таку систему стискають в пакет, а металеві обкладання замикають через одну (рисунок 3.53, б). Металеві обкладання теж можуть бути як з фольги, так і напиленими. Така конструкція має невелику індуктивність, але маленьку питому ємність. У пакетній конструкції виготовляють слюдяні (31), скляні (21), лакоплівкові (76) конденсатори, а також деякі керамічні (10).
3. *Циліндричні.* Діелектрик виготовляють як порожнисту трубку, зовнішню і внутрішню поверхні якої металізують (рисунок 3.53, в). Така конструкція має дуже малу індуктивність, але і малу питому ємність. Тому такі конденсатори використовують як високочастотні. Такі конденсатори виготовляють, передусім, з кераміки (K10, K15).
4. *Оксидні.* В цьому випадку діелектриком служить оксид металу. Наприклад, для конденсаторів оксидно-алюмінієвих (K50) це Al_2O_3 , а для оксидно-танталових (K51) – Ta_2O_5 . Одним обкладанням служить металева фольга (анод), а інший (катод) служить електроліт, яким просочують прокладення з паперу або тканини (рисунок 3.53, г). Такі конденсатори мають велику питому ємність, але відносно низьку напругу і великі діелектричні втрати. Крім того, у мірі служби

відбувається висихання електроліту, і конденсатор втрачає свою ємність. Особливо це стосується оксидно-алюмінієвих конденсаторів типу К-50.

5. *Литі секційні*. Таку конструкцію мають керамічні конденсатори. З кераміки відливають "гребінку" з дуже тонкими стінками. Проміжок між стінками металізують (рис. 3.69 д). Такі конденсатори мають велику питому ємність і малу індуктивність. Це керамічні конденсатори типу К10, КМ-4, КМ-5 і SMD - конденсатори.

3.7.2.6. Характеристика і використання деяких типів конденсаторів постійної ємності

Тип діелектрика і конструкція відіграють важливу роль при використанні конденсаторів.

Поліетілентерефталатні конденсатори (К73) мають дуже малу абсорбцію і малі витоки. Тому їх вигідно використовувати як інтегруючі конденсатори в ЦАП, таймерах, генераторах малих частот.

Конденсатори полістирольні (К71) і фторопластові (К72) також мають малі витоки. Крім того, їх властивості дуже мало змінюються з частотою. Тому такі конденсатори використовують в контурах, де важливу роль грає стабільність параметрів.

Паперові конденсатори (К40.К42) мають велику реактивну потужність. Тому їх широко використовують для захисту від індустриальних перешкод.

Комбіновані конденсатори (К75) мають велику пробивну напругу і широко використовуються в ланцюгах з високою напругою.

Оксидні конденсатори (К50.К53) мають велику питому ємність. Тому їх вигідно використовувати в згладжувальних фільтрах блоків живлення. При цьому танталові конденсатори (К51) мають кращі частотні властивості.

Керамічні конденсатори мають малу індуктивність. Їх застосовують в першу чергу як блокуючі і високочастотні конденсатори. У останньому випадку їх використовують для термокомпенсації контурів.

3.7.2.7. Перевірка справності конденсаторів

Непрацездатний конденсатор може бути визначений за допомогою омметра, спеціального приладу для вимірювання ємності або перевіркою схеми.

Для грубої перевірки придатності конденсаторів можна рекомендувати їх контроль за допомогою вимірювачів опорів (омметр, комбінований прилад - мультиметр). Методика перевірки полягає в наступному:

1) один з виводів конденсатора повинен відділятися (відпоюватися) від схеми;

2) вимірювальний прилад налаштовується на вимір в діапазоні десятків і сотень кілоом або навіть мегом;

3) до виводів конденсатора прикладаються щупи мультиметра. При цьому для конденсаторів великої ємності від декількох десятків до декількох тисяч мікрофард буде характерним початковий кидок стрілки приладу на «нуль» (в

момент проходження максимального струму заряду) з подальшим відхиленням стрілки до мітки «нескінченність»;

4) задовільному стану діелектрика конденсатора буде відповідати показання омметра не менше ніж 100 кОм;

5) якщо в конденсаторі великої ємності (10 - 100 мкФ) має місце обрив, то стрілка приладу відразу встановлюється на мітці «нескінченність»;

6) для конденсаторів малої ємності практично неможливо за допомогою омметра визначити наявність обриву, так як вимірювальний прилад буде показувати або коротке замикання, якщо стався пробій ізоляції, або нескінченно великий опір, якщо конденсатор в хорошому стані або є обрив. У разі, якщо є підозра на обрив, такі конденсатори зазвичай замінюються.

Обрив кола всередині конденсатора визначається за допомогою схеми вимірювання, що складається з послідовно включених конденсатора, амперметра змінного струму і резистора, що обмежує струм через прилад.

Схема включається на джерело змінного струму, напруга якого не повинна перевищувати 20% номінальної напруги конденсатора. Відсутність струму в колі вказує на обрив.

Збільшення струму витoku визначається повторним підключенням омметра до виводів конденсатора.

При першому підключенні стрілка приладу відхилиться за рахунок струму заряду, а потім повернеться в початкове положення.

Якщо при наступних підключеннях, повторюваних з інтервалом в декілька секунд, відхилення стрілки повторюються, то це означає, що конденсатор має підвищений струм витoku.

Зменшення ємності, що виникає найчастіше у електролітичних конденсаторів, визначається зіставленням номінальної ємності з фактичною, яка вимірюється за допомогою спеціальних мостів або схем і деяких типів мультиметрів.

Перевірка конденсаторів цифровим мультиметром

При конструюванні і ремонті електронної техніки часто виникає необхідність в перевірці радіоелементів, в тому числі і конденсаторів.

Але на даний момент достовірно визначити справність конденсатора можна лише за допомогою приладу, який здатний виміряти його електричну ємність.

Перед тим, як почати перевірку конденсатора необхідно визначити його тип. Всі вони діляться на дві групи:

Неполярні. До них відносяться конденсатори, в яких діелектриком є слюда, кераміка, папір, скло, повітря. Як правило, їх ємність невелика і лежить в межах від декількох пікофарад до одиниць мікрофарад.

Серед несправностей конденсаторів можна виділити три основних:

Електричний пробій. Як правило, пробій викликаний перевищенням допустимої робочої напруги на обкладинках конденсатора.

Обрив. При обриві конденсатор електричне являє собою два ізольованих провідники не мають ніякої ємності. Зазвичай обрив утворюється внаслідок механічного впливу, вібрації та ударів. Його причиною може бути неякісна конструкція елемента, а також порушення допустимих режимів експлуатації.

Підвищений витік. Зміна опору діелектрика між обкладинками. При такій несправності ємність конденсатора стає помітно нижче, він не здатний зберігати заряд.

Список несправностей у електролітичних конденсаторів помітно ширше. В основному це стосується алюмінієвих електролітичних конденсаторів, які дуже активно використовуються для фільтрації пульсуючої напруги у всіляких випрямлячах.

Втрата ємності, підвищений витік.

Високий ESR (ЕПО - еквівалентний послідовний опір).

Як уже говорилося, достовірно перевірити справність конденсатора можна лише за допомогою приладу, який здатний виміряти його ємність. Як правило, для цих цілей застосовуються вимірювачі індуктивності і ємності (LC-метри). Вони досить коштовні.

Але, незважаючи на це, можна знайти доступний за ціною мультиметр з функцією LC-метра. Наприклад, є мультиметр Victor VC9805A +.

Він має 5 меж вимірювання і здатний визначити ємність в діапазоні від 20 нанофарад (20 nF) до 200 мікрофарад (200 μ F). З його допомогою можна виміряти ємність, як звичайних неполярних конденсаторів, так і полярних електролітичних.

Межі вимірювання ємності мультиметра



Рисунок 3.54 - Межі вимірювання ємності

Максимальна межа вимірювання обмежена значенням в 200 мікрофарад (мкФ), що не так вже й багато, якщо врахувати, що ємність електролітичних конденсаторів часом доходить і до 10000 мкФ.

Вимірювальні щупи приладу підключаються до гнізд вимірювання ємності (позначається як Cx). При цьому потрібно дотримуватись полярності їх підключення.

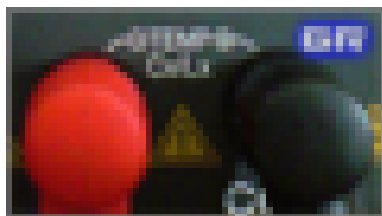


Рисунок 3.55 - Роз'єм вимірювання ємності (Cx)

На фото показаний процес вимірювання ємності конденсатора номіналом 100 nF (0,1 мкФ). Для вимірювання обрана межа в 200 нанофарад.

Замір ємності конденсатора 0,1 мкФ.



Рисунок 3.56 - Вимірювання ємності справного конденсатора

Як бачимо, ємність відповідає тій, що вказана у маркуванні на корпусі - 104,7nF. Конденсатор все гаразд.

А ось приклад несправного металоплівкового конденсатора К73-17 на 100 нФ.

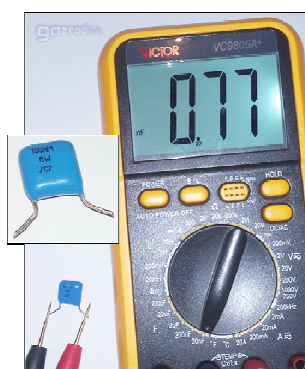


Рисунок 3.57 - Конденсатор з втратою ємності

Зазначимо, що спочатку даний конденсатор був виміряний мультиметром в режимі омметра. Не було виявлено нічого підозрілого. На ділі ж він виявився несправним, мав дуже маленьку ємність, всього 737 пікофарад.

На наступному фото перевірка цього ж конденсатора універсальним тестером.

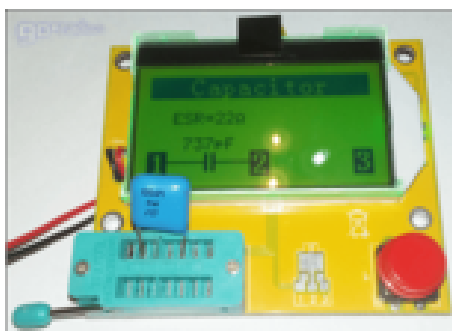


Рисунок 3.58 - Несправний конденсатор серії К73-17

Саме тому для перевірки конденсаторів варто використовувати тестер з функцією виміру ємності. Це дасть найбільш достовірний результат.

Винятком може бути електричний пробій, який легко виявити за допомогою омметра, а часом і чисто візуально при зовнішньому огляді. Ось приклад.

На фото пробитий неполярний конденсатор на робочу напругу 1,2kV.



Рисунок 3.59 - Пробитий високовольтний конденсатор

При значному перевищенні робочої напруги на конденсаторі, між його обкладинками відбувається електричний пробій. На корпусі пробитих конденсаторів можна виявити потемніння, здуття, темні плями і інші зовнішні ознаки пошкодження елемента.

Корпус може бути розколотим або мати на поверхні відколи та тріщини.

Варто відзначити той факт, що пробій у алюмінієвих електролітичних конденсаторів зустрічається досить рідко. Зворотна ситуація спостерігається у танталових конденсаторів, які в силу своїх особливостей погано витримують навіть незначне перевищення робочої напруги. При вимірі ємності у електролітичного конденсатора варто знати одну особливість. Так як допуск у них дуже великий, часом досягає 30%, то розкид значення ємності може бути вельми великий. В такому разі не варто вважати конденсатор непридатним. Крім цього, багато що залежить від того, яким приладом користуєтесь. Ось список реальної ємності нових конденсаторів. Виміри проводилися універсальним тестером LCR-T4 2200 μF (35V) - реальна 2155 μF (Jamicon); 470 μF (25V) - реальна 420,9 μF (EPCOS); 220 μF (400V) - реальна 217,7 μF (SAMWHA); 100 μF (450V) - реальна 98,79 μF (Jamicon); 100 μF (400V) - реальна 101,1 μF (SAMWHA); 82 μF (400V) - реальна 75,65 μF (Jamicon); 82 μF (450V) - реальна 77,46 μF (SAMWHA); 82 μF (450V) - реальна 77,05 μF (CapXon); 68 μF (450V) - реальна 66,43 μF (Jamicon); 33 μF (160V) - реальна 31,99 μF (SAMWHA); 22 μF (250V) - реальна 22,21 μF (SAMWHA); Як бачимо, самим неякісним виявився конденсатор EPCOS B41828 1050C 470 μF (M) 25V.

Ці же конденсатори були перевірені мультиметром Victor VC9805A+. Так ось, він показав ємність конденсаторів менше. Для конденсатора 220 μF (400V) він взагалі наміряв 187 μF ! Несправність електролітичного конденсатора можна визначити при зовнішньому огляді. Якщо корпус його має розрив насічки у верхній частині корпусу - 100% його треба міняти. Розрив захисної насічки на корпусі свідчить про те, що на конденсатор діяло завищена напруга, внаслідок чого і стався, так званий, "вибух".

Як вже говорилося, пробій алюмінієвих електролітичних конденсаторів явище досить рідкісне. Замість цього має місце такий ось "вибух" або "здуття". Відбувається це від того, що при перевищенні допустимого напруги або при переполюсованні, в конденсаторі починається бурхлива хімічна реакція. Вона призводить до нагрівання і випаровування електроліту, пари якого тиснуть на стінки корпусу і розривають захисний клапан.



Рисунок 3.60 - Електролітичний конденсатор

Такі дефекти конденсаторів з'являються, наприклад, при впливі потужного електричного розряду на електронний прилад під час грози або сильних коливань напруги в електроосвітлювальній мережі 220V.

Аналогічний ефект "здуття" алюмінієвого електролітичного конденсатора проявляється і при його тривалій експлуатації. Так як електроліт рідкий, то він має властивість випаровуватися при нагріванні і тривалій експлуатації.

Стоїть відзначити, що конденсатор нагрівається не тільки зовні, але і зсередини. Пов'язано це з наявністю еквівалентного послідовного опору (ESR). При випаровуванні електроліту ємність конденсатора помітно знижується. Згодом він усе сильніше "здувається". Про такий конденсатор кажуть, що він висох. При ремонті електронної апаратури часом бувають випадки, що в блоці живлення, яке відслужило не один рік, можна виявити цілу грядку таких "дутишів".

Втрата ємності може бути причиною поломки телевізора. Така несправність не рідкість. В сучасних умовах, коли має місце широке поширення імпульсної техніки, ще один важливий параметр, який потрібно враховувати при тестуванні електролітичних конденсаторів, це його ESR. На сайті є таблиця зі значеннями ESR нових конденсаторів різної ємності. Так як більшість мультиметрів не підтримують функцію виміру ESR, то при необхідності краще придбати спеціалізований тестер або універсальний тестер радіокомпонентів. Це незамінний прилад в майстерні радіоаматора і будь-якого радіомеханіка.

Міри обережності при перевірці електролітичних конденсаторів. При перевірці електролітичного конденсатора необхідно повністю його розрядити! Особливо цього правила варто дотримуватися при перевірці конденсаторів, що мають велику ємність і високу робочу напругу. Якщо цього не зробити, то можна зіпсувати вимірювальний прилад високою залишковою напругою. Наприклад, часто доводиться перевіряти справність конденсаторів, які застосовуються в імпульсних блоках живлення. Їх ємність і робоча напруга досить великі і при неповному розряді можуть привести до псування мультиметра.

Тому перед перевіркою їх слід обов'язково розрядити, закоротити виводи закоротко (для низьковольтних конденсаторів з малою ємністю). Зробити це можна звичайною викруткою.

Конденсатори з ємністю понад 100 мкФ і робочою напругою від 63V бажано розряджати вже через резистор опором 5-20 кіло і потужністю 1 - 2 Вт. Для цього виводи резистора з'єднують з виводами конденсатора на кілька секунд, щоб прибрати залишковий заряд з його обкладинок. Розряд конденсатора через резистор застосовується для того, щоб виключити появу потужної іскри.

При проведенні даної операції не варто торкатися руками виводів конденсатора і резистора, інакше можна отримати неприємний удар струмом при розряді обкладинок. Резистор краще затиснути плоскогубцями в ізоляції і вже тоді з'єднати його з виводами конденсатора.

При закоротці виводів зарядженого електролітичного конденсатора проскакує іскра, іноді дуже потужна.

Тому слід подбати про захист лиця і очей. По можливості застосовувати захисні окуляри або триматися від конденсатора при проведенні таких робіт подальше.

Перевірка конденсатора стрілочним омметром.

Раніш, коли серед радіоаматорів були поширені стрілочні омметри, перевірка конденсаторів проводилася схожим чином. При цьому конденсатор заряджався від батареї омметра і опір, що показується стрілкою приладу, зростав. В кінцевому підсумку величина його досягала значення опору витoku.

По швидкості відхилення стрілки вимірювального приладу від нуля і до кінцевого значення оцінювали і ємність електролітичного конденсатора. Чим довше проходила зарядка (довше відхилялася стрілка приладу), тим, відповідно, була більше ємність. Для конденсаторів з невеликою ємністю (1 - 100 мкФ) стрілка вимірювального приладу відхилялася досить швидко, що свідчило про невеликої ємності, а ось при перевірці конденсаторів з ємністю від 1000 мкФ і більше, стрілка відхилялася значно повільніше.

Перевірка конденсаторів за допомогою омметра є непрямим методом . Більш точну і правдиву оцінку про справність конденсатора і його параметрах дозволяє отримати мультиметр з можливістю вимірювання електричної ємності

3.7.3.7. Несправності конденсаторів

1. Коротке замикання всередині конденсатора

Причина несправності:

- а) Неякісний конденсатор
- б) Перенапруження
- в) Велика пульсація напруги

Заходи, що вживаються:

- а) Замінити
- б) Замінити на конденсатор з більш високою допустимою напругою
- в) Замінити на конденсатор з більш високим допускаються напругою або

вжити заходів до зменшення пульсації напруги

2. Обрив кола всередині конденсатора

Причина несправності:

- а) Неякісний конденсатор
- б) Невдале кріплення або підвищена вібрація

Заходи, що вживаються:

- а) Замінити
- б) Замінити, змінивши кріплення або усунувши підвищену вібрацію

3. Збільшення струму витoku

Причина несправності:

а) Неякісний конденсатор

Заходи, що вживаються:

а) Замінити

4. Зменшення величини ємності

Причина несправності:

а) Розгерметизація конденсатора

б) Зменшення вмісту електроліту внаслідок тривалого терміну служби

Заходи, що вживаються:

а) Замінити.

б) Замінити.

3.7.3 Електроізоляційні матеріали та вироби

3.7.3.1 Загальні відомості

Електроізоляційні матеріали (діелектричні матеріали, діелектрики, ізолятори) - конструкційні матеріали та середовища, що служать для ізолювання провідників, тобто їх електричного роз'єднання і захисту від зовнішніх впливів. Основна властивість цих матеріалів - створення перешкоди протіканню електричного струму провідності (постійного і змінного).

У електроізоляційних матеріалів бажані велике питомий об'ємний опір, високу пробивну напругу, малий тангенс діелектричних втрат і мала діелектрична проникність. Важливо, щоб перераховані вище параметри були стабільні в часі і по температурі, а іноді і по частоті електричного поля.

Електроізоляційні матеріали можна поділити:

за агрегатним станом:

- газоподібні
- рідкі
- тверді

за походженням:

- природні неорганічні
- штучні неорганічні
- природні органічні
- синтетичні органічні

Газоподібні. У всіх газоподібних електроізоляційних матеріалів діелектрична проникність близька до 1 і тангенс діелектричних втрат так само малий, зате мала і напруга пробою. Найчастіше в якості газоподібного ізолятора використовують повітря, проте останнім часом все більше застосування знаходить елегаз (гексафторид сірки, SF₆), що володіє майже втричі більшою напругою пробою і значно вищою дугогасильною здатністю. Іноді для виготовлення електроізоляційних матеріалів застосовують поєднання газоподібних і органічних матеріалів.

Рідкі - найчастіше використовують в трансформаторах, вимикачах, кабелях, вводах для електричної ізоляції і в конденсаторах. Причому в трансформаторах ці діелектрики є одночасно і охолоджуючими рідинами, а в вимикачах - і як дугогасним середовищем. Як рідкий діелектричний матеріал перш за все

використовується трансформаторне масло, конденсаторне масло, рицинова олія, синтетичні рідини (совтоли).

Природні неорганічні - найбільш поширений матеріал слюда, вона має гнучкість при збереженні міцності, добре розщеплюється, що дозволяє отримати тонкі пластини. Хімічно стійка і нагрівостійка. Як електроізоляційні матеріали використовують мусковіт і флогопіт, однак мусковіт все ж краще.

Штучні неорганічні: хороший опір ізоляції мають скла з малою лужністю, скловолокно, ситал, але основним електроізоляційним матеріалом все ж є фарфор (кераміка з польового шпату). Ця кераміка широко використовується для ізоляторів струмопровідних проводів високої напруги, прохідних ізоляторів і т. д. Однак через високий тангенса діелектричних втрат не годиться для високочастотних ізоляторів. Для інших більш вузьких завдань використовується кераміка - форстеритова, глиноземиста, кордйритова і т.д.

Природні органічні: останнім часом у зв'язку з розширенням виробництва синтетичних електроізоляційних матеріалів їх застосування скорочується. Виділити можна наступні - целюлоза, парафін, пек, каучук, бурштин і інші природні смоли, з рідких - касторове масло.

Синтетичні органічні: велика частина даного матеріалу доводиться на частку високомолекулярних хімічних сполук - пластмас, та еластомерів. Існують також синтетичні діелектричні рідини (совтоли).

3.7.3.2 Корабельні лаки та фарби

Лакофарбові матеріали (ЛФМ) - це композиційні склади, що наносяться на оброблювані поверхні в рідкому або порошкоподібному вигляді рівномірними тонкими шарами і утворюють після висихання та затвердіння плівку, що має міцне зчеплення з основою. Сформовану плівку називають лакофарбовим покриттям, властивістю якого є захист поверхні від зовнішніх впливів (води, корозії, температур, шкідливих речовин), надання їй певного виду, кольору і фактури.

ЛФМ поділяються на такі групи:

- фарба;
- емаль;
- лак;
- ґрунтовка;
- шпаклівка;
- антисептик.

Фарби - суспензії пігментів в плівкоутворювальних речовинах, які після висихання утворюють непрозоре однорідне покриття.

Емаль - суспензія пігментів, наповнювачів в лаку, яка після висихання утворює непрозоре, тверде покриття різної структури і блиску.

Лаки - розчини смол (натуральних або синтетичних) в різних розчинниках (вуглеводні, ацетон, вода, етанол, оліфи або ефірні масла) до рідкої або напіврідкої консистенції, які, просихаючи в тонкому шарі, що знаходиться на будь-якому предметі, утворюють міцну плівку (як правило прозору, на відміну від фарби), добре протистоїть різним зовнішнім фізико-хімічним впливів. Затвердіння плівки

лаку відбувається або за рахунок випаровування розчинника, або за рахунок реакції окисної полімеризації. Лаки умовно ділять на термопластичні і термореактивні.

В даний час існують лаки, що не містять в складі розчинників. Їх низьку в'язкість забезпечують олігомери, які здатні твердіти в присутності спеціальних речовин - затверджувачів або каталізаторів. Нанесення лаку на поверхню називається лакуванням.

Грунтовка - суспензія пігментів з наповнювачами в плівкоутворювальній речовині, яка після висихання утворює однорідну непрозору плівку.

Шпаклівка - суміш наповнювачів, пігментів і плівкоутворювальних речовин, пастоподібна в'язка маса, призначена для заповнення дефектів поверхні, додання їй рівномірної фактури.

Антисептик - спеціальний водовідштовхувальний склад, що, захищає дерев'яні поверхні не тільки від грибка, але і від комах, які люблять харчуватися деревиною.

Особливість суднових фарб в тому, що ці лакофарбові матеріали розроблені спеціально для фарбування морських, річкових суден, кораблів, яхт, барж. Ці покриття, завдяки своїй високій стійкості до води, довго служать цілям захисту корпусу судна від агресивного впливу води, абразивів, вітру, температур і ультрафіолету.

Найбільшим ступенем захисту мають саме фарби для морських судів, оскільки найбільш руйнівне саме морське середовище. Якщо не використовувати якісний антикорозійний захист, то іржа повністю зруйнує корпус буквально за 5-10 років.

3.7.3.3 Електроізоляційні лаки

Електроізоляційні лаки являють собою колоїдні розчини різних плівкоутворювальних речовин в спеціально підібраних органічних розчинниках. Плівкоутворювальними називаються такі речовини, які в результаті випаровування розчинників і процесів твердіння (полімеризації) здатні утворити тверду плівку.

До плівкоутворювальних речовин відносяться смоли (природні і синтетичні), рослинні масла, що висихають, ефіри целюлози та ін. Як розчинники плівкоутворювальних речовин застосовують летючі рідини: бензол, толуол, ксилол, спирти, ацетон, скипидар та ін.

Щоб створити електроізоляційний лак, що задовольняє ряду вимог, підбирають кілька плівкоутворювальних речовин, які становлять основу лаку.

Для повного розчинення лакової основи і рівномірного висихання лаку іноді доводиться застосовувати кілька розчинників. Для розведення загустілих лаків в них вводять розчинники, які відрізняються від інших меншою випаровуваністю. Крім того, вони можуть розчиняти лакову основу тільки в суміші з розчинниками. Як розріджувачів застосовують бензин, лаковий гас, скипидар і деякі інші рідини.

До складу електроізоляційного лаку можуть ще входити пластифікатори і сикативи. **Пластифікатори** - речовини, що додають лаковій плівці еластичність. До них відносяться касторове масло, жирні кислоти лляного масла і інші маслоподібними рідини. **Сикативи** є рідкі або тверді речовини, що вводяться в деякі лаки (масляні та ін.), щоб прискорити їх висихання.

При сушінні шару лаку, нанесеного на якусь поверхню, що містяться в ньому органічні розчинники випаровуються, а плівкоутворювальні речовини в результаті процесів полімеризації утворюють тверду лакову плівку. Ця плівка може бути гнучкою (еластичною) або негнучкою і крихкою в залежності від властивостей плівкоутворювальних речовин, що складають лакову основу.

За своїм призначенням електроізоляційні лаки діляться: на просочувальні, покривні і скліючі.

Просочувальні лаки застосовують для просочення обмоток в електричних машинах і апаратах з метою цементації (з'єднання) витків обмотки один з одним, а також з метою усунення пористості в ізоляції обмоток.

Просочувальний лак, проникаючи в пори ізоляції обмоток, витісняє звідти повітря і після свого затвердіння робить обмотку вологостійкою. При цьому підвищується електрична міцність ізоляції обмотки і її коефіцієнт теплопровідності. Однією з головних характеристик просочувальних лаків є їх просочувальна здатність.

Покривні лаки застосовують для створення на поверхні вже просочених обмоток вологостійких або мастилоздатних лакових покриттів. До покривних лаків також відносяться емаль-лаки, що застосовуються для емалювання обмотувальних проводів, а також лаки, що застосовуються для ізоляції листів електротехнічної сталі в магнітопроводах.

Скліючі лаки застосовують для склеювання різних електроізоляційних матеріалів: листочків слюди (у виробництві шаруватої слюдяної ізоляції), кераміки, пластмас і ін. Основна вимога до клеїв лаків, полягає в тому, щоб ці лаки володіли хорошим прилипанням (адгезією) і утворювали б міцний шов.

Слід зауважити, що в практиці буває так, що один і той же лак може застосовуватися в якості просочувального і покривного або в якості покривного і скліючого.

Всі лаки за способом сушіння діляться на дві групи: лаки повітряної (холодної) сушки і лаки для печей (гарячої) сушки.

У електроізоляційних лаків повітряної сушки затвердіння плівки відбувається при кімнатній температурі. До лаків повітряної сушки відносяться шелаки, ефіроцелюлозні і деякі інші.

У електроізоляційних лаків пічної сушки затвердіння плівки можливо лише при температурах значно вище кімнатної (від 100°C і вище). У лаках пічного сушіння застосовують термореактивні плівкоутворювальні речовини (гліфталеві, резольні і інші смоли), затвердіння яких обумовлено процесами полімеризації, які вимагають підвищених температур. Лаки гарячої сушки, як правило, мають більш високі механічні та електричні характеристики.

За лаковою основою електроізоляційні лаки діляться на смоляні, масляні, олійно-бітумні і ефіроцелюлозні.

Смоляні лаки є розчинами природних або синтетичних смол в органічних розчинниках. До смоляних лаків відносяться шелаки, гліфталеві, бакелітові, кремнійорганічні і ін. Смоляні лаки можуть бути термопластичними (полівінілацетатні, поліхлорвінілові та ін.) і термореактивними (гліфталеві, бакелітові і ін.).

Масляні лаки являють собою розчини рослинних масел в органічних розчинниках. До висихаючих олій належать тунгова і льняна олії.

Тунгове масло видобувається з горішків тунгового дерева, воно швидко висихає, утворюючи еластичну вологостійку плівку. Лляна олія виходить з насіння льону. Уварене до певної щільності лляне масло служить основою масляних лаків.

В масляні лаки зазвичай вводять сикативи - речовини, що прискорюють висихання лаків. Плівки масляних лаків є термореактивними речовинами, тобто розм'якшуються при нагріванні.

Область застосування масляних лаків в електротехніці вельми обмежена в порівнянні зі смоляними лаками. Масляні лаки застосовують для просочення електроізоляційної лакотканини, емалювання обмотувальних проводів і як покривні лаки, що відрізняються стійкістю до вологи.

Олійно-бітумні лаки є розчинами олійно-бітумних сумішей в органічних розчинниках (скипидар, толуол, ксилол та ін.). Для цього застосовують бітуми нафтові і природні (асфальти). З рослинних масел застосовується головним чином лляне масло. Плівки цих лаків мають чорний колір. Вони володіють хорошими електроізоляційними властивостями, відрізняються еластичністю і водостійкістю. Плівки олійно-бітумних лаків термопластичні і легко розчиняються в мінеральних маслах і в ряді розчинників, що є їх недоліком. Олійно-бітумні лаки широко застосовують в якості просочувальних лаків для обмоток електричних машин.

Ефіроцелюлозні лаки являють собою розчини ефірів целюлози (нітроцелюлоза, ацетилцелюлози і ін.) В суміші розчинників (амілацетат, ацетон, спирти та ін.). Плівки цих лаків прозорі, мають характерний блиск і володіють стійкістю до мінеральних масел, бензину і озону.

Ефіроцелюлозні лаки застосовують переважно для лакування бавовняних опліток проводів з гумовою ізоляцією - для захисту гуми від дії бензину, мінеральних масел і озону. До металів ці лаки прилипають погано. Застосування ефіроцелюлозних лаків полегшується тим, що вони є лаками повітряної сушки, але область застосування їх в електротехніці відносно невелика.

3.7.3.4 Термореактивні пластмаси

До групи термореактивних пластмас відносяться пресовані порошки, волокніти і шаруваті пластики. Вони вигідно відрізняються від термопластичних пластмас відсутністю холодотекучості під навантаженням, більш високу теплостійкість, малу зміною властивостей в процесі експлуатації. Термореактивні пластмаси переробляють в деталі (вироби) переважно методом пресування.

Пресовані порошки представляють собою композиційну пластмасу, отриману поєднанням термореактивної смоли з порошкоподібною наповнювачем. Для виготовлення термореактивних пресованих порошків застосовують в більшості випадків фенолформальдегідні і меламінформальдегідні смоли, а в якості наповнювачів деревну, азбестове і кварцове борошно. Пресовані порошки, отримані на основі фенолформальдегідних смол, називають фенопласт, а на основі меламінформальдегідних смол - амінопласт. Найбільш поширеними є фенольні прес-порошки марок К-15-2, К-17-2, К-18-2, К-20-2, в яких наповнювачами є деревне борошно або мінеральні речовини. Фізико-механічні властивості і

теплостійкість їх низькі. Прес-порошки мають підвищену крихкість, тому вони в основному застосовуються для виробництва ненавантажених технічних деталей і виробів побутового призначення.

Волокніти представляють собою композицію термореактивної смоли з волокнистими наповнювачами. До числа таких наповнювачів відносяться бавовняні, азбестові і скляні волокна. В якості сполучного використовуються фенолформальдегідні, анілінформальдегідні, меламінформальдегідні, полісилоксанові і інші смоли. Для додання волокнітах більшої однорідності та кращого зовнішнього вигляду в їх склад вводять невелику кількість порошкоподібного наповнювача.

Загальною позитивною властивістю всіх волокнітах є підвищена питома ударна в'язкість.

З волокнистих пластмас найбільш поширеними є волокна, азбоволокніт, скловолокно.

Волокніт (наповнювач - бавовняні пачоси) має гарну міцність на удар, але його статична механічна міцність невисока. За діелектричними властивостями він поступається пресованим порошкам. У деталі (виробі) волокна переробляють тільки гарячим пресуванням. Вихідна маса дуже груба, жорстка, тому з неї можна формувати деталі (вироби) лише простої конфігурації. Обробка різанням не бажана, тому що супроводжується вириванням бавовняних волокон, що порушує якість поверхні і послаблює деталь (виріб). Волокніт застосовують для виготовлення деталей (виробів) загального технічного призначення з високим опором до ударних навантажень.

Особливими позитивними властивостями азбоволокнітів (наповнювач - азбестове волокно), крім підвищеної питомої ударної в'язкості, є висока теплостійкість (200-250 ° С) і хороші фрикційні властивості, обумовлені високим значенням коефіцієнта тертя (коефіцієнт тертя по сталі 0,3-0,4). Азбоволокніти - грубий і жорсткий матеріал, використовуються так само, як і волокніту, для виготовлення деталей простої конфігурації і застосовуються в якості фрикційного матеріалу для виготовлення гальмівних колодок, фрикційних муфт, дисків зчеплення, деталей колекторів і т. д.

Скловолокно (наповнювач - скляне волокно) має найвищі механічні властивості, що залежать від кількості введенного в композицію скловолокна і від його орієнтації в деталі. Скловолокніти корозійно стійкі до багатьох агресивних середовищ, мають високі електроізоляційні властивості, водонепроникні, можуть тривалий час працювати при високих температурах (до 350 ° С).

В якості сполучних при виготовленні скловолокніти застосовують епоксидні, фенольні, поліефірні, кремнійорганічні і інші смоли. Скловолокніти використовують для виготовлення деталей, що працюють як діелектрики. Як конструкційний матеріал скловолокно застосовують у виробництві корозійно-стійких високоміцних труб, кузовів автомобілів, для виготовлення човнів, катерів, шлюпок, вагонів і т.д.

Шаруваті пластмаси представляють собою поєднання термореактивної смоли з листовими наповнювачами, в якості яких застосовують: бавовняні, азбестові і скляні тканини, папір, деревний шпон. Відповідно до вибраного наповнювачем все

шаруваті пластики поділяються на текстоліти, склотекстоліти, азботекстоліти, гетинакси і деревно-шаруваті пластики.

Текстоліти (наповнювач - бавовняна тканина) широко використовують в машинобудуванні як конструкційний і антифрикційний матеріал: У них вигідно поєднуються висока механічна міцність з низькою щільністю, зносостійкість і хорошими діелектричними властивостями. Текстоліт застосовують для виготовлення підшипників, зубчастих коліс і різних силових деталей загального і спеціального машинобудування.

Азботекстоліт (наповнювач - азбестова тканина) володіє високим значенням коефіцієнта тертя, теплостійкістю і витримує великі питомі тиски. Його застосовують переважно в якості теплоізоляційних облицювань, гальмівних частин, гальм, деталей зчеплення муфт і т.д.

Гетинакс (наповнювач - папір) має високі діелектричні властивості і задовільну механічну міцність. Випускається у вигляді листів, плит, труб і різних пресованих деталей. Він широко застосовується як електроізоляційний матеріал.

Деревно-шаруваті пластики (наповнювач – дерев'яний шпон) представляють собою матеріал, що складається з тонких листів лущеної деревини (шпону), просочених синтетичною смолою і склеєних між собою при високій температурі і тиску.

Залежно від товщини і призначення ці пластики випускають у вигляді плит і листів.

Деревно-шаруваті пластики мають високу міцність, низьким коефіцієнтом тертя і хорошими діелектричними властивостями.

Деревно-шаруваті пластики – дешеві і недефіцитні матеріали, з успіхом застосовуються в машинобудуванні як конструкційний матеріал замість металів.

З деревно-шаруватих пластиків виготовляють зубчасті і черв'ячні колеса, вкладиші підшипників і інші силові деталі.

Склотекстоліти (наповнювач - скляна тканина) представляють собою шарувату міцну пластмасу, яка застосовується в загальному і спеціальному машинобудуванні, електро - і радіотехніці для виготовлення деталей, що несуть значні робочі навантаження .

Ці пластмаси мають високу міцність, пружність, теплостійкість і високі діелектричні властивості.

3.7.3.5 Ізоляційні стрічки

Електроізоляційна стрічка (ізолента) — тип клейкої стрічки, що використовується для обмотки електричних проводів та кабелів з метою їх електроізоляції, а також інших матеріалів.

Найпопулярнішим матеріалом для виготовлення є полівінілхлорид (ПВХ), оскільки стрічки на його основі є гнучкими і мають гарні ізоляційні властивості.

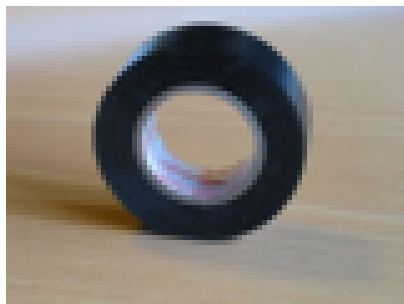


Рисунок 3.61 - Електроізоляційна стрічка

Ізоляційна стрічка ПВХ по своїй основі універсальна, тому вона використовується в різних областях.

Інтервал температури використання стрічки становить 0-90 градусів. Вона застосовується в вуличних умовах і усередині приміщень.

У торговельній мережі стрічка має широку гаму кольорів. У якісної ізоляційної стрічки не повинно бути неприємного запаху, інакше можна зробити висновок про погану якість матеріалу.

Не рекомендується наносити стрічку ПВХ на полімери або силіконові поверхні, які мають в складі фтор.

Якщо поверхня руйнується, має пори і інші пошкодження, то перед нанесенням стрічки ПВХ поверхню упорядковують, обробляють складом ґрунтовки матеріалом. Стрічку потрібно наносити тільки на підготовлену суху і чисту поверхню.

При виконанні робіт з електротехнікою таким матеріалом здійснюють ізоляцію електрокабелів, з'єднань проводів під час ремонтних робіт, маркування джгутів проводів.

Контрольні питання до підрозділу 3.7

1. Приведіть класифікацію конденсаторів.
2. Назвіть основні параметри конденсаторів.
3. Що таке номінальний ряд ємності конденсатора?
4. Що таке ТКЄ конденсатора?
5. Як позначаються і маркуються постійні конденсатори?
6. Приведіть основні конструкції постійних конденсаторів.
7. Яким чином в маркуванні конденсаторів входить тип діелектрика?
8. Що таке кольорове маркування конденсаторів?
9. Яким чином виявляється справність конденсаторів?
10. Перелічіть основні несправності конденсаторів.
11. Які типи лакофарбових матеріалів вам відомі?
12. Яке призначення мають електроізоляційні пластики?
13. Для чого служить ізоляційна лента?

4 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Будь-яка речовина, яка розташована у магнітному полі набуває деякий магнітний момент, Магнітний момент одиниці обсягу речовини називається намагніченістю:

$$J_M = dM/dV. \quad (4.1)$$

Намагніченість пов'язана із напруженістю магнітного поля:

$$J_M = \chi H, \quad (4.2)$$

де χ - магнітна сприйнятливість.

Намагнічене тіло, що знаходиться у зовнішньому магнітному полі, утворює власне магнітне поле, яке може бути паралельне чи антипаралельне зовнішньому полю. Тому сумарна магнітна індукція в речовині визначається так:

$$B = B_0 + B_i = \mu_0 H + \mu_0 J_M = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu H, \quad (4.3)$$

де $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна; μ - відносна магнітна проникність, що показує у скільки разів магнітна індукція поля у даному середовищі більше, ніж у вакуумі.

4.1 КЛАСИФІКАЦІЯ РЕЧОВИН ЗА МАГНІТНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

За реакцією на зовнішнє магнітне поле і характером магнітного упорядкування усі речовини діляться на п'ять груп: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики і феримагнетики (ферити).

До *діамагнетиків* належать речовини, у яких магнітна проникність менше ніж одиниця і не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнетизм обумовлено прецесією (обертанням) вектора орбітального магнітного моменту атома у магнітному полі. Діамагнітний ефект є слідством дії закону електромагнітної індукції на атомному рівні. Діамагнетизм мають усі речовини, але частіше він маскується більшими магнітними ефектами. До діамагнетиків відносять інертні гази, кисень, азот, воду, мідь, срібло, золото, кремній, германій, неорганічні скла та ін. Зовнішньою проявою діамагнетизму є виштовхування діамагнетиків із неоднорідного магнітного поля.

Парамагнетики - це речовини із магнітною проникністю, що трохи більше одиниці та не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Парамагнетизм зумовлений переважно орієнтацією магнітних моментів окремих атомів, що знаходяться в тепловому хаотичному русі в одному напрямку при внесенні речовини в магнітне поле. В парамагнетиках атоми мають елементарні магнітні моменти навіть при відсутності магнітного поля, але внаслідок хаотичного руху атомів ці моменти розподіляються хаотично. Зовнішнє поле викликає орієнтацію магнітних моментів атомів, але тепловий їх рух перешкоджає

виникненню магнітної орієнтації (рисунки 4.1,а). Тому їх магнітна проникність дуже залежить від температури. До парамагнетиків відносять закис азоту, лужні метали та ін.

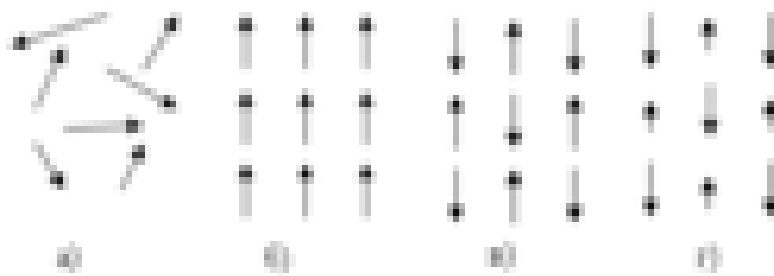


Рисунок 4.1 - Орієнтація спінових моментів у парамагнетик (а), феромагнетик (б), антиферомагнетик (в), феримагнетик (г)

Феромагнетики - речовини із значною магнітною проникністю, що сильно залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Феромагнетизм має внутрішнє упорядкування, що виражається в наявності макроскопічних ділянок, усередині яких існує паралельна орієнтація магнітних моментів атомів навіть при відсутності зовнішнього магнітного поля (рисунки 4.1,б). Такі ділянки звуться доменами. Найважливіша особливість феромагнетиків - здатність намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

В *антиферомагнетиках*, на відміну від феромагнетиків нижче деякої критичної температури Нееля виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових іонів (рисунки 4.1,в). Тому, незважаючи на магнітне упорядкування, сумарна намагніченість антиферомагнетика у відсутності магнітного поля дорівнює нулю. Для антиферомагнетиків характерна невелика позитивна магнітна сприйливість ($\chi \approx 10^{-3} \dots 10^{-5}$), яка дуже залежить від температури. При нагріванні антиферомагнетик має фазовий перехід в парамагнітний стан. Температура переходу називається температурою Нееля. До антиферомагнетиків відносять хром, марганець, неодим, самарій та інші.

До *феримагнетиків* належать речовини, магнітні властивості яких зумовлені некомпенсованим антиферомагнетизмом (рисунки 4.1,г). Вони мають властивості, характерні для феромагнетиків, але відрізняються від них більш високим питомим опором та низькою індукцією насичення. Їх високий питомий опір зумовлений тим, що це оксиди металів, наприклад, $\text{MeO-Fe}_2\text{O}_3$, де Me - символ двовалентного металу. Низка індукція насичення пов'язана із антипаралельною орієнтацією магнітного моменту окремих атомів. З феримагнетиків найбільший інтерес мають ферити. В техніці використовують як магнітні матеріали тільки феромагнетики і ферити.

Контрольні питання до підрозділу 4.1

1. Як класифікують матеріали по відношенню до магнітного поля?
2. Що таке температура Нееля?
3. Чи залежить діамagnetизм від величини напруженості зовнішнього магнітного поля?

4.2 ПРИРОДА ФЕРОМАГНІТНОГО СТАНУ

Відомо, що магнітні властивості речовини визначаються спіновими і орбітальними магнітними моментами електронів, а також магнітними моментами ядер атомів. Для того, щоб атом мав результуючий магнітний момент, що відрізняється від нуля у відсутності магнітного поля, повинні бути некомпенсовані магнітні моменти спинів електронів на зовнішніх оболонках. Це можливо тільки в атомах із незаповненими зовнішніми оболонками. До них відносять атоми елементів перехідної групи - заліза, нікелю, кобальту та деяких рідкоземельних елементів.

Проте наявність магнітних моментів атомів ще не є достатньою умовою для існування феромагнетизму. Явище феромагнетизму можливе при наявності взаємної орієнтації постійних магнітних моментів груп атомів в одному напрямку. Тому між магнітними моментами окремих сусідніх атомів повинна бути сильна взаємодія. Подібну обмінну взаємодію неможливо описати за допомогою класичних моделей, вона являє собою квантовий ефект.

При взаємодії атомів, що мають некомпенсовані спіни, з моментом кількості руху S_K^i і S_i^K обмінна енергія пропорційна цим моментам:

$$W_K = - A S_K^i S_i^K, \quad (4.4)$$

де A - обмінний інтеграл.

Якщо відстань між атомами мала, то обмінний інтеграл негативний і енергетичне вигідним є розмагнічений стан речовини, тобто антипаралельна орієнтація сусідніх спинів атомів. Коли обмінний інтеграл значний та позитивний, що можливо при більшій відстані між атомами, то мінімуму енергії системи відповідає намагнічений до насичення стан речовини, тобто паралельна орієнтація спинів у сусідніх атомів. Якщо ж обмінний інтеграл малий (відстань між атомами велика), то переважна орієнтація спинів окремих атомів відсутня і речовина володіє слабкими магнітними властивостями (рисунк 4.2).



Рисунок 4.2 - Залежність магнітного стану речовин від міжатомної відстані

На основі викладеного, критерій переходу від антиферомагнітного стану до феромагнітного стану $a/d > 1,5$. Це дозволяє створити феромагнітні сплави, що складаються навіть із цілком немагнітних матеріалів - сплави Гейлера, наприклад, Cu_2MnAl , $MnBi$, $MnSb$ та ін.

Наявність феромагнітних властивостей у таких сплавах легко пояснити з рисунку 4.2. Невелике збільшення міжатомної відстані між іонами марганцю за рахунок упровадження у решітку немагнітних компонентів призводить до появи феромагнетизму.

Контрольні питання до підрозділу 4.2

1. При яких умовах виникає явище феромагнетизму?
2. Як залежать магнітні властивості речовин від відстані між атомами?
3. Який критерій переходу від антиферомагнітного стану до феромагнітного стану?

4.3 НАМАГНІЧУВАННЯ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

Феромагнетики складаються з великої кількості макроскопічних ділянок - доменів, які характеризуються спонтанною намагніченістю у визначеному напрямку. Утворювання доменної структури - результат єдності та протилежності двох сил: обмінної та магнітної взаємодій. На невеликій відстані переважають сили обмінної взаємодії і це призводить до паралельної орієнтації магнітних моментів атомів у невеликому об'ємі. При збільшенні розмірів тіла магнітна взаємодія сприяє разорієнтації магнітних моментів, утворюється ряд доменів, намагніченість яких рівномірна у всіх напрямках, внаслідок чого повна намагніченість феромагнетика дорівнює нулю (рисунок 4.3).

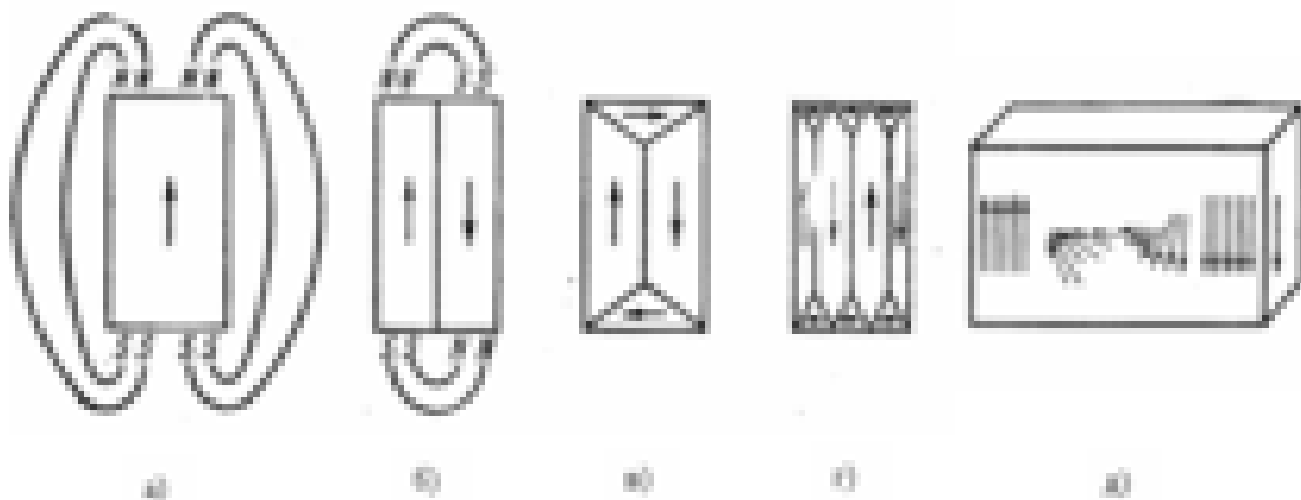


Рисунок 4.3 - Пояснення виникнення доменної структури та стінок Блоху

Розподіл об'єму речовини на домени виникає з умови мінімуму енергії системи. Коли об'єм речовини малий, то на кінцях частки виникають магнітні полюси. Виникає зовнішнє магнітне поле, яке має потенціальну енергію (рисунок 4.3,а). Це енергетичне невигідно. По мірі росту об'єму речовини виникають ділянки, в межах яких орієнтація малих моментів атомів паралельна (домени). Але орієнтація доменів така, щоб змінювати енергію системи, тобто магнітне поле повинно бути замкнено у речовині (рисунок 4.3,б). Найбільш стійким є стан, коли зменшення енергії внаслідок розділу на домени, компенсується зростанням енергії доменних меж (рисунок 4.3,в). Лінійні розміри доменів 10^{-2} - 10^{-5} см, а розмір доменних меж

(стінок Блоха) біля 100 нм. У межі стінки Блоха має місце послідовна зміна орієнтації магнітних моментів атомів від одного до другого (рисунок 4.3,д).

Якщо феромагнетик внести в магнітне поле, магнітні домени, що мають напрямок спонтанної намагніченості, що збігається чи близький до напрямку вектора зовнішнього магнітного поля, за рахунок зміщення своїх стінок збільшують об'єм, внаслідок поглинання останніх доменів. При достатньо сильному магнітному полі відбувається також поворот магнітних моментів доменів у напрямку вектора напруженості зовнішнього магнітного поля. Поворот магнітних моментів доменів кристала відбувається у напрямку більш легкого намагнічування, тобто обертання відбувається із врахуванням анізотропії кристала відносно спонтанного намагнічування. Так як для здійснення процесу обертання сумарного магнітного моменту домену необхідна достатньо велика енергія, то, як правило, обертання магнітних моментів відбувається на останній стадії намагнічування феромагнетика. При дуже великій напруженості магнітного поля феромагнетик перетворюється в один насичений магнітний домен.

Враховуючи викладене, криву намагнічування феромагнетика можна умовно розподілити на чотири ділянки (рисунок 4.4).

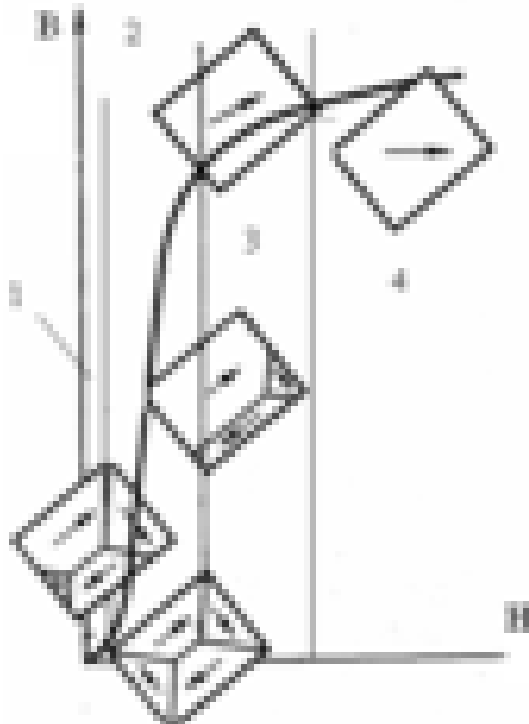


Рисунок 4.4 - Залежність магнітної індукції від напруженості зовнішнього магнітного поля

1. Ділянка зворотного зміщення стінок домену. Вона характеризується відсутністю гістерезисних явищ і ефекту Баркгаузена. При цьому проходить збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких, орієнтовані близько до напрямку зовнішнього поля внаслідок звуження стінок Блоха. Після зняття слабкого магнітного поля доменні межі повертаються у попередній стан.
2. Ділянка незворотного зміщення стінок доменів, що відповідає енергії зовнішнього магнітного поля, при якому відбуваються незворотні зміщення стінок доменів. Зазначеному зміщенню перешкоджають структурні дефекти, що зумовлюють втрати на гістерезис. Під впливом різних дефектів структури

виникають нерегулярні коливання стінок доменів, що зміщуються, які спостерігаються у вигляді електромагнітних шумів в процесі намагнічування. В цьому явищі покладена суть ефекту Баркгаузена. При такій напруженості магнітного поля зміщення доменних меж має незворотній характер. Тобто, сприятливо орієнтовані домени поглинають погано зорієнтовані.

3. Ділянка останньої стадії намагнічення, в якій відбувається поворот вектора намагнічення феромагнетика з напрямку легкого намагнічування у напрямок важкого намагнічування.
4. Ділянка насичення намагніченості. На цій ділянці феромагнетик перетворюється в єдиний домен із дуже високою намагніченістю. На цій стадії усі магнітні моменти атомів орієнтуються вздовж поля. Але цьому перешкоджає тепловий рух атомів (парапроцес).

Залежність магнітної індукції розмагніченого феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають основною кривою намагнічування. Ця залежність є основною характеристикою магнітного матеріалу.

Контрольні питання до підрозділу 4.3

1. Як виникають домени у феромагнетиків?
2. Як проходить намагнічування феромагнетика?
3. Що таке стінки Блоха?
4. Які магнітні матеріали використовуються у техніці?
5. Які властивості мають феромагнетики?

4.4 ПАРАМЕТРИ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.4.1 Магнітна анізотропія

Процес намагнічування феромагнетика залежить від його кристалічної структури. В монокристалах феромагнітних речовин розподіляють напрямки легкого та важкого намагнічувань. Кількість цих напрямків залежить від симетрії кристалічної решітки. При відсутності магнітного поля магнітні моменти доменів самовільно орієнтуються вздовж одного з напрямків легкого намагнічування. Таким чином, монокристали феромагнетиків мають анізотропію магнітних властивостей. Фізичною причиною наявності анізотропії є магнітна взаємодія між електронами, це має квантово-механічне обґрунтування.

Елементарна комірка заліза - це об'ємно-центрований куб. Напрямок легкого намагнічування - $[100]$ (рисунок 4.5). Тому у монокристалі заліза є шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування. Тоді як важке намагнічування збігається у напрямку $[111]$. У нікелю, який має гранецентровану кубічну решітку, напрямок $[111]$ є напрямком легкого, а $[100]$ - важкого намагнічування. Таким чином, нікель має 8 еквівалентних напрямків легкого намагнічування. Кристалічна решітка кобальту - гексагональна призма, тому в ній є 2 напрямки легкого намагнічування в напрямку $[0001]$, тобто магнітні моменти доменів у відсутності магнітного поля можуть орієнтуватися тільки у двох протилежних напрямках.

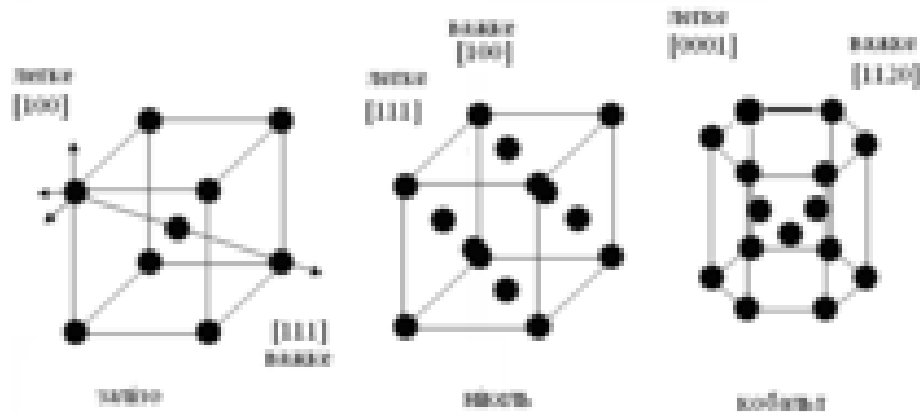


Рисунок 4.5 - Напрямки легкого та важкого намагнічування у монокристалах феромагнетиків

Для намагнічування монокристалічного зразка до насичення вздовж напрямку легкого намагнічування, треба затратити значно меншу енергію, ніж вздовж напрямку важкого намагнічування (рисунок 4.6).

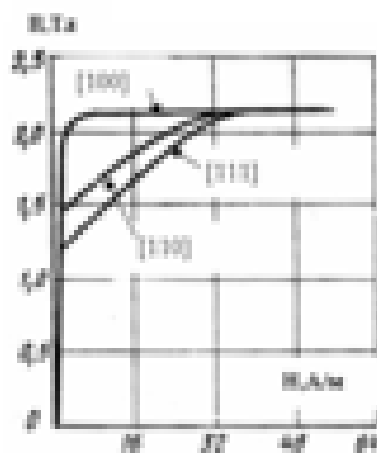


Рисунок 4.6 - Криві намагнічування для різних напрямків

Енергію зовнішнього магнітного поля необхідну для обертання вектора намагніченості феромагнітного кристалу з напрямку легкого намагнічування у напрямок важкого намагнічування, називають енергією природної магнітної кристалографічної анізотропії.

Явище магнітної анізотропії використовують при виготовленні текстурованих сталей, які мають значно кращі властивості. В текстурованих сталях напрямлення прокатки збігається з напрямками легкого намагнічування. При цьому виникає дві можливих структури прокатки - реброва та кубічна (рисунок 4.7). У випадку ребрової текстури сталь прокатують у напрямку ребра куба, тобто вздовж $[100]$, що є напрямком легкого намагнічування для заліза. Напрямок перпендикулярний прокатці та перпендикулярний товщині листа є $[110]$ (для заліза це середнє намагнічування). Тому сталь з ребровою структурою анізотропна за властивостями. У випадку кубової текстури сталь прокатують у плоскості грані куба. Таким чином, сталь з кубовою текстурою в усіх трьох напрямках має легке намагнічування. А напрямок важкого намагнічування взагалі відсутній. Тому сталь з кубовою текстурою ізотропна за властивостями.

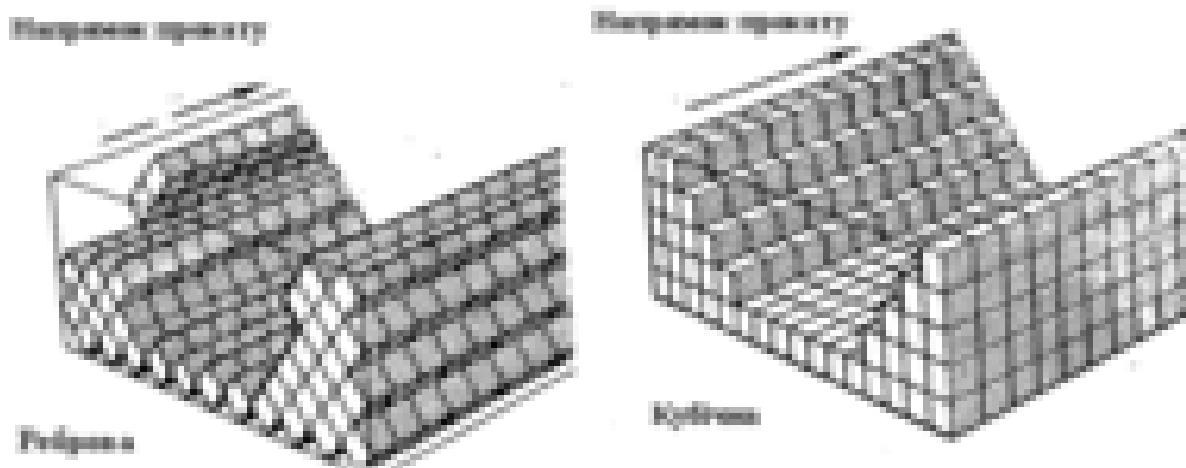


Рисунок 4.7 - Кубічна та реброва структура прокатки

4.4.2 Магнітний гістерезис

Якщо феромагнетик намагнітити до насичення B_s , а потім поступово зменшувати зовнішнє магнітне поле, то індукція не стане дорівнювати нулю коли зовнішнє поле відключиться, а буде мати деяке кінцеве значення B_r - залишкову індукцію (рисунок 4.8).

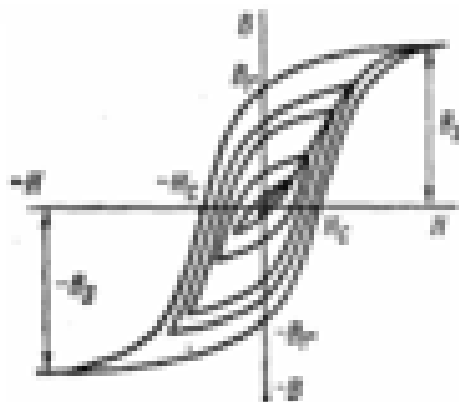


Рисунок 4.8 - Сукупність петель гістерезису при різних значеннях амплітуди напруженості змінного поля та основна крива намагнічування

Щоб зняти залишкову індукцію необхідно прикласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість поля H_c , при якій індукція у феромагнетику спочатку намагніченого до насичення, обертається у нуль, називають коерцитивною силою. Якщо проводити циклічне перемагнічування феромагнетику, то матимемо замкнуту криву, яка називається *петлею гістерезису*, а саме явище відставання індукції від напруженості поля – *гістерезисом*. Магнітний гістерезис зумовлений незворотними процесами намагнічування.

Для різних амплітудних значень напруженості зовнішнього магнітного поля можна отримати сімейство петель гістерезису. Петля гістерезису, отримана при індукції насичення, називається *граничною*. При подальшому зростанні магнітного поля площа гістерезисної петлі залишається незмінною. Сукупність вершин петель гістерезису утворює основну криву намагнічування. Параметрами петлі гістерезису є - залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c та індукція насичення B_s .

4.4.3 Магнітна проникність

Оскільки основна крива намагнічення нелінійна, є кілька засобів визначення магнітної проникності (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 - До визначення магнітної проникності

Статична магнітна проникність

$$\mu_{\text{ст}} = (1/\mu_0) \cdot (B/H). \quad (4.5)$$

Вона характеризує магнітні властивості матеріалу у постійних магнітних полях.

Динамічна (похідна) магнітна проникність

$$\mu_{\text{дин}} = (1/\mu_0) \cdot (dB/dH) \quad (4.6)$$

визначається як тангенс кута нахилу дотичу до кривої намагнічення до даної точки і характеризує магнітні властивості речовини при слабких змінних магнітних полях.

У феромагнетиках магнітна проникність є функція напруженості зовнішнього магнітного поля (рисунок 4.10).

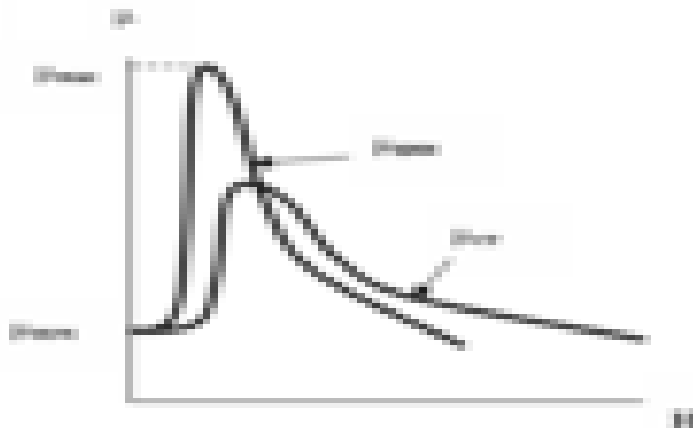


Рисунок 4.10 - Залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля

Початкова магнітна проникність

$$\mu_{\text{поч}} = (1/\mu_0) \cdot (dB/dH) \text{ (при } H \rightarrow 0) \quad (4.7)$$

визначається нахилом дотичної (перетинної) на початковій ділянці основної кривої намагнічення та характеризує магнітні властивості речовини в слабких магнітних полях.

Максимальна магнітна проникність

$$\mu_{\text{MAX}} = (1/\mu_0) \cdot d(B/dH) \text{ (при } H = H_{\text{MAX}} \text{)} \quad (4.8)$$

Зворотна, чи реверсивна, магнітна проникність

$$\mu_{\text{РЕВ}} = (1/\mu_0) \cdot (\Delta B_{\sim} / \Delta H_{\sim}) \quad (4.9)$$

характеризує магнітні властивості речовини при одночасній дії постійного та слабого змінного магнітного поля. Зміна магнітного стану у цьому випадку характеризується приватною петлею гістерезису, що викликає приріст індукції при прирості напруженості магнітного поля і фіксованому полі підмагнічування (рисунок 4.11). Магнітна проникність феромагнетиків залежить від температури, подібно сегнетоелектрикам (рисунок 4.12). Але точка Кюрі для феромагнетиків велика. Так, для заліза $T_K = 769^\circ\text{C}$, кобальту - 1131°C , а нікелю - 358°C . Тому магнітні властивості феромагнетиків практично не залежать від температури.

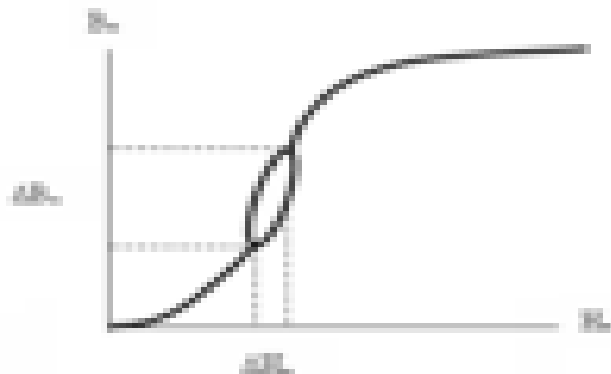


Рисунок 4.11 - До визначення зворотної магнітної проникності

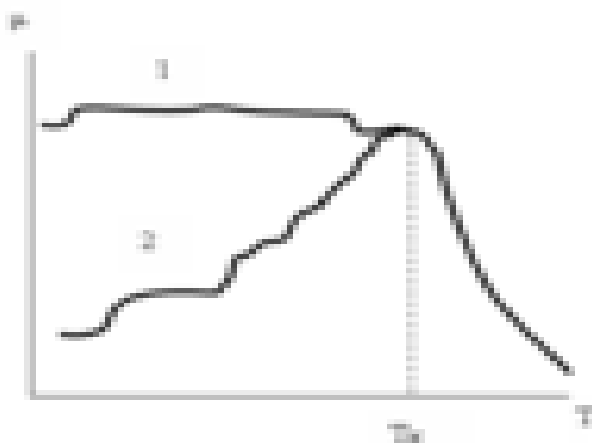


Рисунок 4.12 - Залежність магнітної проникності від температура при сильному (1) та слабкому (2) магнітному полі

Перемагнічування феромагнетиків у змінних магнітних полях супроводжується втратами енергії, яка викликає розігрів матеріалу. В загальному

випадку втрати на перемагнічування складаються з втрат на гістерезис, вихрові струми та магнітну післядію. Останній тип втрат дуже малий. Втрати на гістерезис зумовлені незворотними процесами перемагнічування. За один цикл перемагнічування втрати на гістерезис пропорційні площі петлі гістерезису, тобто потужність втрат на гістерезис дорівнює

$$P_H = \eta B_m^n \omega \cdot V, \quad (4.10)$$

де η - деякий коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу (в першу чергу від значення коерцитивної сили); B_m - максимальна індукція, яка досягається за 1 цикл перемагнічування; n - показник, який залежить від властивостей матеріалу ($n=1,6\dots2,0$); ω - кутова частота магнітного поля; V - об'єм матеріалу.

4.4.4 Магнітні втрати

Згідно (4.10) зменшувати втрати на гістерезис можливо використанням, в першу чергу, матеріалів з малою величиною коерцитивної сили. Оскільки коерцитивна сила залежить і від механічних напруг, то матеріал осердя треба ретельно відпалювати ("відпускати").

Втрати на вихровий струм виникають у провідниковому осерді внаслідок Е.Р.С. самоіндукції, яка пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. Вихрові струми виникають завжди у площині, яка розташована перпендикулярно магнітному полю.

Потужність втрат на вихрові струми визначається, як

$$P_{в.с.} = \xi \omega^2 B_m^2 \cdot V, \quad (4.11)$$

де ξ - коефіцієнт, пропорційний опору осердя, який залежить від геометрії осердя та його питомого опору.

З (4.11) виходить, що на великих частотах домінують втрати на вихрові струми, а на низьких - на гістерезис. Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно підвищити опір осердя. Це можна зробити, якщо зменшувати перетин осердя, тобто збираючи його з окремих пластин, які ізолювані одна від одної. Цей шлях ефективний при відносно низьких частотах. При великих частотах товщину листів треба робити дуже малою, що неможливо. Тому на великих частотах осердя роблять з магнітних матеріалів з великим питомим опором. В першу чергу, це ферити. При малій напруженості поля використовують магнітодіелектрики.

Втрати на магнітну післядію зумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля. Тобто, спад намагніченості феромагнетиків проходить повільно після відключення магнітного поля. Однією з основних причин магнітної післядії є теплова енергія, яка допомагає слабко закріпленим доменним межах перебороти енергетичні бар'єри, які заважають вільному їх пересуванню при зміні поля. Потужність цих втрат дуже мала.

4.4.5 Особливості феримагнетиків

Феримагнетики одержали свою назву від феритів, під якими розуміють хімічні з'єднання оксидів заліза Fe_2O_3 з оксидами інших металів.

На відміну від феромагнетиків вони мають деякі особливості:

1. Дуже великий питомий опір. Опір заліза (феромагнетик) дорівнює $\sim 0,1$ мкОм·м, тоді як у феритів він досягає від $0,001$ до 10^6 Ом·м. Це пов'язано, перш за все, з тим, що ферити являють з себе діелектрики.
2. Відносно низьку індукцію насичення. У заліза індукція насичення досягає $2,18$ Тл, тоді як у феритів тільки $0,05 \dots 0,3$ Тл.
3. У деяких феримагнетиків при деякій температурі (температура компенсації), нижче температури Кюрі, можливе зникнення магнітних властивостей.

Розглянемо ці особливості феримагнетиків на прикладі феритів зі структурою шпінелі. Хімічний склад таких феритів відповідає формулі MeFe_2O_4 - де Me - якийсь двовалентний катіон. Дослідження показують, що наявність магнітних властивостей визначається, в першу чергу, кристалічною ґраткою матеріалів. Елементарна комірка шпінелі являє собою куб, до складу якого входить 8 структурних одиниць типу MeFe_2O_4 , тобто 32 іона кисню, 16 іонів 3-валентного заліза та 8 іонів 2-валентного металу (рисунок 4.13)

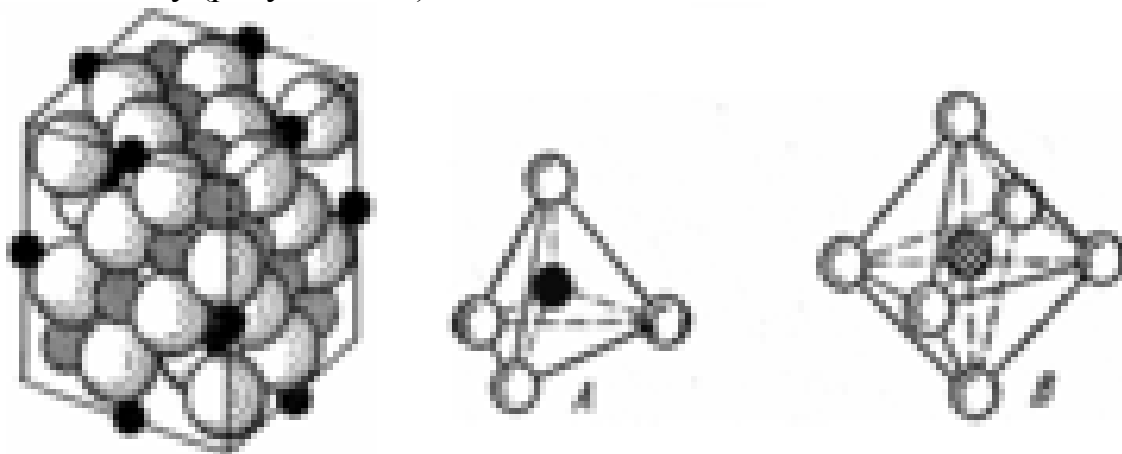


Рисунок 4.13 - Елементарна комірка шпінелі (ліворуч) та кисневі міжвузловини тетраедричного (А) та октаедричного (В) типу

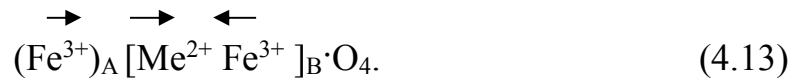
Кисневі іони розташовані за принципом кубічного упакування шарів. При цьому виникають міжвузловини двох типів: тетраедричні, які збудовані чотирма кисневими іонами та октаедричні, які збудовані шістьма іонами кисню. У цих кисневих міжвузловинах знаходяться катіони металів. Взагалі, в елементарній комірці шпінелі існує заповнених 8 тетраедричних міжвузловин (назвемо їх тип А) та 16 октаедричних заповнених міжвузловин (тип В).

Якщо усі катіони 2-валентного металу займають позиції типу А, а катіони 3-валентного заліза - позиції типу В, то таку структуру називають нормальною шпінеллю. Структурна формула нормальної шпінелі має вигляд:



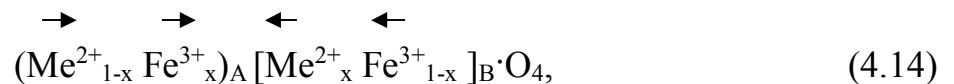
де у круглих дужках визначені іони, які займають позиції типа А, а у квадратних - іони у позиції В. Стрілками умовно позначено напрямлення магнітних моментів катіонів. В структурі нормальної шпінелі кристалізуються ферити цинку (ZnFe_2O_4), кадмію (CdFe_2O_4). Такі ферити немагнітні.

Структура, в якій катіони Me^{2+} знаходяться у позиції типа В, а катіони 3-валентного заліза у позиціях А і В, називається оборотною шпінеллю. Її структурна формула



Структуру оборотної шпінелі мають ферити нікелю (NiFe_2O_4), кобальту (CoFe_2O_4), міді (CuFe_2O_4) та ін. Ці ферити мають магнітні властивості.

Більшість дійсних феритів має проміжне розташування катіонів металів, тобто і іони Me^{2+} і Fe^{3+} займають позиції різних типів. Таку шпінель називають амфотерною. Її структурна формула



де x - ступінь оборотності шпінелі. Для нормальної шпінелі $x=0$, а для оборотної $x=1$.

Магнітні властивості таких феритів залежать від ступеню оборотності шпінелі.

Розглянемо природу магнітного упорядкування у феритах. У них магнітоактивні катіони знаходяться достатньо далеко один від одного, так як розділені аніонами кисню, який не має магнітного моменту. Тому пряма обмінна взаємодія між катіонами дуже мала, а їх електричні оболонки практично не перекриваються. Тоді, згідно критерію феромагнетизму, ферити повинні бути парамагнетиками. Але це суперечить експерименту. Теоретичне пояснення цього факту вперше дано Неелем. Він припустив, що в оксидних магнетиках значну роль відіграє непряма обмінна взаємодія за допомогою кисневих іонів.

Механізм непрямої обмінної взаємодії пояснюється рисунком 4.14.

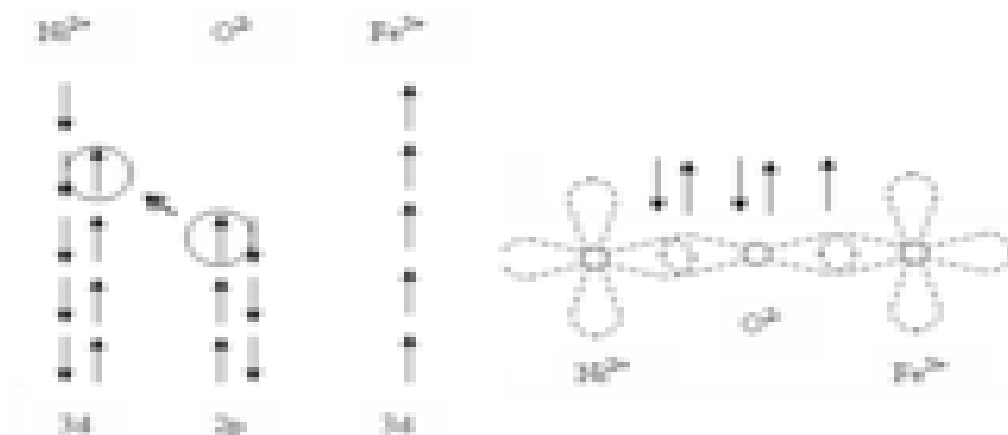
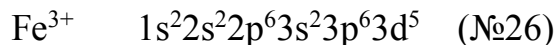


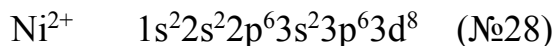
Рисунок 4.14 - Механізм непрямої обмінної взаємодії

Зовнішня 2p-оболонка кисневого аніону повністю заповнена електронами
 $O^{2-} \quad 1s^2 2s^2 2p^6 \quad (\text{№}8)$

При цьому спинові моменти попарно скомпенсовані. Залізо має незаповнену зовнішню 3d-оболонку та 5 некомпенсованих спинів



Нікель також має незаповнену зовнішню 3d-оболонку та 2 некомпенсованих спинів:



Доки 2p-оболонка кисню заповнена, він не приймає участі у непрямому обміні, а прямий обмін між іонами металів неможливий внаслідок відсутності перекриття орбіт електронів.

Якщо діамагнітний іон кисню збуджується, то він віддає електрон найближчому сусідньому катіону, наприклад, нікелю Ni^{2+} . Згідно принципу Паулі спин такого електрона повинен бути антипаралельним магнітному моменту катіона. Віддавши електрон, кисневий аніон також придбає магнітний момент і приймає участь при обмінній взаємодії з другим сусіднім катіоном - у цьому випадку з катіонами заліза. Внаслідок цієї взаємодії електронні оболонки перекриваються ($a/d < 1,5$), тобто виникає антипаралельна орієнтація магнітних моментів взаємодіючих катіонів, що узгоджується з критерієм феромагнетизму. У феронікелях розподіляють різні обмінні взаємодії між катіонами, які знаходяться в однакових, чи різних кисневих міжвузловинах, тобто взаємодії типу А-О-А, В-О-В, А-О-В. Найбільш важливою є взаємодія по типу А-О-В, так як вона забезпечує найбільше перекриття електронних оболонок взаємодіючих іонів. Можна припустити, що катіони, які знаходяться у еквівалентних положеннях в структурі шпінелі, утворюють власну підрешітку, в якій усі іони мають однакову направленість магнітного моменту. Тому спонтанна намагніченість двох підрешіток, (див. (4.13))

$$J_{MS} = J_{MB} - J_{MA} . \quad (4.15)$$

Тобто, магнетизм феритів - є некомпенсований антиферомагнетизм. Це пояснює відносно низьку індукцію насичення у феритів порівняно з феромагнетиком.

У феритах цинку та кадмію, що мають структуру нормальної шпінелі магнітний момент двовалентних іонів Zn^{2+} та Cd^{2+} дорівнює 0. Тому взаємодія типу А-О-В відсутня, а є тільки взаємодія типу В-О-В, тобто, між катіонами заліза, які знаходяться у одній підрешітці. Оскільки взаємодія В-О-В також негативна, то магнітні моменти катіонів Fe^{3+} орієнтуються антипаралельно один від одного. Внаслідок чого сумарна намагніченість дорівнює нулю, тобто, це антиферомагнетик.

Специфіка магнітного упорядкування в феритах накладає відбиток на характер температурної залежності намагнічування насиченості. При нагріві феримагнетика, внаслідок теплового руху, послаблюється орієнтаційний вплив сил обмінної взаємодії на магнітні моменти катіонів, що знижує намагніченість кожної підрешітки (А та В). В залежності від характеру температурного спаду намагнічування окремих підрешіток, результуюча крива $J_{MS}(T)$ для різних матеріалів, може принципово відрізнятися (рисунок 4.15). У більшості феритів, як і

у феромагнетиків, намагніченість насичення J_{MS} монотонно зменшується при нагріві і при деякій температурі переходу у парамагнітний стан, знижується до нуля. Таку температуру називають точкою Неєля, чи антиферомагнітною точкою Кюрі. У деяких феритів рівноважна намагніченість J_{MS} двох підрешіток може обертатися у нуль при температурі нижче точки Кюрі. Така температура називається точкою компенсації $T_{ком}$. У точці компенсації ферит стає антиферомагнетиком, а при подальшому зростанні температури у ньому виникає спонтанна намагніченість відмінна від нуля.

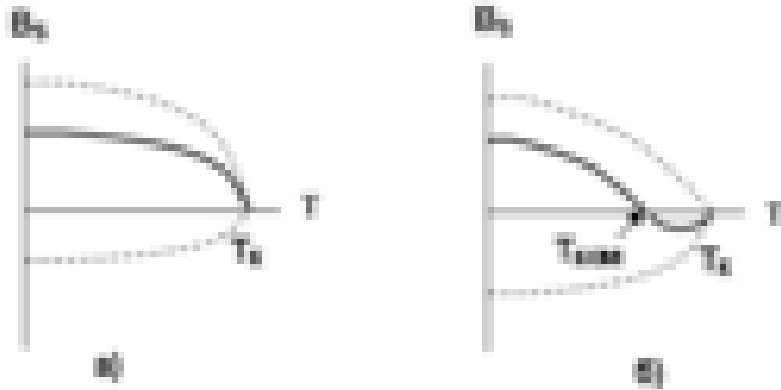


Рисунок 4.15 - Імовірні залежності індукції насичення феритів із структурою шпінелі від температури при відсутності (а) та наявності (б) точки компенсації .

Пунктирною лінією позначена намагніченість складових підрешіток

Контрольні питання до підрозділу 4.4

1. У чому виявляється та як використовується анізотропія властивостей магнітних матеріалів?
2. Що таке явище гістерезису?
3. Які види магнітної проникності використовують при визначенні властивостей магнітних матеріалів?
4. Як залежить магнітна проникність від напруженості магнітного поля та температури?
5. Які види магнітних втрат існують у феромагнетиків?
6. У чому різниця між феромагнетиками та феримагнетиками?
7. За яким видом магнітної проникності необхідне обирати магнітний матеріал для осердя, яке працює у змінних електричних полях?

4.5 ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.5.1 Класифікація магнітних матеріалів

Магнітні матеріали, які застосовуються у електронній техніці, підрозділяються на дві основні групи: магнітом'які та магнітотверді. В окрему групу виділяють матеріали спеціального призначення (рисунок 4.16).

До магнітом'яких матеріалів відносять матеріали з малою коерцитивною силою (менше 100 А/м) та великою магнітною проникністю. Вони дуже легко намагнічуються до насичення в слабких магнітних полях, мають вузьку петлю гістерезису та малі втрати на перемагнічування. Їх використовують як різні магнітопровідники: осердя трансформаторів, електромагнітів, дроселів та ін.

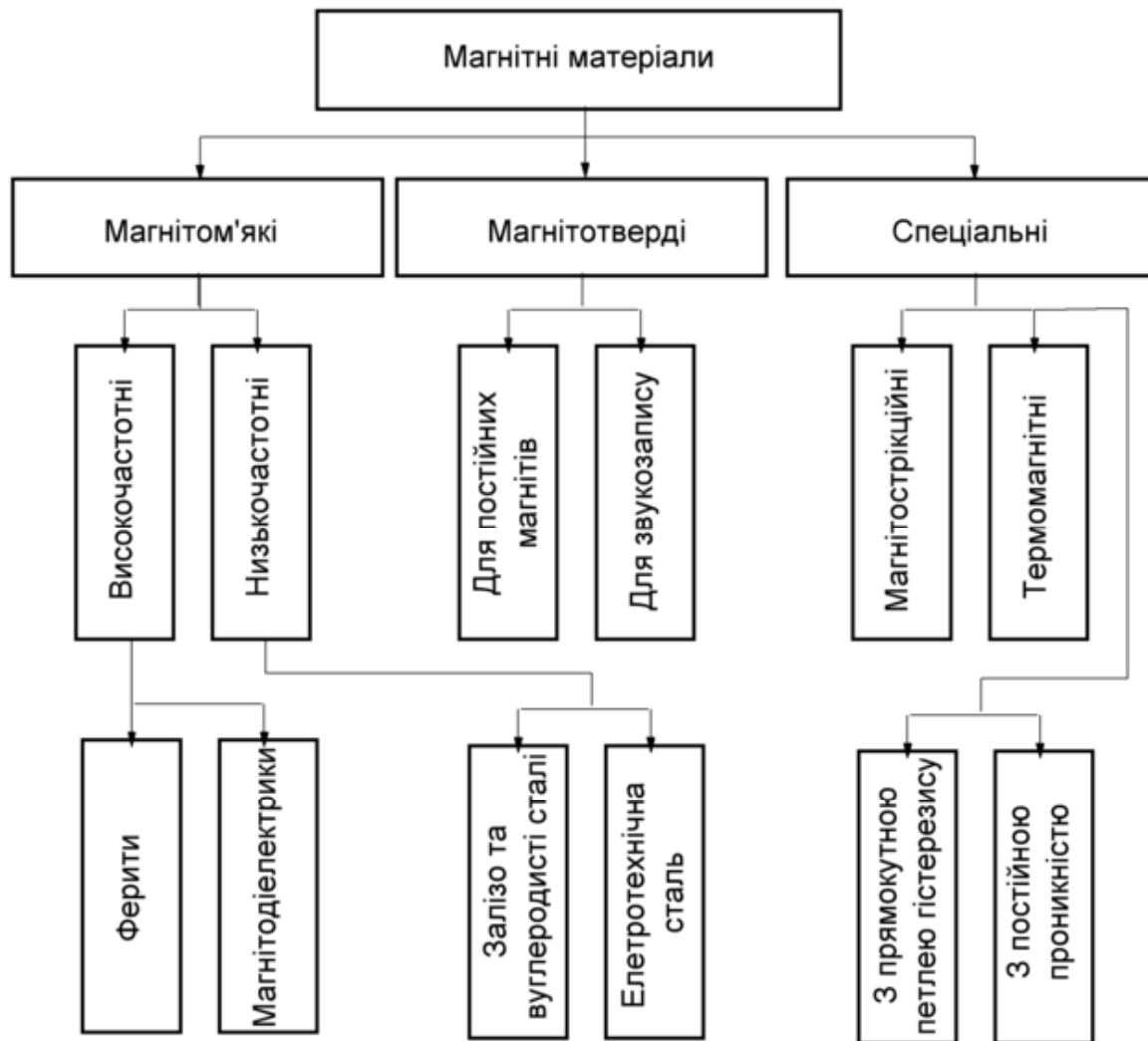


Рисунок 4.16 - Класифікація магнітних матеріалів

До магнітотвердих матеріалів відносять матеріали з великою коерцитивною силою (більше 1 кА/м). Вони здібні перемагнічуватися тільки в сильних магнітних полях, мають широку петлю гістерезису. Їх використовують для виготовлення постійних магнітів та матеріалів звукового та цифрового запису.

Серед матеріалів спеціального призначення виділяють матеріали з прямокутною петлею гістерезису, магнітострикційні, термомагнітні та з постійною магнітною проникністю у малих полях.

4.5.2 Магнітом'які матеріали для постійних та низькочастотних магнітних полів

Магнітом'які матеріали повинні мати малу коерцитивну силу (понижує втрати на гістерезис), велике значення магнітної проникності (збільшує К.К.Д.

трансформатора), велике значення індукції насичення (дозволяє зменшити габаритні розміри та масу магнітної системи), підвищений питомий опір (зменшує втрати на вихровий струм). Крім того, вони повинні мати стабільні властивості як у часі, так і по відношенню температури та механічних напруг. Такі матеріали отримують при повільному відпалі матеріалу. Це збільшує розміри доменів і зменшує площу меж між доменами, що сприяє зменшенню величини коерцитивної сили.

Основним компонентом більшості магнітних матеріалів є залізо. Серед елементарних феромагнетиків залізо має найбільшу індукцію насичення (біля 2,2 Тл). Особливе чисте залізо (електролітичне та карбонільне) утримує малу кількість домішок (менше 0,5 %). Електролітичне залізо виробляють електролізом розчину сірчанокислового чи хлористого заліза. Осаджуване на залізному катоді залізо знімають, дрібнять у порошок, відпалюють у вакуумі, після чого переплавляють теж у вакуумі.

Карбонільне залізо виробляють термічним розкладанням пентакарбонілу заліза згідно $\text{Fe}(\text{CO})_5 = \text{Fe} + 5\text{CO}$. Карбонільне залізо має вигляд тонкого порошку, що дає можливість виготовляти осердя пресуванням. В карбонільному залізі відсутні кремній, фосфор та сірка, але є вуглець. Магнітні властивості різних видів заліза приведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Властивості магнітом'яких низькочастотних матеріалів.

Матеріали	Початкова магнітна проникність	Максимальна магнітна проникність	Коерцитивна сила, А/м	Індукція насичення Тл	Питомий опір, мкОм·м
Технічне чисте залізо	250-400	3500-4500	50-100	2,18	0,1
Електролітичне залізо	600	15000	30	2,18	0,1
Карбонільне залізо	2000-3000	20000-21500	6,4	2,18	0,1
Монокристал заліза в напрямлені [100]	> 20000	1430000	0,8	2,2	0,097
Електротехнічна сталь	200-600	3000-8000	10-65	1,95-2,02	0,25-0,6
Низьконікелевий пермалой	1500-4000	15000-60000	5-32	1,0-1,6	0,45-0,9
Високонікелевий пермалой	7000-100000	50000-300000	0,65-5	0,65-1,05	0,16-0,85
Суперпермалой 79 % Ni, 5 % Mo, 15 % Fe, 0,5 % Mn	100000	до 1500000	0,3	0,8	0,6
Альсіфер 4,5 % Si, 5,6 % Al, решта. Fe	35400	117000	1,8		0,8

Домішки слабо впливають на магнітні властивості заліза, якщо їх концентрація менша межі розчинності. Низьку межу розчинності в залізі мають вуглець, кисень, азот, сірка. Тому такі домішки найбільш шкідливі. При охолодженні металу після термообробки такі домішки виділяються у вигляді мікрровключень побічних фаз, які утруднюють зміщення доменних меж у слабкому магнітному полі. Властивості заліза залежать також від структури матеріалу, розміру зерен, наявності механічних напруг.

Технічне чисте залізо утримує невелику кількість домішок сірки, вуглецю, марганцю, кремнію та інших сумарному обсязі - 0,08-0,1 %.

Кремниста електротехнічна сталь (тонколистова) є основним магнітом'яким матеріалом. Домішок в залізо кремнію підвищує питомий опір, що знижує втрати на вихровий струм. Крім того, наявність у сталі кремнію сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту, а також зв'язує кисень у SiO_2 . Останній виділяється у вигляді шлаку. Це сприяє підвищенню магнітної проникності та зменшує коерцитивну силу. Промислові марки електротехнічної сталі мають не більше 5 % кремнію. Це пов'язане з ростом крихкості та ломкості сталі, що робить неможливим штампування. Також кремній зменшує індукцію насичення. Властивості сталі зростають при її холодній прокатці внаслідок виникнення магнітної текстури (ребрової чи кубічної). Ефективне використання текстурованих сталей можливо тільки при такій конструкції магнітопровідника, при якій магнітний потік проходить вздовж напрямлення легкого намагнічування. Тому осердя з електротехнічної сталі з ребровою текстурою вигідно виготовляти у вигляді стрічки.

Марки сталей позначають чотирма цифрами.

Перша цифра позначає клас за структурним станом та прокаткою сталі:

1 - гарячекатана ізотропна; 2 - холоднокатана ізотропна; 3 - холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою; 5 - холоднокатана ізотропна з кубічною текстурою.

Друга цифра позначає кількість кремнію у сплаві: 0 – до 0,4%; ...5 – до 3,8-4,8%

Третя цифра позначає групу за основною нормованою характеристикою:

0 - питомі втрати при магнітній індукції 1,7 Тл та частоті 50 Гц; 1 - питомі втрати при індукції 1,5 Тл та частоті 50 Гц; 2 - питомі втрати при індукції 1 Тл та частоті 400 Гц; 4 - питомі втрати при індукції 0,5 Тл та частоті 3 кГц; 6 - магнітна індукція в слабких магнітних полях при $H < 0,4$ А/м; 7 - магнітна індукція при напруженості 10 А/м.

Четверта цифра позначає порядковий номер розробки

Таким чином, марка сталі 3405 означає: холоднокатану анізотропну з ребровою текстурою, з наявністю кремнію (2,8-3,8) %, рекомендована для індукції 1,7 Тл, при частоті 50 Гц, номер розробки 5. Пермалої - це залізонікелеві сплави, які мають велику магнітну проникність у низьких полях та малу коерцитивну силу. Низько-нікелеві пермалої мають (40-50) % нікелю, а високонікелеві - (72-80) %. Зміна основних магнітних властивостей нелегованих пермалоїв в залежності від складу сплаву приведена на рисунку 4.17.

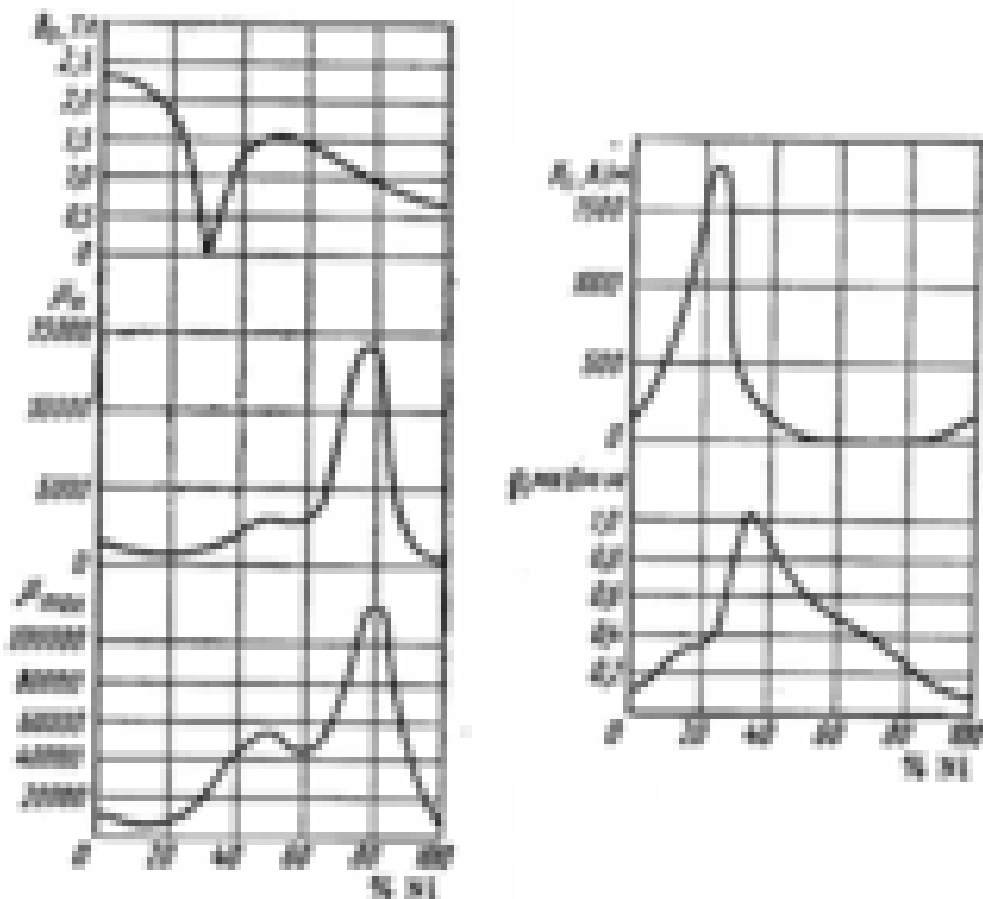


Рисунок 4.17 - Залежність магнітних властивостей від складу

Найбільше значення магнітної проникності має сплав з 78,5 % Ni. Це пояснюється відсутністю у нього магнітної анізотропії та явища магнітострикції. Внаслідок малої анізотропії полегшується обертання магнітних моментів з напрямлення легкого намагнічування в напрямлення магнітного поля, а відсутність магнітострикції не викликає появи механічних напруг, які затримують зміщення доменних меж під впливом слабого поля. Магнітні властивості пермалоїв залежать від хімічного складу, наявності домішок, режимів термообробки. Питомий опір пермалоїв малий, а магнітна проникність знижується з ростом частоти. Крім того, вартість їх вища. Для придання пермалоєм необхідних властивостей, в їх склад вводять ряд домішок: Mn та Cr - підвищує питомий опір та початкову магнітну проникність, але знижує індукцію насичення; Si - робить постійною магнітну проникність у малих полях, підвищує температурну стабільність та питомий опір; Si та Mn - збільшує питомий опір.

Згідно стандарту ДОСТ 8,377-80 пермалої підрозділяють на 3 групи:

- 1 - з нормальними магнітними властивостями.
- 2 - з підвищеними магнітними властивостями.
- 3 - з великими магнітними властивостями.

Згідно ДОСТ 10160-75 їх підрозділяють на чотири групи:

1- велика магнітна проникність ($\mu_n = 20000 \div 200000$, $\mu_{max} = 100000 - 1000000$). Це сплави марок 79НМ, 80ХС, 81НМА. 78Н та ін. Їх використовують для осердя малогабаритних трансформаторів, реле, магнітних екранів, магнітних підсилювачів.

2 - велика магнітна проникність та підвищений питомий опір ($\mu_n = 1500 - 6000$; $\mu_{max} = 15000 - 100000$, $B_s = 1,0 - 1,4$ Тл; $\rho = 0,9 - 1,0$ мкОм·м). Це сплави марок 50 НХС, 38НС. Їх використовують як осердя імпульсних трансформаторів та звукових частот.

3 - велика магнітна проникність та підвищена індукція насичення ($\mu_n = 2000 - 5000$; $\mu_{max} = 20000 - 300000$, $B_s = 1,3 - 1,5$ Тл). Це сплави марок 50Н, 50Н-ВІ. Осердя з таких матеріалів використовують для праці у постійних та змінних полях з широким діапазоном частот.

4 - з прямокутною петлею гістерезису. Це сплави 50НП, 68НМП, 79НМП. Їх використовують у запам'ятовуючих пристроях.

Альсіфери - це потрійні сплави заліза з кремнієм та алюмінієм. Оптимальний склад 9,5 % Si, 5,6 % Al, ост. Fe. З альсіферу виготовляють магнітні екрани, корпуси пристроїв. Він дуже крихкий.

4.5.3 Магнітном'які високочастотні матеріали

Під високочастотними магнітном'якими матеріалами розуміють магнітні речовини, які працюють при частотах вище декількох сотень герц. Згідно частотним властивостям їх підрозділяють на матеріали для звукових, ультразвукових, низьких радіочастот, високих радіочастот та надвисоких радіочастот. Такі матеріали в першу чергу повинні мати великий питомий опір, що зменшує втрати на вихровий струм. Їх підрозділяють на ферити та магнітодіелектрики.

Ферити

Ферити - це оксидні магнітні матеріали, спонтанна намагніченість доменів в яких зумовлена некомпенсованим антиферомагнетизмом.

Ферити виробляють у вигляді кераміки по технології виробництва радіокераміки.

Як початкову сировину використовують окисли відповідних металів. Окисли дрібнять та перемішують, після чого брикетують та відпалюють на повітрі. Брикети знову дрібнять у феримагнітний порошок.

Його пластифікують водним розчином полівінільного спирту та формують вироби засобами пресування чи гарячого лиття. Відформовані вироби печуть. Ферити дуже тверді та крихкі матеріали. Їх можливо тільки шліфувати та полірувати.

Найбільш поширені дві групи феритів: марганцево-цинкові та нікель-цинкові. Марганцево-цинкові ферити мають менші втрати на гістерезис, більшу індукцію насичення, але меншу робочу частоту.

Марганцево-цинкові ферити працюють на частотах до декілька МГц, а нікель-цинкові - до сотень МГц.

Згідно до умов експлуатації їх умовно ділять на 11 груп (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 - Групи та марки феритів

№	Назва групи	Використання	Марки	
			Нікель-цинкові	Марганцево-цинкові
I	Загального призначення	Як осердя дроселів, трансформаторів, антен на частотах до 30 МГц	100НН, 400НН, 600НН, 1000НН, 2000НН	1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ
II	Термостабільні	Мають температурно стабільні параметри нікель-цинкові до 100 МГц, марганцево-цинкові - до 3 Гц	7ВН, 20ВН, 30ВН, 50ВН, 100ВН, 150ВН	700НМ, 1000НМЗ, 1500НМЗ, 2000НМЗ
III	Високо проникливі	Як осердя трансформаторів, статичних перетворювачів	—	4000НМ, 6000НМ, 10000НМ, 20000НМ
IV	Для телевізійної техніки	Осердя рядкових трансформаторів	—	2500НМС1, 3000НМС
V	Для імпульсних трансформаторів	Осердя імпульсних трансформаторів	300ННИ, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ	1100НМИ
VI	Для перенастроюваних контурів	Осердя контурів	10ВНП, 35ВНП, 55ВНП, 60ВНП, 65ВНП, 90ВНП, 150ВНП, 200ВН	—
VII	Для широкосмугових трансформаторів	Осердя потужних узгоджувальних трансформаторів	50ВНС, 90ВНС, 200ВНС, 300ВНС	—
VIII	Для магнітних головок	Виготовлення осердя головок запису, відтворення, стирання	500НТ, 500НТ1, 1000НТ, 2000НТ	500МТ, 1000МТ, 2000МТ, 5000МТ
IX	Для датчиків температури	Осердя індуктивних датчиків температури	1200НН, 800НН, 1200Н1	—
X	Для магнітного екранування	Екрани радіочастотних полів	200ВНРП, 800ВНРП	—
XI	Для приладів, працюючих на основі ядерного ефекту Оверхаузера	Як матеріали ядерного магнітного резонансу	1,5СЧИ, 3,0СЧИ	—

Магнітні властивості феритів деяких груп приведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Властивості деяких феритів

Марка	Початкова магнітна проникність	Максимальна магнітна проникність	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова індукція Тл	Межова частота МГц	Питомий опір, Ом·м	Група
20000НМ	15000	35000	0,24	0,11	0,1	0,001	III
6000НМ	4800-8000	10000	8	0,11	0,5	0,1	
1000НН	800-1200	3000	24	0,1	3	10	II
600НН	500-800	1500	40	0,12	5	100	
2000НМ1	1700-2500	3500	25	0,12	1,5	5	
700НМ1	550-850	1800	25	0,05	8	4	VI
100ВН	80-120	280	300	0,15	80	10 ⁵	
300ВНП	286-350	600	80	0,13	20	10 ⁶	VII
200ВНС	180-220	360	70	0,11	20	10 ³	VII
50ВНС	45-65	200	100	0,14	85		

Магнітодіелектрики

Магнітодіелектрики - це конгломерат із подрібненого феромагнетиту, частки якого ізольовані один від одного шарами з немагнітного матеріалу, який використовується також, як і механічна зв'язка.

Як магнітний матеріал у магнітодіелектриках використовують карбонільне залізо, альсіфер та пермалой.

Ізольуючою зв'язкою буває фенол-формальдегідна смола, полістирол, скло та інші. Порівняно з феритами, вони мають кращу стабільність властивостей у часі.

Максимальна температура праці не перевищує 100-120 °С, а часова зміна початкової магнітної проникності не перевищує (0,2...2) % у рік.

Втрати в магнітодіелектриках складаються з втрат на вихровий струм, післядію, гістерезис та діелектричні втрати, що викликає підвищення активного опору індуктивної котушки з осердям з магнітодіелектрика.

Магнітодіелектрики використовують, перш за все, як осердя котушок індуктивності. Осердя на основі карбонільного заліза мають велику стабільність, малі втрати, позитивний температурний коефіцієнт магнітної проникності, та можуть використовуватися у широкому діапазоні частот.

Магнітодіелектрики на основі альсіферу мають термостабільні властивості, малу вартість.

Магнітодіелектрики на основі пермалою мають велику початкову магнітну проникність, магнітні втрати в них менші ніж у випадку альсіферу, а стабільність параметрів у часі вища.

Параметри осердя з магнітодіелектриків приведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Основні параметри магнітодіелектриків

Марка	Початкова магнітна проникність	Магнітні втрати на частоті 100 кГц $\text{tg}\delta_m$	Температурний коефіцієнт магнітної проникності, K^{-1}	Гранична частота, МГц	Матеріал
ТЧ90	79-91	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$- 6 \cdot 10^{-4}$	0,02	альсіфер
ВЧ32	28-33	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$- 2,5 \cdot 10^{-4}$	0,2	альсіфер
ВЧК22	19-24	$4,6,3 \cdot 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	0,7	альсіфер
P10	13-15	$(1,5-2,5) \cdot 10^{-4}$	$(2,5-8) \cdot 10^{-5}$	10	карбонільне залізо
P100	9-10	$(5-10) \cdot 10^{-5}$	$(5-10) \cdot 10^{-5}$	100	карбонільне залізо
ПС	11.13	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$(2,5-10) \cdot 10^{-5}$	20	карбонільне залізо
П250	230	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03	пермалой

4.5.4 Магнітнотверді матеріали

За призначенням магнітнотверді матеріали можна розділити на матеріали для постійних магнітів та матеріали для запису та тривалого збереження звуку, зображення, цифрового запису та інше.

Матеріали для постійних магнітів

Магнітні кола з постійними магнітами повинні бути розімкнутими, тобто, мати робочий повітряний зазор. Магнітний потік в зазорі виникає після попереднього намагнічування матеріалу у дужому магнітному полі. При наявності зазору внаслідок вільних полюсів виникає внутрішнє поле H_d , що розмагнічує та зменшує індукцію усередині магніту до значення B_d . Положення робочої точки, що характеризує стан магнітного матеріалу, залежить від значення зазору (рисунок 4.18).

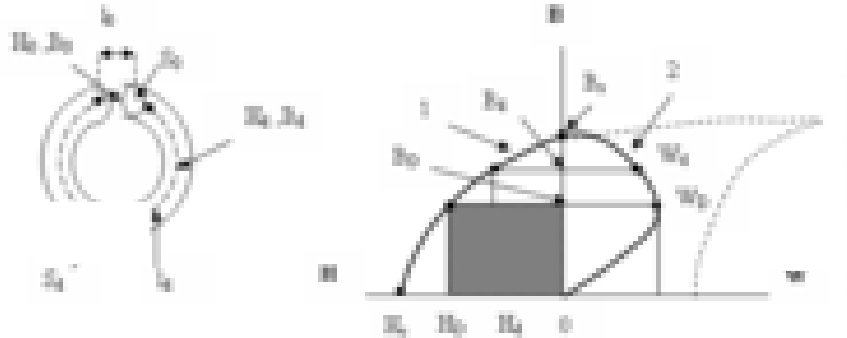


Рисунок 4.18 - Магнітне коло з повітряним зазором

При відсутності зовнішнього магнітного поля макроскопічні струми відсутні. Згідно закону повного струму:

$$\oint H dl = 0, \quad H_d l_d - H_0 l_0 = 0, \quad (4.16)$$

де l_d , H_d - довжина магніту та повітряного зазору, відповідно.

H_d - напруженість поля у середовищі магніту.

H_0 - напруженість поля у зазорі.

Зважаючи на те, що магнітна індукція безперервна

$$B_d \cdot S_d = B_0 \cdot S_0, \quad (4.17)$$

де B_0 , B_d - магнітна індукція у зазорі та середовищі магніту, відповідно.

Важливішим для магніту є необхідність мати максимальну магнітну енергію W_0 у робочому зазорі

$$W_0 = B_0 \cdot H_0 / (2 \cdot V_0), \quad (4.18)$$

де $V_0 \approx l_0 \cdot S_0$ - об'єм зазору.

З (4.16) - (4.18) виходить

$$W_0 = B_d \cdot H_d / (2 \cdot V_d), \quad (4.19)$$

де $V_d \approx l_d \cdot S_d$ - об'єм магніту.

Тоді питома магнітна енергія в повітряному зазорі дорівнює

$$W_d = W_0 / V_d = B_d \cdot H_d / 2. \quad (4.20)$$

При замкнутому магніті $B_d = B_r$ тоді енергія зазору дорівнює 0, оскільки $H_d = 0$. Якщо зазор дуже великий, то енергія теж прямує до 0, оскільки $B_d = 0$, $H = H_c$ і тільки при деяких значеннях B_D та H_D енергія досягає максимального значення. Ось чому

$$W_D = B_D \cdot H_D / 2 = W_{dmax} \quad (4.21)$$

визначає максимальне використання магніту і є найважливішою характеристикою якості магніту.

Крім того, матеріали для постійних магнітів повинні мати велику коерцитивну силу H_C та залишкову індукцію B_r . Значення коерцитивної сили можливо підвищити, якщо в середовищі матеріалу припустити включення другої фази, яка буде перешкоджати зміщенню доменних меж, чи приводити запалку магнітного матеріалу, яка сприяє мілкозернистій будові матеріалу, що також підвищує коерцитивну силу. Більше значення коерцитивної сили сприяє більшій тривалості намагнічення магніту. Для більшого значення максимальної енергії повітряного зазору необхідне також велике значення залишкової індукції.

Найважливішими матеріалами для виготовлення постійних магнітів є: сплави типа Fe-Ni-Al (висококоерцитивні литі сплави), порошкові матеріали (металокерамічні, металопластичні), магнітотверді ферити ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$ та ін.), сплави на основі рідкоземельних матеріалів ($SmCo_5$, $PrCo_5$ та ін.). Їх властивості приведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Властивості сплавів для виготовлення постійних магнітів

Марка сплаву	Склад	W_D , кДж/м ³	H_C , кА/м	B_r , Тл	Особливості структури
1. Литі висококоерцитивні сплави					
ЮНТС	Fe-Ni-Al, леговані титаном та кремнієм	4,0	58	0,43	Рівноважна кристалічна структура
ЮНДК18	Fe-Ni-Al-Co, леговані міддю	9,7	55	0,9	Рівноважна кристалічна структура
ЮН15ДК24	Fe-Ni-Al-Co, леговані міддю	18	52	1,15	Рівноважна кристалічна структура
ЮНДК31ТЗБА	Fe-Ni-Al-Co, леговані міддю, титаном, кобальтом	32	92	1,15	Стовбчасті
ЮНДК35Т5АА	Fe-Ni-Al-Co, леговані міддю, титаном, кобальтом	40	115	1,05	Монокристалічні
ЮНДК40Т8АА	Fe-Ni-Al-Co, ле-говані міддю, ти-таном, кобальтом	32	145	0,9	Монокристалічні
2. Металокерамічні магніти					
ММК4	Fe-Ni-Al-Co,	4,5	40	0,55	—
ММК8	Fe-Ni-Al-Co	14	40	1,10	—
ММК11	Fe-Ni-Al-Co	16	128	0,7	—
3. Магнітотверді ферити					
6БИ240	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	3	125	0,19	ізотропні
16БА190	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	8	185	0,3	анізотропні
25БА150	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	12,5	150	0,38	анізотропні
24БА210	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	12,0	210	0,37	анізотропні
11КА135	$CoO \cdot Fe_2O_3$	5,5	135	0,24	анізотропні
2КА	$CoO \cdot Fe_2O_3$	7,5	128	0,28	анізотропні
4. Сплави на основі рідкоземельних елементів					
КС37	$SmCo_5$	55	540	0,77	—
КСП37	$Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_5$	73	640	0,90	—

До групи високоерцитивних литих сплавів відносять сплави систем Fe-Ni-Al та Fe-Ni - Al-Co, модифіковані різними домішками. Високоерцитивний стан цих сплавів зумовлений їх дисперсійним розпадом на дві фази при охолодженні. Виділення однієї фази мають форму пластинок чи стержнів однодоменної товщини. Вони близькі за станом до заліза і мають значні магнітні властивості. Друга фаза включає в собі нікель та алюміній і не є магнітною. Матеріали з такою структурою намагнічуються внаслідок обертання магнітних моментів доменів, тому вони мають велике значення коерцитивної сили. Сплави системи Fe-Ni-Al мають найбільшу енергію повітряного зазору при складі 28 % Ni, 14 % Al, ост. Fe. Домішки підвищують магнітні властивості, покращують часову стабільність, полегшують термообробку. Крім того, такі сплави охолоджують у сильному магнітному полі, що приводить до виникнення як кристалічної, так і магнітної текстур. Це поліпшує властивості магнітів.

Недоліком сплавів Fe-Ni-Al та Fe-Ni - Al-Co є їх велика крихкість та твердість, тому магніти з них виготовляють тільки шляхом лиття з послідуною шліфовкою.

Неможливість виробляти дрібні вироби з необхідними розмірами з литих Fe-Ni-Al сплавів, зумовило їх виробництво з порошків засобами порошкової металургії. Це, перш за все, металокерамічні та металопластичні.

Металокерамічні виготовляють шляхом пресування порошку тонкодисперсних магнітотвердих сплавів з послідуою спіканням при великих температурах згідно технології кераміки.

Процес виготовлення металопластичних магнітів подібний процесу пресування виробів з пластмас, але у порошку наповнювача є зерна подрібненого магнітотвердого матеріалу.

Магнітокерамічні магніти мають пористість 3-5 %, магнітна енергія у них менша на 10-20 % ніж у литих сплавів, але за механічною міцністю вони краще литих у 3-6 разів.

Властивості металопластичних матеріалів значно гірші, але технологія їх виготовлення простіша і вони мають великий питомий опір, що дозволяє використовувати ці магніти у змінних магнітних полях.

Магнітотверді ферити виготовляють з $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (барієві ферити), $\text{CoO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (вектоліт), $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ферит стронцію). Найбільш поширені барієві ферити. Вони мають значний питомий опір, що дозволяє використовувати їх у змінних магнітних полях, дешеві, мають просту технологію виготовлення, меншу вагу, ніж литі сплави. Але мають велику крихкість та твердість. Крім того, їх властивості значно залежать від температури. Ферити стронцію мають подібні магнітні властивості як і барієві, але мають кращу технологічність.

Кобальтові ферити мають кращі параметри, менше залежать від температури, але мають велику вартість.

Сплави на основі рідкоземельних матеріалів мають найкращі значення коерцитивної сили та енергію повітряного зазору. Найбільшу цікавість мають інтерметалеві з'єднання типу RCo чи R_2Co_{17} - де R - рідкоземельний елемент. Високоерцитивний стан таких сплавів зумовлений значною анізотропією кристалу, великою самовільною намагніченістю, значною магнітострикцією та великою точкою Кюрі. Існують три напрямки їх виготовлення:

1. Холодне пресування порошку.

2. Спікання брикетів з порошку при наявності рідкої фази.

3. Лиття багатокомпонентних сплавів.

Температурна стабільність таких сплавів дуже висока. Використання магнітів на їх основі потребує рішення багатьох кількостей питань - побудови потужних намагнічуючих пристроїв, вимірювальної апаратури, нових конструкцій магнітних систем.

Матеріали для звукозапису

До магнітотвердих матеріалів відносять магнітні стрічки для відео-, звукозапису, а також для запису, зберігання та відтворювання інформації в ЕОМ. Для цих цілей використовують металеві стрічки чи дроти, а також стрічки на пластмасовій основі з порошковим робочим шаром. Металеві стрічки використовують тільки в спеціальних цілях при роботі у широкому діапазоні температур. Стрічки на пластмасовій основі більш поширені.

Основне призначення носія магнітного запису складається у виникненні на поверхні відтворювальної головки магнітного поля, яке змінюється у часі, таким чином, як змінювався записуваний сигнал. Тому вимоги до таких матеріалів протилежні.

Коерцитивна сила, з однієї сторони, повинна бути великою, щоб інформація зберігалася тривалий час. З другої сторони, велика коерцитивна сила утруднює запис інформації на диск. Крім того, з ростом коерцитивної сили зменшується і "копір-ефект", тобто намагнічування ділянками стрічки, сусідніх ділянок у поблизу лежачих сусідніх витках. Тому оптимальною є коерцитивна сила приблизно 20-50 кА/м. Залишкова намагніченість матеріалу повинна бути найбільш значною. Зберігання записаної інформації сприяє прямокутна петля гістерезису, але у звукозапису це звужує частотний діапазон. Стрічка повинна бути гнучкою, гладенькою та щоб вона не розтягувалася. Крім того, їх треба з'єднувати без втрати інформації. Робочий шар повинен бути тонким та достатньо твердим, щоб не стирався головкою, але він не повинен шкрябати головки.

Промисловість випускає магнітофонні стрічки з нержавіючого сплаву ЕП-31А та біметалу ЕП-352/353. Товщина стрічок 0,005-0,1 мм, $H_c = 24-40$ кА/м, $B_r = 0,08$ Тл. Але вони відносно дорогі.

Найбільш поширені магнітні стрічки на полімерній основі. Такі стрічки виготовляють нанесенням магнітного лаку на тонку плівку полімеру. Магнітний лак містить у собі магнітний порошок, зв'язуючи речовину, розчинник та домішки, які сприяють змочуванню та розподілу часток порошку та зменшенню абразивності матеріалу. Основою магнітних стрічок є: діацетат целюлози, триацетат целюлози, поліетелентерефталат (лавсан). Останній має найкращі властивості. Частки порошку повинні мати витягнуту (голчату) форму з довжиною 0,4-1,0 мкм та відношенням довжини до діаметру приблизно 3-10. Лак наносять на стрічку полімеру та відразу улаштовують у сильне магнітне поле до висихання. Це сприяє орієнтації магнітних часток вздовж напрямлення, у якому вони будуть рухатися при намагнічуванні у ході запису. Для гладкості, стрічку каландрірують, тобто пропускають крізь нагріті поліровані вальки.

Як магнітний компонент, найбільш поширений $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ з дрібними однодоменними частками. Зменшення росту розміру магнітних часток до 0,3-0,4 мкм при відношенні їх довжини до діаметра, приблизно 3, покращує якість

магнітних стрічок (зменшує шуми). Домішок магнетиту Fe_3O_4 до $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ дозволяє досягнути більшого значення коерцитивної сили.

Використання порошку CrO_2 дозволило мати велику коерцитивну силу та підвищену чутливість до високих частот. Використання стрічок з подвійним шаром на основі $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та CrO_2 дозволило мати добру чутливість, як на низьких ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) так і на великих (CrO_2) частотах.

У теперішній час використовують стрічки на полімерній основі з робочим шаром з дрібних часток хімічно чистого заліза чи феромагнітних сплавів. Це дозволяє, при швидкостях протягу стрічок 4,76 см/с, відпроваджувати частоти від 10 до 27000 кГц. Нанесення металевих шарів на лавсанову основу виконують засобами хімічного поновлення, електроосадування чи термічного осадування у вакуумі. Але вартість цих стрічок велика. В наступний час це направлення розвивається.

Магнітні гнучкі диски для ЕОМ виготовляють подібним засобом. Як основу в них, використовують лавсан чи спеціальні полімери. Товщина магнітного лаку в них від 2-8 мкм для феролаків, 8-10 мкм для двошарових та 0,1-0,5 мкм для металевих. Зменшення товщини робочого шару підвищує щільність запису. Основою жорстких дисків є алюмінієві сплави типу Д16МП. Товщина 1,27 мм. Їх поверхню покривають гальваноманітними сплавами товщиною 0,5-1 мкм, а у випадку феролаків до 5 мкм. Необхідно запобігати механічну деформацію дисків.

4.5.5 Інші магнітні матеріали

Це матеріали з прямокутною формою петлі гістерезису, з постійною магнітною проникністю в малих полях, магнітострикційні та термомагнітні. Магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ПКГ) використовують в обчислювальній техніці, пристроях автоматики, телеграфії. Осердя з таких матеріалів мають два стійких магнітних стани, відповідно різним напрямкам залишкової магнітної індукції. Тому їх використовують як елементи збереження та переробки подвійної інформації. Одним з найважливіших їх параметрів є коефіцієнт прямокутності $K_{\text{ПК}} = B_r / B_{\text{max}}$, де B_{max} вимірюють при $B_{\text{max}} = 5H_c$. Треба, щоб $K_{\text{ПК}}$ був як найближче до 1. Крім того, для оцінки швидкості, використовують параметр S_q , який дорівнює кількості електрики на одиницю товщини осердя, яке необхідно для перемагнічування з одного стану залишкової індукції до другого. Він повинен бути найменшим. Як матеріали з ПКГ використовують ферити на основі магнієво-марганцевих та літєвих ферошпінелів та стрічкові мікронні осердя з пермалою.

Ферити для НВЧ діапазону необхідні для роботи хвилеводів у діапазоні частот з довжиною від 1 м до 1 мм, коли треба керувати цими коливаннями: переключати потік енергії з одного напрямку на інший, змінювати фазу коливань, обертати площину коливань, поглинати потужність потоку та ін. Практичне використання феритів НВЧ засновано на магнітооптичному ефекті Фарадея, ефекті феромагнітного резонансу та зміні зовнішнім магнітним полем значення магнітної проникності фериту. Магнітооптичний ефект Фарадея полягає у обертанні площини поляризації високочастотних коливань у намагніченому зовнішнім магнітним полем фериті. Феромагнітний резонанс має місце при однаковій частоті зовнішнього збудженого поля з власною частотою прецесії спинів електронів.

НВЧ ферити повинні мати вузьку смугу резонансу, велику чутливість до керуючого магнітного поля, великий питомий опір (10^6 - 10^8 Ом·м), малий тангенс кута діелектричних втрат 10^{-3} - 10^{-4}), температурну стабільність властивостей, велику точку Кюрі та інколи інші вимоги.

Як НВЧ, ферити використовують літієві, магнієво-марганцеві ферошпінелі, а також ферогранати ітрію.

Магнітострикційними називають матеріали, використання яких обґрунтовано на явищі магнітострикції, тобто зміни розмірів тіла в магнітному полі, чи на магнітопружному ефекті, тобто зміні магнітних властивостей матеріалів під впливом механічних дій. З них виготовляють сердечники електромеханічних перетворювачів, для ультразвукової техніки та акустики, фільтрів та резонаторів, ліній затримки. Так, магнітостриктори, які працюють на ультрависоких частотах, дозволяють проводити профільну обробку крихких та твердих матеріалів.

До магнітострикційних матеріалів відносять нікель, сплави заліза з платиною, заліза з кобальтом та алюмінієм. Поширено використання феритової кераміки на основі фериту нікелю.

Магнітні матеріали з постійною магнітною проникністю в слабких полях використовують для виготовлення магнітних підсилювачів. До них відносять пермівар та ізотерм.

Пермівар - це потрібний сплав системи Fe-Ni-Co (25,45 та 30% відповідно). Він має малу коерцитивну силу, початкову проникність 300, яка не змінюється при напруженості зовнішнього поля від 0 до 240 А/м та до індукції 0,1 Тл. Але стабільність його невелика.

Більш стабільний сплав ізотерм системи Fe-Ni-Co-Al-Cu. Магнітна проникність у нього 30-80 та не змінюється до напруженості зовнішнього магнітного поля 400-500 А/м.

Термомагнітні матеріали використовують для компенсації температурної нестабільності в пристроях, яка викликана зміною індукції постійних магнітів чи опором провідників. Поблизу точки Кюрі магнітні властивості значно зменшуються, тому термомагнітні матеріали мають невелику точку Кюрі (від 0 до 100 °С). Перш за все, це сплави Ni-Cu (кальмалой). Точка Кюрі змінюється від 30 до 30 °С в залежності від домішки міді (від 30 до 40%), але він має мале магнітне насичення.

Кращі властивості мають сплави Fe-Ni-Cr (компенсатори). Вони мають зворотність властивостей у діапазоні температур -7...+180 °С, достатню намагніченість. Це сплави марки 31НХЗГ2, 31НХЗГ.

Контрольні питання до підрозділу 4.5

1. Які галузі використання магнітних матеріалів?
2. Які магнітні матеріали використовуються на великих частотах?
3. Що таке магнітодіелектрики?
4. Які матеріали відносять до магнітотвердих?
5. Які галузі використання магнітотвердих матеріалів?
6. Що таке магнітострикційні матеріали? Де вони використовуються?
7. Для чого використовують магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису?
8. Для чого використовують матеріали з постійною магнітною проникністю?

ЛІТЕРАТУРА

1. Завадський В.А., Дранчук С.М. Матеріали електронної техніки. – Одеса: ОНМА, 2005.– 144 с.
2. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высш.шк., 1986. - 367 с.
3. Пасынков В.В. Материалы электронной техники.- М.:Высш.шк., 1980.- 406 с.
4. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.Н. Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 304 с.
5. Материалы микроэлектронной техники./ Андреев В.М., Бронгулеева А.Н., Дацко С.Н., Яманова Л.В. – М.:Радио и связь, 1989. – 352 с.
6. Материалы для производства изделий электронной техники./Г.Н.Кадыкова, Г.С.Фонарев, В.Д.Хвостикова и др. – М.:Высш.шк., 1987. – 247 с.
7. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ. - М.: Высш.шк., 1991. - 416 с.
8. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация./ Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.:Высшая школа, 1984. – 392 с.
9. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. – М.:Высш. шк., 1986. – 352 с.
- 10.Штофа Ян Электротехнические материалы в вопросах и ответах.- М.:Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
11. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справ. / Н.Н.Акимов, Е.П.Ващуков, В.А.Прохоренко, Ю.П.Ходоренко. - Мн.: Беларусь, 1994. - 591 с.
12. Справочник по электротехническим материалам. В 3 –х томах.
Т.1/ Под ред.Ю.Б.Корицкого и др.-М.:Энергоатомиздат,1986. – 368 с.
Т.2/ Под ред.Ю.Б.Корицкого и др.-М.:Энергоатомиздат,1987. – 464 с.
Т.3/ Под ред.Ю.Б.Корицкого и др.-Л.:Энергоатомиздат,1988. – 728 с.
13. Беляков В.А. Жидкие кристаллы. – М.:Знание,1986. – 160 с.
- 14.Конструкционные и электротехнические материалы./ В.Н.Бородулин, А.С.Воробьёв, С.Я.Попов и шк.; Под ред. В.А.Филикова.-М.: Высш.шк., 1990. – 296 с.
- 15.Мокрицький В.А., Дранчук С.М., Андріанов О.В., Ленков С.В., Зубарєв В.В. Фізико-хімічні основи мікроелектроніки; Підруч.-Одеса: вид-во"ТЕС",2002. – 712 с.
- 16.Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. – СПб.: Питер, 2003. – 512с.
- 17.Мокрицький В.А., Дранчук С.М., Андріанов О.В. Фізичні основи мікроелектроніки: монографія: у 2-х томах. Том 2: Матеріалознавство, конструкторсько-технологічні основи мікроелектроніки – Одеса: Екологія, 2018. – 264 с.
18. Завадский В.А., Михайлов С.А. Элементная база судовой электронной аппаратуры: Учебное пособие, Одесса: ОНМА, 2006. – 309 с.
- 19.Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств. Учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.