МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ»

(*для здобувачів вищої освіти спеціальностей 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,171 «Електроніка»,153 «Мікро- та наносистемна техніка»*)

(*електронне видання*)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електронних апаратів
Протокол №9 від 21.04.2021

Сєвєродонецьк, 2021р.

УДК 681.3

Конспект лекцій з дисципліни «Матеріали електронної техніки» (для здобувачів вищої освіти спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», 171 «Електроніка»,153 «Мікро- та наносистемна техніка») (електронне видання) /Уклад.: Ж.Г.Самойлова. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім.В. Даля, 2021. – 163 с.

В курсі лекцій з дисципліни «Матеріали електронної техніки» розглянуто склад основних матеріалів електронної техніки. Велика увага приділена розгляду і аналізу матеріалів провідників, напівпровідників та діелектриків**.** Конспект лекцій може бути використаний студентами при підготовки к заняттям.

Укладач: Ж.Г. Самойлова, к.т.н., доц.

Рецензент: М.Г. Лорія, д.т.н., проф.

ЗМІСТ

ВСТУП……6
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ І КЛАСИФІКАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ……6
2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ…….16
3. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ..19
3.1. Електропровідність чистих металів…….19
3.2 Електропровідність металевих сплавів……..25
3.3 Електропровідність надпровідних сплавів……..29
4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ І СПОЛУК…….34
4.1 Чисті метали і сплави, що застосовуються в радіоелектроніці….34
4.2 Сплави високого опору…….38
4.3 Сплави для термопар…….43
4.4 Сплави тугоплавких металів…….44
4.5 Припої…….53
4.6 Неметалічні матеріали, що проводять…….59
4.7 Надпровідні матеріали……..63
5. ФЕРРОМАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ……..67
6. ДІЕЛЕКТРИКИ……84
6.1. Характеристики діелектриків в постійних електричних полях….84
6.2. Рівняння Клаузіуса-Моссоті……..87
6.3. Діелектрична проникність складних діелектриків……88
6.4. Деполяризуючий фактор……..89
6.5. Токи абсорбції……..91
7. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ……93
7.1. Види електропровідності діелектриків……93
7.2. Електропровідність газів……94
7.3. Електропровідність рідин……96
7.4. Електропровідність твердих діелектриків…….97

7.5. Поверхнева електропровідність діелектриків……..99
8. ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ В ЗМІННИХ ПОЛЯХ…….100
8.1. Комплексна діелектрична проникність, тангенс кута втрат……100
8.2. Види поляризації діелектриків……103
9. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ І ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ……109
9.1. Види діелектричних втрат……109
9.2. Пробої діелектриків……..113
10. ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ……115
10.1. Основи будови і класифікація органічних діелектриків…….115
10.2. Полярні високочастотні полімери……..117
10.3. Полярні низькочастотні полімери……..122
11. ПОЛЯРНІ НИЗЬКОЧАСТОТНІ ПОЛІМЕРИ……..126
11.1. Термореактивні смоли……126
11.2. Низькочастотні термореактивні композиційні пластмаси……..129
11.3. Пінопласти і поропласти…….130
11.4. Волокнисті електроізоляційні матеріали……..131
12. КАУЧУКОВІ МАТЕРІАЛИ……..132
13. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ……..135
13.1. Електропровідність напівпровідників……...135
13.2. Вплив температури на електропровідність напівпровідників…139
14. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛ…….143
14.1. Вплив сильного електричного поля на провідність напівпровідників……143
14.2. Вплив корпускулярних опромінень на електропровідність напівпровідників……147
14.3. Вплив деформації напівпровідників на їх провідність……148
14.4. Вплив світла на провідність напівпровідників…….149
15. ЕФЕКТИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ……..151
15.1. Ефект Ганна……..151

15.2. Фотолюмінісценція……152
15.3. Рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках…….155
15.4. Закони руху носіїв заряду в напівпровіднику…….159
ЛІТЕРАТУРА……..

ВСТУП

Метою курсу є вивчення фізичної сутності явищ, що протікають в електрорадіоматеріалах (ЕРМ), їх властивостей, областей використання та правил вибору. ЕРМ називаються матеріали і компоненти, що несуть електричне навантаження або електричне спільно з механічним.

Решта матеріалів, що несуть тільки механічне навантаження, називаються конструкційними матеріалами і елементами конструкцій. Звичайно, радіоінженер повинен знати як ЕРМ, так і конструкційні матеріали. Деякі ЕРМ, наприклад, пластмаси, є одночасно і конструкційними матеріалами. Такі конструкційні матеріали як сталі, кольорові метали і їх сплави розглянуті в наведеній нижче літературі, але в курсі ЕРМ не розглядаються. Науково-технічний прогрес в області радіоелектротехніки насамперед пов'язаний з розробкою і використанням нових матеріалів. Надійність РЕА, швидкодія, економічність, робочі температури, стійкість до ударів, випромінюванням визначаються не стільки схемою і конструкцією РЕА, скільки використаними матеріалами.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ І КЛАСИФІКАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ

Якісні стрибки в розвитку радіоелектроніки можливі лише за рахунок використання нових матеріалів і нових фізичних ефектів. Так, впровадження в 50-х роках 20 століття феритів дозволило різко зменшити габарити котушок індуктивності, трансформаторів, надвисокочастотних перемикачів, матриць пам'яті для ЕОМ. Використання напівпровідників і напівпровідникової технології в 60-і роки дозволило різко зменшити габарити і споживану потужність РЕА та ЕВА. Технологія групового виробництва дала поштовх розвитку нових напрямків мікроелектроніки. У 70-ті роки почали активно впроваджуватися надпровідники, з'явилася функціональна електроніка

(пристрої на поверхневих акустичних хвилях, акустоелектронні пристрої, хімотронні пристрої, пристрої на циліндричних магнітних доменах). В даний час активно розвиваються наноелектроніка, вакуумна мікроелектроніка.

Радіоматеріали діляться на активні і пасивні. Пасивні ЕРМ використовуються для виготовлення резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності і таке інше, тобто елементів, не пов'язаних з перетворенням інформації. ЕРМ, що використовуються для виготовлення транзисторів, діодів, лазерів і таке інше, тобто елементів, пов'язаних з перетворенням інформації, називаються активними матеріалами. ЕРМ працюють в електричних і магнітних полях. По поведінці в електричному полі ЕРС ділять на провідники, напівпровідники, діелектрики, з поведінки в магнітному полі - магнітні та немагнітні.

До провідникових матеріалів відносяться матеріали з питомим електричним опором $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, до діелектриків — $\rho > 10^{9}$ Ом·м, до напівпровідників — з $\rho = 10^{-6} \div 10^{9}$ Ом·м. Ряд матеріалів одночасно є і діелектриками, і напівпровідниками залежно від температури навколишнього середовища, агрегатного стану. Матеріали розрізняються і по ширині забороненої зони: провідники, якщо $\Delta E \approx 0$, напівпровідники, якщо $\Delta E < (2\text{-}3)$еВ, діелектрики, якщо $\Delta E > (2\text{-}3)$еВ. По агрегатному стану матеріали ділять на тверді, рідкі, газоподібні. За структурою — на монокристалічні, полікристалічні, аморфні і змішані.

Монокристали складаються з однакових кристалічних осередків, розташованих в правильному порядку (кубічних, ромбічних, тетрагональних, тригональних, гексагональних, орторомбическіх і інше). Атоми або іони розташовуються у вузлах решітки, в центрі, в центрі грані. Монокристали анізотропні, тобто їх властивості різні в різних напрямках. Полікристалічні матеріали складаються з великого числа дрібних кристаликів, хаотично орієнтованих в різних напрямках. Вони ізотропні, тобто їх властивості однакові в будь-якому напрямку.

Аморфні матеріали характеризуються хаотичним розташуванням атомів або іонів.

Змішані матеріали ─ в аморфну середу вкраплені кристали.

Зв'язок між атомами буває іонним, ковалентним (атомним), металевим, молекулярним.

Іонний зв'язок обумовлен кулоновским тяжінням протилежно заряджених іонів. Характерне для неорганічних діелектриків (NaCl, LiF).

Ковалентний (атомний) зв'язок виникає між атомами шляхом утворення спільних пар валентних електронів. Такий зв'язок мають Si, Ge, алмаз, з'єднання з елементів середніх груп таблиці Менделєєва (SiC, BN), а також органічні сполуки (поліетилен C_2H_4, політетрафторетилен C_2F_4, гази H_2, O_2, N_2).

Металеві зв'язки виникають між позитивно зарядженими іонами металів і усуспільненою електронною хмарою.

Молекулярні зв'язки існують між окремими молекулами за рахунок електростатичного притяжиння знаходяться в молекулах зарядів протилежного знака (сили Ван-дер-Ваальса). Ці зв'язки дуже слабкі, тому речовини, що мають цей вид зв'язку, легко розм'якшуються при нагріванні, мають низькі температури плавлення.

Особливим видом зв'язку є воднева - через іон водню, розташованому між двома іонами, характерна для H_2O.

По магнітних властивостях матеріали діляться на діамагнетик (магнітна проникність $\mu < 1$, але $\mu \approx 1$), парамагнітні ($\mu > 1$, але $\mu \approx 1$), феромагнітні ($\mu >> 1$), феррімагнітниє ($\mu >> 1$). У феромагнітних матеріалів магнітні моменти сусідніх однакових решіток шикуються в одному напрямку (рисунок 1.1).

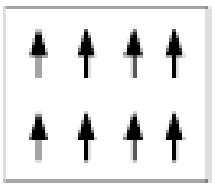


Рисунок 1.1. Напрямок магнітних моментів у феромагнітних матеріалів

Феррімагнітниє матеріали мають дві підрешітки, магнітні моменти їх протилежні, при цьому якщо вони однакові (рисунок 1.2 а), то матеріали називаються феримагнетики (або антиферромагнетиками), що компенсують. Якщо магнітні моменти сусідніх підрешіток різні (рисунок 1.2 б), то матеріали називаються нескомпенсованими феримагнетиками. Саме останні мають $\mu >> 1$.

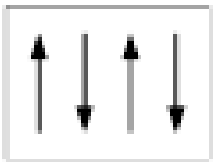


Рисунок 1.2 а) Напрямок магнітних моментів у феримагнетиків

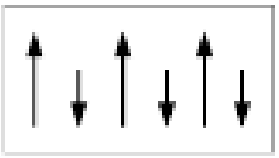


Рисунок 1.2 б) Напрямок магнітних моментів у нескомпенсованих феримагнетиків

Діелектрики поділяються на неполярні (нейтральні) і полярні. У неполярних діелектриків молекула симетрична і електричний момент молекул дорівнює нулю. У полярних діелектриків молекула асиметрична, електричний момент високий (електричний момент ─ твір заряду на відстань між зарядами протилежного знака).

Всі реальні матеріали мають дефекти в своїй будові. Дефекти діляться на точкові, лінійні, об'ємні.

До точкових дефектів відносять дефекти по Френкелю (рисунок 1.3 а) ─ зміщення атома з вузла решітки в міжвузля, до дефектів по Шоттки (рисунок 1.3 б) ─ відсутність атома у вузлі решітки.

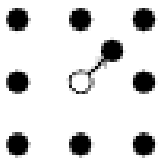


Рисунок1.3 а) Дефекти по Френкелю

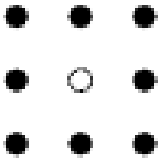


Рисунок 1.3 б) Дефекти по Шоттки

Лінійні дефекти - зміщення однієї частини решітки щодо іншої (дислокації лінійні, гвинтові, криволінійні, кутові).

Об'ємні дефекти - порожнечі, скупчення дислокацій.

Дефекти істотно впливають на властивості матеріалів, особливо монокристалічних.

Магнітні матеріали можуть бути провідниками, напівпровідниками, діелектриками. Всі ці матеріали мають більш широку класифікацію, яку зручно показувати на рисунках. Класифікація пасивних діелектриків приведена на рисунку 1.4.

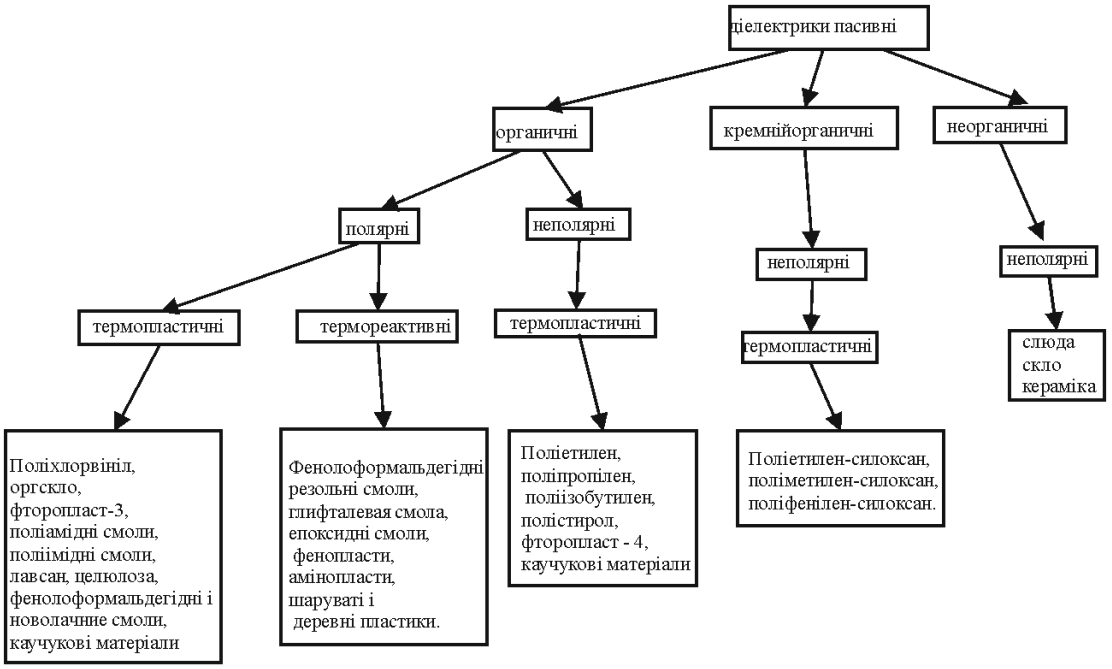


Рисунок 1.4. Класифікація пасивних діелектриків

Класифікація активних діелектриків наведена на рисунках 1.5 – 1.14

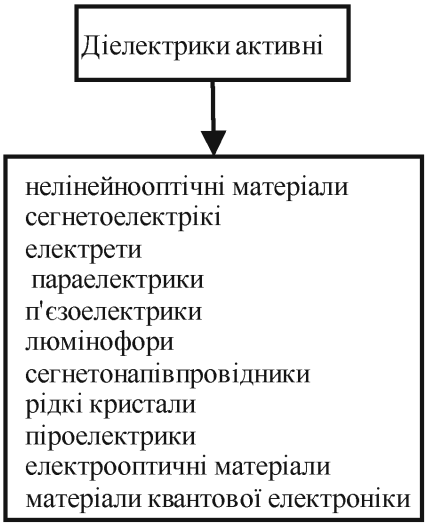


Рисунок 1.5. Активні діелектрики

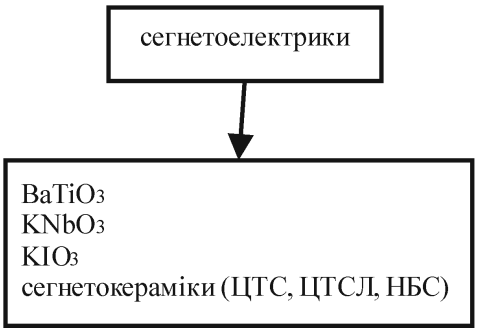


Рисунок 1.6. Сегнетоелектрики

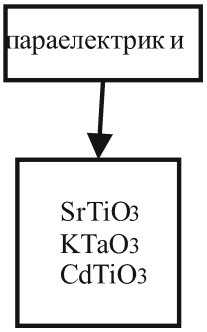


Рисунок 1.7. Параелектрики

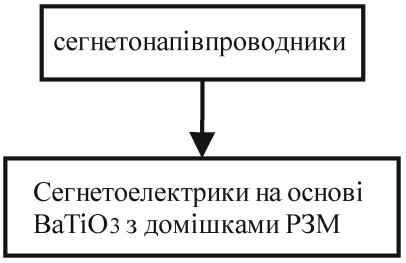


Рисунок 1.8. Сегнетонапівпровідники

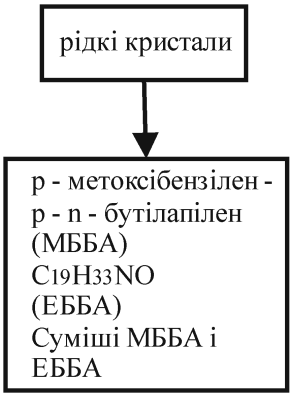


Рисунок 1.9. Рідкі кристали

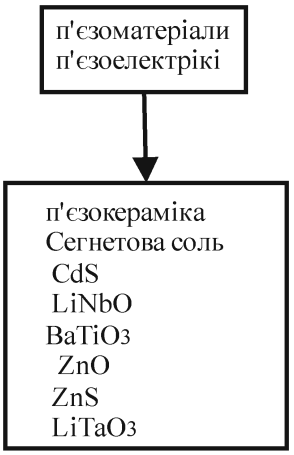


Рисунок 1.10. П’єзоматеріали і п’єзоелектрики

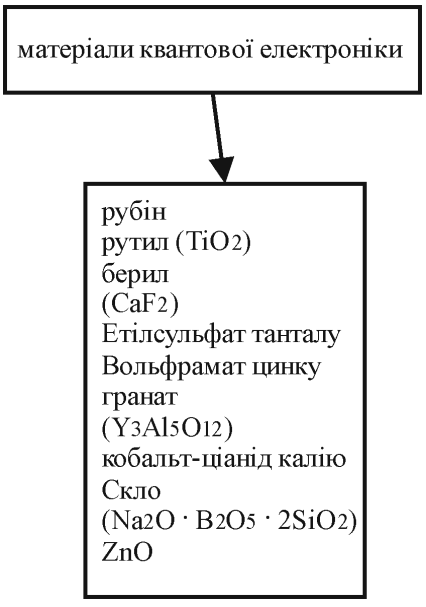


Рисунок 1.11. Матеріали квантової електроніки

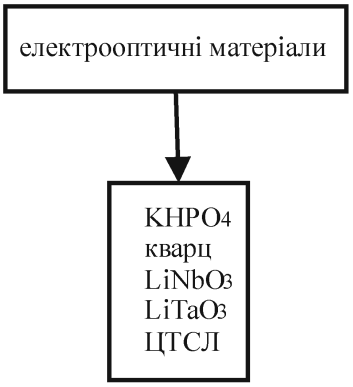


Рисунок 1.12. Електрооптичні матеріали

Електрети - це речовини з великою і довготривалою остаточною поляризацією, тобто електрети є формальним аналогом постійного магніту. В даний час електретний стан спостерігається, більш ніж у 70 діелектриків. Вони використовуються для виготовлення мікрофонів, в якості пиловловлювачів, дозиметрів радіації, вимірників атмосферного тиску і вологості, в обчислювальних машинах, для вимірювання механічних вібрацій.

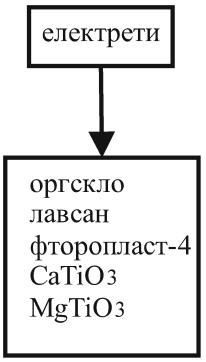


Рисунок 1.13. Електрети

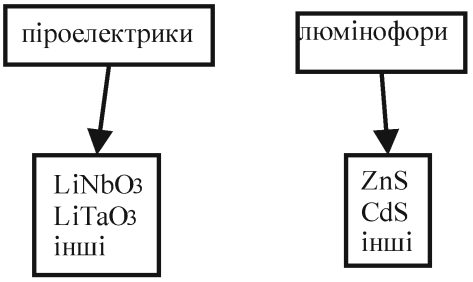


Рисунок 1.14. Піроелектрики і люмінофори

Класифікація напівпровідників наведена на рисунку 1.15.

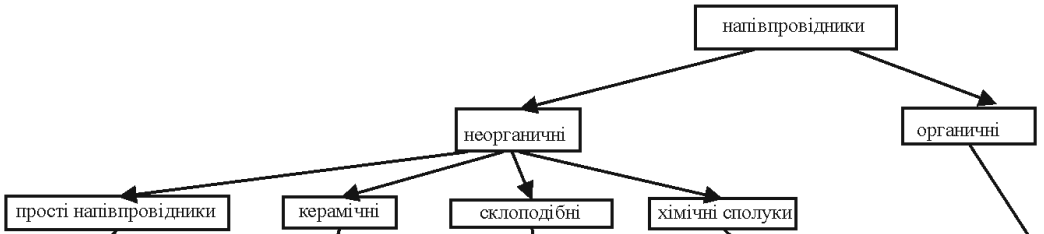


Рисунок 1.15 Класифікація напівпровідників

Класифікація провідників показана на рисунку 1.16

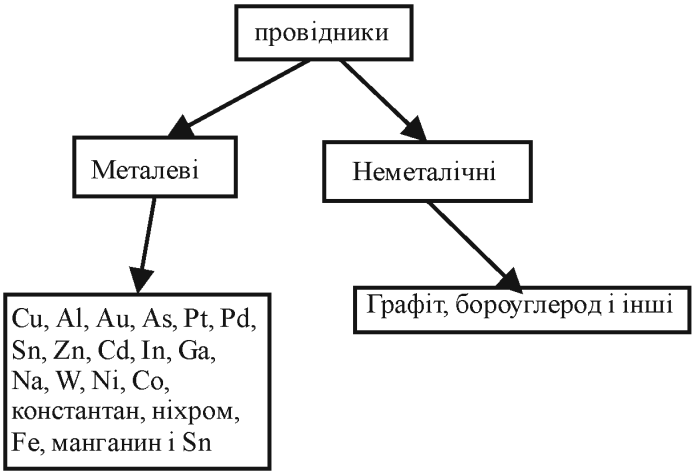


Рисунок 1.16 Класифікація провідників

Класифікація надпровідників приведена на рисунку 1.17

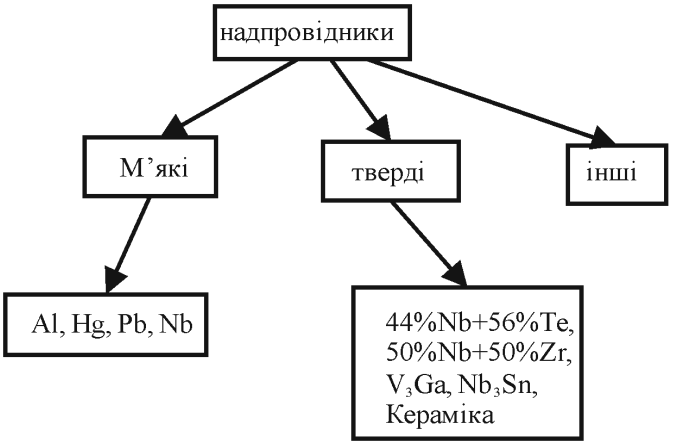


Рисунок 1.17 Класифікація надпровідників

Класифікація магнітних матеріалів представлена на рисунку 1.18

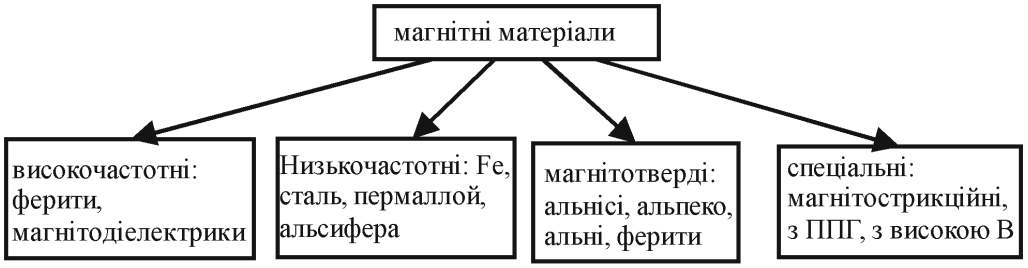


Рисунок 1.18 Класифікація магнітних матеріалів

При побудові радіокомпонентів (РК) відбувся розвиток особливих напрямків в науці, які отримали такі назви: акустоелектроніка, магнітоелектроніка, кріотроніка, оптоелектроніка, хемотроніка, фононіка, прилади з поверхневим перенесенням заряду (ППЗ), напівпровідникова і діелектрична негатроніка. Деякі галузі знань посилено розвиваються і сьогодні, інші, розвинувшись, відійшли на задній план (ПЗС, хемотроніка). Згодом картина розвитку змінюється, з'являються нові галузі знань. Однією з цікавих областей знань, є мікросхемотехніка, пов'язана з побудовою еквівалентів РК, аналогів приладів з S і N образними ВАХ. Безумовно, розвиток науки про РК супроводжується дослідженнями їх якості.

Всі РК діляться на РК широкого застосування, які у великих кількостях випускаються заводами, і РК приватного застосування, які проектуються і виготовляються за приватним вимогам. Їх конструкція залежить від конструкції і призначення виробу, в якому вони застосовуються, від освоєних процесів на заданому виробництві.

До РК пред'являється багато вимог, головними з яких є надійність, економічність і технологічність. Надійність характеризується інтенсивністю відмов λ_i, причому

$$\lambda_i = \frac{\Delta N}{N_{\text{сер}} \bullet \Delta t}, \qquad (1.1.)$$

де ΔN - кількість поламаних РК за час випробування Δt; Nср - кількість РК в партії, що випробовується.

Інтенсивність відмов пристрою

$$\lambda_{\text{у}} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i. \qquad (1.2.)$$

Економічність пов'язана з дешевизною застосовуваних матеріалів і обладнання технологічних процесів. Технологічність - здатність РК виготовлятися по простим і дешевим технологіям.

Зрозуміло, що основні якості РК залежать від якості застосовуваних матеріалів, правильності їх вибору. Прогрес в радіоелектроніці йде за схемою: нові матеріали і техпроцеси - нові активні елементи - нова схемотехніка, а іноді і системотехніка. Так, розвиток мікроелектроніки дозволило не тільки підвищити надійність систем, підвищити їх складність, а й зменшити габарити і споживану потужність.

Таким чином, роль РМ в радіоелектроніці є визначальною.

2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В даний час не існує загальноприйнятої класифікації провідникових матеріалів. У фізиці, хімії і техніці матеріали, які проводять, класифікують за різними ознаками. Одна з можливих схем класифікації показана на рисунку 2.1.

Основні властивості металевих провідникових матеріалів

Металеві провідникові матеріали повинні мати високу електропровідність, достатньою механічною міцністю, а також пластичністю, що дозволяє отримувати тонкі дроти, стрічки та фольгу, бути стійкими проти окислення киснем повітря.

Металеві провідникові матеріали являють собою речовини полікристалічної будови, таким чином вони складаються з безлічі дрібних кристалів.

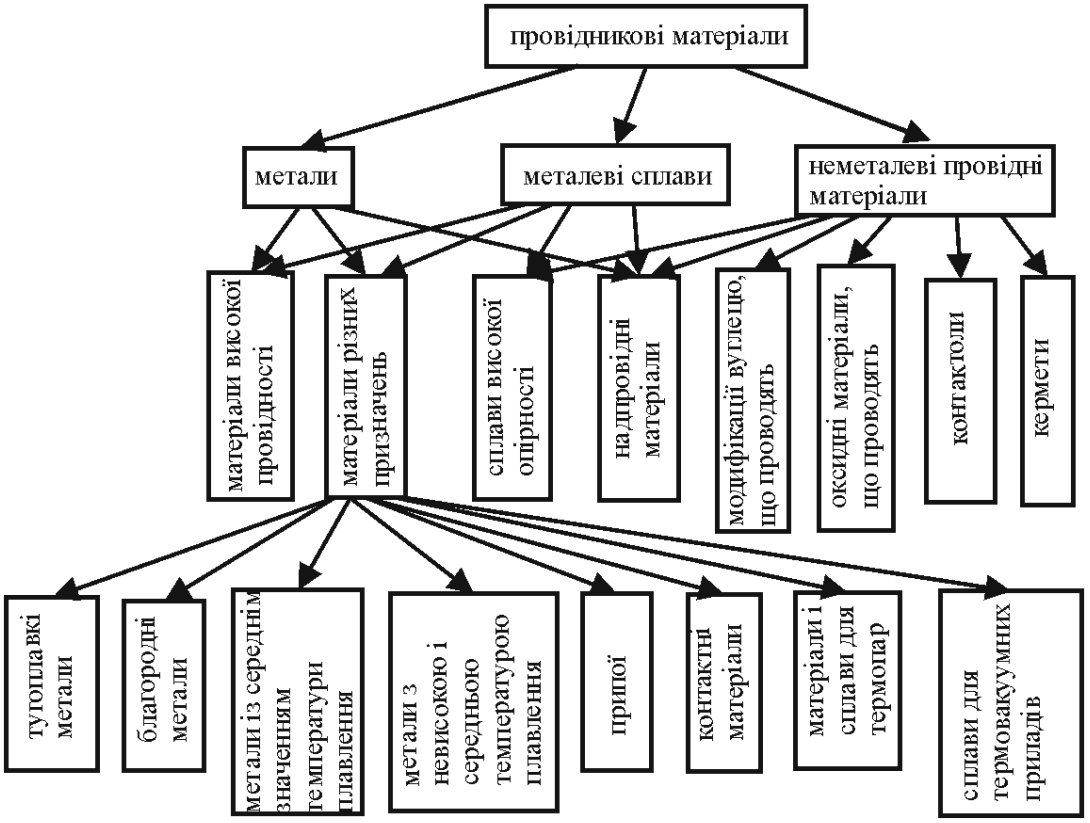


Рисунок 2.1 Класифікаційна схема для провідникових матеріалів

Більшість металевих провідникових матеріалів має дуже високу електропровідність (їх питомий опір ρ = 0,0150 - 0,0283 мкОм·м). Це переважно чисті метали, які використовують для виготовлення обмотувальних і радіомонтажних проводів і кабелів.

Поряд з цим в радіоелектроніці застосовують провідники з великим електричним опором - сплави різних металів. У металевих (резистивних) сплавів ρ = 0,4 ÷ 2,0 мкОм·м. Ці сплави складають групу металевих матеріалів з малим температурним коефіцієнтом: питомого опору (ТКρ або αρ) і застосовуються для виготовлення дротяних резисторів і інших радіокомпонентів, в невеликому обсязі яких потрібно створити велику електричний опір. Температурний коефіцієнт питомого опору провідників визначається виразом

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \bullet \frac{d\rho}{dT}. \qquad (2.1.)$$

З ростом температури електричний опір металевих провідників зростає. Це пояснюється тим, що з ростом температури теплові коливання атомів провідників стають більш інтенсивними. При цьому електрони, що переміщаються в провіднику, все частіше стикаються з атомами і зазнають теплове розсіювання.

Крім питомого електричного опору і температурного коефіцієнта опору для оцінки придатності провідникових матеріалів необхідно знати їх механічні характеристики.

Основною характеристикою, що визначає механічну міцність провідників, є руйнівне напруження при розтягуванні (δ_p), а характеристикою, що визначає пластичність металевих провідників, може бути відносне подовження матеріалу при його розтягуванні (e_p). Ясно, що чим вище пластичність металу, тим більше величина його відносного подовження при розтягуванні.

Пружна деформація металу не викликає помітної зміни його питомого електричного опору, а пластична деформація (прокатка, волочіння) викликає збільшення питомого опору. Приведення підвищеного питомого опору деформованого провідникового матеріалу до його колишньої величини досягається рекристалізацією металу. Процес рекристалізації пластично деформованого металу здійснюють витримкою його при певній температурі (відпал металу) протягом певного часу без доступу кисню повітря. Так, мідні дроти отжигают при 450 -650°С, алюмінієві - при 350 -400°С в залежності від діаметра дроту і товщини стрічок.

Теплова енергія, що підводиться в процесі відпалу, обумовлює зростання кристалів металу і повернення їх до колишньої неспотвореної форми. Домішки, розчинені в металі, помітно підвищують його питомий опір і, отже, знижують його електропровідність.

Щоб отримати провідники з малим питомим опором, їх ретельно очищають від сірки, фосфору, азоту, кисню та інших домішок. Тому в металевих провідниках з малим питомим опором сума домішок обчислюється

сотими частками відсотка. Щоб підвищити питомий електричний опір провідників, застосовують сплави декількох металів. Встановлено, що сплави, що представляють собою тверді розчини з неврегульованою структурою, мають підвищені значення питомого опору і малі значення $ТК_ρ$. Сплави, в кристалічній решітці яких неправильне чергування атомів металів, називаються сплавами з неврегульованою структурою. Всі металеві провідники мають високу пластичність, що дозволяє отримувати дроти від 0 до 0,01 мм і стрічки товщиною 0,05-0,1 мм.

Більшість чистих металів і сплавів можуть використовуватися в середовищі навколишнього повітря до температури не вище 200°С і деякі до 500°С. При перевищенні цих температур на них утворюється плівка оксидів, що має пухку структуру. Тому кисень повітря отримує доступ до металу і окисляє його. Сучасна радіоелектроніка потребує провідникових матеріалів, які не окисляються киснем повітря при 800-1000°С.

У зв'язку з цим розроблена група жаростійких провідникових матеріалів з великим питомим електричним опором.

3. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Електропровідність чистих металів

Електропровідність чистих металів обумовлена дрейфом вільних носіїв заряду одного знака. У переважній більшості чистих металів такими носіями є вільні електрони. Однак в ряді металів, таких, наприклад, як берилій, цинк і деякі інші, вільними носіями заряду є дірки.

Провідність електронних металів описується формулою:

$$\gamma = qn\mu \qquad (3.1.1.)$$

де q-заряд електрону; n - концентрація носіїв заряду; μ- рухливість.

Так як метали є виродженими провідниками, то концентрація n електронного газу в них практично не залежить від температури. Тому залежність питомої електропровідності γ від температури повністю визначається температурною залежністю рухливості μ електронів виродженого електронного газу. Це пояснюється наступним чином.

Питома електропровідність провідника

Знаючи швидкість дрейфу електронів, легко обчислити щільність електричного струму і питому електропровідність провідника. Для цього виділимо всередині провідника циліндр з основою, рівним одиниці, і утворюваній, рівній $\upsilon_д$ і спрямованій уздовж дрейфу (рисунок 3.1.1.).

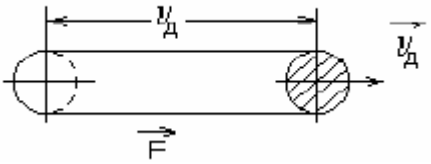


Рисунок 3.1.1. Схема елементарної ділянки провідника зі струмом

Всі електрони, укладені в цьому циліндрі, протягом 1 с. пройдуть через переріз і утворюють струм щільністю

$$\vec{j} = -\, qnv_д = qn\mu\vec{E} \qquad (3.1.2.)$$

де μ - рухливість.

Звідси, відповідно до закону Ома

$$\vec{j} = \gamma\vec{E} \qquad (3.1.3.)$$

$$\gamma = qn\mu \qquad (3.1.4.)$$

С урахуванням того, що

$$\mu = \frac{q \bullet \tau_{вп}}{m_n^*}, \qquad (3.1.5.)$$

а

$$\tau_{вп} = \frac{l_{вп} \bullet \tau_{вп}}{v} \qquad (3.1.6.)$$

де $\tau_{вп}$ - час вільного пробігу; m^*_n- ефективна маса електрона; $l_{вп}$ - довжина вільного пробігу; $n_{зіткн}$ - середня кількість зіткнень з розсіюючими центрами; υ - середня швидкість руху електрона.

$$\gamma = \frac{n \cdot q^2}{m_n^*} \tau_{вп} \qquad (3.1.7.)$$

невироджених газів

У разі невиродженого газу ймовірність заповнення зони провідності електронами настільки невелика, що вони практично не зустрічаються так близько, щоб їх поведінка могла обмежуватися принципом Паулі. Електрони є повністю вільними в тому сенсі, що на рух будь-якого з них інші не мають жодного впливу. Тому всі електрони провідності невиродженого газу приймають практично незалежне один від одного участь у створенні електричного струму і формуванні електропровідності провідника. Тому для електропровідності невиродженого газу користуються середніми параметрами: середньою довжиною вільного пробігу, середньої швидкістю руху і середнім часом релаксації:

$$\bar{\tau}_{вп} = \frac{\bar{l}_{вп}}{\bar{v}} \qquad (3.1.8.)$$

$$\mu = \frac{q \bullet \bar{\tau}_{вп}}{m_n^*} \qquad (3.1.9.)$$

$$\gamma = \frac{n \cdot q^2}{m_n^*} \bar{\tau}_{вп} \qquad (3.1.10.)$$

Вироджений газ.

Для виродженого газу всі квантові стани нижче рівня Фермі зайняті електронами. Тому зовнішнє поле може впливати лише на електрони,

розташовані близько рівня Фермі, переводячи їх на більш високі вільні рівні. Це означає, що в виродженому газі в формуванні електропровідності можуть брати участь не всі вільні електрони, а лише ті з них, які розташовуються безпосередньо у рівня Фермі. Тому в якості часу релаксації в попередніх формулах слід брати час релаксації електронів, що володіють енергією, що практично дорівнює енергії Фермі, тобто $\tau_{впF}$.

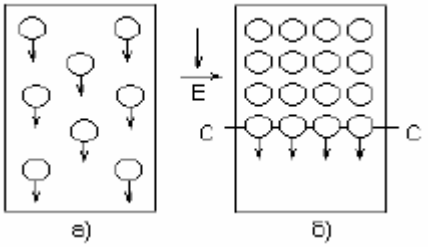


Рисунок 3.1.2. Схема, яка пояснює рух носіїв заряду:
а- у невиродженому газі; б-у виродженому газі.

Для пояснення відмінності між поведінкою в електричному полі невиродженого і виродженого електричних газів можна привести грубу механічну аналогію. Уявімо, що на поверхні води, налитої в пласку посудину, плавають заряджені частинки-кульки, які у відсутності зовнішнього поля роблять безладні рухи з різними швидкостями (рисунок 3.1.2., а). Якщо помістити посудину під зовнішнє поле $\vec{E}$, то результат впливу поля на "колектив" кульок як ціле буде істотно залежати від того, як щільно вони "укладені" на поверхні води. Рух невиродженого колективу визначається середніми параметрами, а виродженого визначається рухом нижнього шару частинок СС (рисунок 3.1.2., б). Для виродженого електронного газу роль шару виконують електрони, розташовані у рівня Фермі. Визначено, що носії заряду в металах складають вироджений електронний газ. Питома провідність металів визначається виразом:

$$\gamma = \frac{n \cdot q^2}{m_n^* \bullet \bar{u}} \bar{l}_{\text{вп}}, \qquad (3.1.11.)$$

де $\bar{u}$- середня швидкість руху електронів. Тому, температурна залежність питомого опору металевих провідників при порівняно високих температурах буде залежати від величини $l_{вп}$, тому що в металах швидкості руху носіїв заряду розрізняються мало, оскільки свобода переміщення електронів обмежується принципом Паулі. У свою чергу, залежність довжини вільного пробігу від температури визначається виразом

$$\vec{l}_T = \frac{K_{пр}}{2\pi NkT}, \qquad (3.1.12.)$$

де $\vec{l}_T$ - довжина вільного пробігу, що залежить від температури; $k_{пр}$ - коефіцієнт пружного зв'язку, який прагне повернути атом в положення рівноваги; N - число атомів в одиниці об'єму матеріалу.

З урахуванням викладеного, встановлено, що рухливість носіїв для невиродженого газу $\mu \sim T^{-3/2}$, а для виродженого газу $\mu \sim T^{-1}$, тому отримані наступні вирази для питомої електропровідності γ і питомого опору ρ чистих металів:

в області високих температур (T> 200°K)

$$\gamma = \frac{A}{T}, \rho=\alpha \cdot T \qquad (3.1.13.)$$

в області низьких температур

$$\gamma = \frac{A}{T^5}, \rho=\beta \cdot T^5 \qquad (3.1.14.)$$

Тут A, B, α, β - коефіцієнти пропорційності.

Таблиця 3.1.1.

Питома електропровідність ряду чистих металів при кімнатній температурі, обчислена теоретично ($\gamma_{теор}$) і певна експериментально ($\gamma_{експ}$)

елемент	Na	K	Rb	Cu	Ag	Au
$\gamma_{теор}$, $10^6 Ом^{-1}м^{-1}$	22	19	20	100	90	107
$\gamma_{експ}$, $10^6 Ом^{-1}м^{-1}$	23	15	8	64	67	68

На рисунку 3.1.3. показана схематична крива залежності питомого опору чистих металів від температури. В області високих температур графіком ρ (Т) є пряма, в області низьких температур - парабола 5-го ступеня, і поблизу абсолютного нуля, де основне значення має розсіювання на домішках, - пряма, паралельна осі температур.

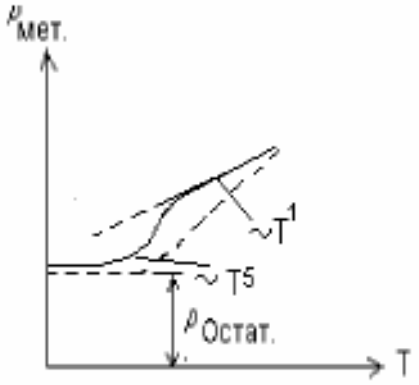


Рисунок 3.1.3. Температурна залежність питомого опору металу

Більш суворий квантово-механічний розрахунок дозволяє обчислити коефіцієнти А, α, В, β в формулах (3.1.13.) і (3.1.14.). У таблиці 3.1.1. приведена питома електропровідність ряду чистих металів при кімнатній температурі, обчислена теоретично ($\gamma_{теор}$) і певна експериментально ($\gamma_{експ}$)

З даних цієї таблиці видно, що згода теорії з досвідом є задовільним для Na і К, у яких стан електронів провідності близько до стану вільних електронів. Зі збільшенням атомної маси металу збільшується потенціал решітки, зростає взаємодія електронів провідності з гратами і наближення вільних електронів виконується гірше. Тому спостерігається все більша розбіжність між $\gamma_{теор}$ і $\gamma_{експер}$.

Таблиця 3.1.2.

Відносини провідності γ_0 золота при 273°К до провідності його γ при низьких температурах, обчислені теоретично і певні експериментально

T, ºK	273	87,4	57,8	20,4	11,1	4,2
$(\gamma_0 / \gamma)_{теор}$	1	0,2645	0,1356	0,0060	0,0003	$3 \cdot 10^6$
$(\gamma_0 / \gamma)_{експ}$	1	0,2551	0,1314	0,0058	0,0003	$3 \cdot 10^6$

У таблиці 3.1.2. наведені відносини провідності γ_0 золота при 273°К до провідності його γ при низьких температурах, обчислені теоретично і певні експериментально. Як видно, згода теорії з досвідом є цілком задовільною.

3.2 Електропровідність металевих сплавів

У металевих сплавах концентрація носіїв також не залежить від температури. Тому температурна залежність електропровідності сплавів цілком визначається залежністю рухливості носіїв від температури. Розглянемо це питання більш детально.

Припустимо, що в ідеальній решітці металу, наприклад міді має строго періодичний потенціал U (рисунок 3.2.1, а), частина вузлів безладно заміщена атомами іншого елемента, наприклад золота. Так як потенціал поля домішкових атомів відмінний від потенціалу основних атомів, то потенціал решітки не збережеться строго періодичним (рисунок 3.2.1, б). Він порушується безладно розподіленими домішковими атомами. Таке порушення призводить, природно до розсіювання носіїв і додаткового електричного опору.

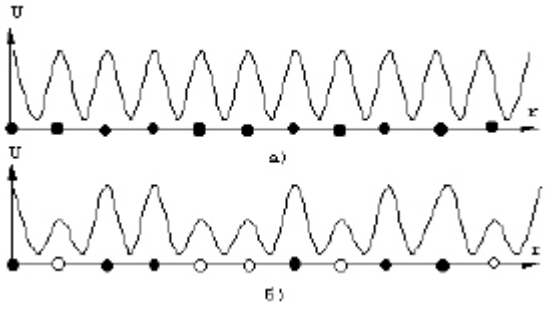


Рисунок 3.2.1 Потенційна діаграма для: а- ідеальної решітки; б-решітки з домішками

Як показав Л. Нордгейма, в найпростішому випадку бінарних сплавів типу твердих розчинів рухливість носіїв, обумовлена розсіюванням їх на порушеннях решітки, визначається наступним наближеним співвідношенням:

$$\mu_{спл} \sim \omega(1-\omega), \qquad (3.2.1.)$$

де ω і (1 - ω) - відносні частки металів, що утворюють сплав.

Підставивши $\mu_{спл}$ з (3.2.1) в (3.1.1) і пам'ятаючи, що $\rho = 1/\gamma$, отримаємо такий вираз для питомого опору бінарного сплаву:

$$\rho_{спл} = \frac{\beta}{\omega(1-\omega)} \qquad (3.2.2.)$$

де β - коефіцієнт пропорційності.

Функція ω (1 - ω) має максимум при ω = 1/2, таким чином при рівному вмісті в сплаві обох компонент. Як приклад на рисунку 3.2.2, а показана залежність питомого опору сплавів міді з золотом від вмісту золота. Крива проходить через максимум, що відповідає 50% міді і золота в сплаві.

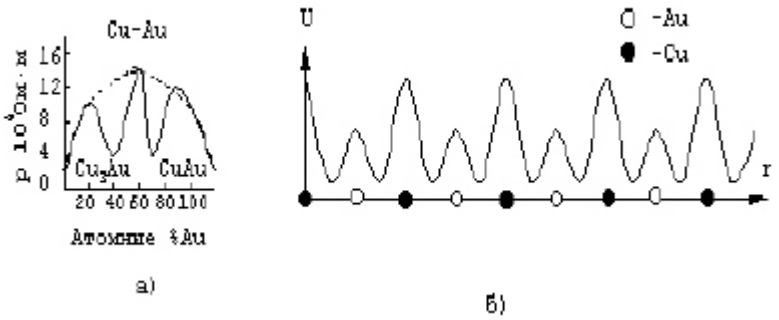


Рисунок 3.2.2, а - залежність питомого опору сплаву від домішок; б-потенційна діаграма решітки сплаву

З рисунку 3.2.2, а видно далі, що абсолютне значення $\rho_{спл}$ значно вище ρ чистих компонент. Так, при кімнатній температурі $\rho_{Cu} = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{Au} = 1{,}56 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а $\rho_{50\%\ Cu. + 50\%\ Au} = 15 \cdot 10^{-8}$Ом·м. Це цілком природно, тому

що домішки викликають значно більше сильне порушення періодичності потенціалу решітки, ніж теплові коливання. Якщо, проте, метали сплавляли при певному співвідношенні компонент, які утворюють металеве з'єднання з упорядкованою внутрішньою структурою, то періодичність потенціалу решітки відновлюється (рисунок 3.2.2, б) і опір, який обумовлен розсіюванням на домішках, практично майже повністю зникає. Для сплавів міді з золотом це має місце при співвідношенні компонент, що відповідає стехиометрическому складу Cu_3Au і CuAu (рисунок 3.2.2, а, суцільні криві). Це є переконливим підтвердженням квантової теорії електропровідності, згідно з якою основною причиною електричного опору твердих тіл є не зіткнення вільних електронів з атомами решітки, а розсіювання їх на дефектах решітки, які викликають порушення періодичності її потенціалу.

Ідеально правильна, бездефектна решітка, що має строго періодичний потенціал, не здатна розсіювати вільні носії заряду і тому повинна володіти нульовим опором. Це підтверджується численними дослідами з гранично чистими металами в області низьких температур, зокрема даними таблиці 3.1.2: у міру підвищення ступеня чистоти металів їх опір поблизу абсолютного нуля безперервно падає, прагнучи до нуля. Підкреслимо, що це не явище надпровідності, про який буде мова попереду, а природна поведінка всіх абсолютно чистих металів при гранично низьких температурах, що випливає з квантової природи електричного опору.

При невеликому вмісті домішки в (3.2.2) можна покласти $(1 - \omega) \approx 1$. Тоді $\rho_{спл} \sim \omega$. Це питомий опір не залежить від температури і зберігається при абсолютному нулі. Його називають залишковим опором $\rho_{зал} = \rho_П$ (рисунок 3.1.3). При температурі, відмінній від абсолютного нуля, до залишкового опору приєднується опір $\rho_Т$, який обумовлен розсіюванням на теплових коливаннях ґрат, і загальний питомий опір дорівнює

$$\rho=\rho_П+\rho_r \qquad (3.2.3.)$$

Це співвідношення виражає відоме правило Матіссена про адитивність питомої опору.

Розглянемо тепер температурний коефіцієнт опору α. Як відомо, він висловлює відносну зміну питомої опору провідника ρ при нагріванні його на 1°К. Так як для чистих металів $\rho = \rho_T$, то

$$\alpha = \frac{1}{\rho_T} \bullet \frac{d\rho_T}{dT} \qquad (3.2.4.)$$

Як показує досвід, грубо (дивись таблицю 3.2.1)

$$\alpha = \frac{1}{273}К^{-1} \approx 0,004К^{-1} \qquad (3.2.5.)$$

Для сплавів

$$\rho = \rho_П + \rho_T, \qquad (3.2.6.)$$

тому

$$\alpha_{спл} = \frac{1}{\rho_T} \bullet \frac{d\rho_T}{dT} = \frac{1}{\rho_П + \rho_T} \bullet \qquad (3.2.7.)$$

так як $\rho_П$ від температури не залежить. Цей вислів можна перетворити в такий спосіб:

$$\alpha_{спл} = \frac{1}{1+\frac{\rho_П}{\rho_T}} \bullet \frac{1}{\rho_T} \bullet \frac{d\rho_T}{dT} = \frac{\alpha}{1+\frac{\rho_П}{\rho_T}} \qquad (3.2.8.)$$

де α- температурний коефіцієнт опору чистих металів.

З (3.2.8) видно, що $\alpha_{спл}$ повинен бути менше α чистого металу, причому тим менше, чим більше $\rho_П$ в порівнянні з ρ_T. Зазвичай $\rho_П$ на порядок і більше вище ρ_T, тому $\alpha_{спл}$ може бути на порядок і більше нижче α чистого металу, що в основному підтверджується досвідом (таблиця 3.2.1; дані наведені для кімнатної температури).

Таблиця 3.2.1.

Температурний коефіцієнт опору чистих металів для кімнатної температури

Чисті метали і сплави	мідь	олово	нікель	Бронза (88%Cu, 18%Sn, 1%Pb)	Ніхром)80%Ni, 20%Cr)	Константан (54%Cu, 46%Ni)
$\alpha \cdot 10^3$, ºK	4,1	4,2	6,2	0,5	0,13	-0,004

Однак у багатьох випадках температурна залежність опору сплавів є значно складнішою, ніж та, яка випливає з простої адитивної закономірності (3.2.3), і температурний коефіцієнт опору сплавів може бути багато менше, ніж можна було б очікувати відповідно до (3.2.8). Більш того, він не залишається постійним в широкому інтервалі температур, а в ряді випадків є навіть негативним, як це має місце, наприклад, у константану (таблиця 3.2.1) і у деяких інших сплавів. Високий питомий опір і низький температурний коефіцієнт опору сплавів відкрили для них широкі можливості практичного застосування для виготовлення різноманітних дротяних і плівкових резисторів і змінних опорів (реостатів), використовуваних в різних областях техніки.

3.3 Електропровідність надпровідних сплавів

У багатьох металів і сплавів при температурах, близьких до абсолютного нуля, спостерігається різке зменшення питомого опору. Це

явище отримало назву надпровідності, а температуру $T_{нп}$, при якій відбувається перехід в надпровідний стан, називають критичною температурою переходу. Вперше надпровідність була виявлена у ртуті при $T_{нп}$ = 4,2 °К голландським фізиком Х. Каммерлінг-Оннесом.

Якщо в кільці з надпровідника індукувати електричний струм (наприклад, за допомогою магнітного поля), то він не буде затухати протягом тривалого часу. За швидкістю зменшення магнітного поля наведеного струму в кільці була проведена оцінка питомого опору матеріалів в надпровідному стані. Його значення склало близько 10-25 Ом·м, що в 10^{17} разів менше опору міді при кімнатній температурі.

Фізична природа надпровідності.

Явище надпровідності можна зрозуміти і обгрунтувати тільки за допомогою квантових уявлень. Майже півстоліття з моменту відкриття надпровідності сутність цього явища залишалася нерозгаданою через те, що методи квантової механіки ще не в повній мірі використовувалися у фізиці твердого тіла.

Мікроскопічна теорія надпровідності, яка пояснює все досвідчені дані, була запропонована в 1957 році американськими вченими Бардіним, Купером і Шріффером (теорія БКШ). Значний внесок у розвиток теорії надпровідності внесли роботи радянського академіка М. М. Боголюбова.

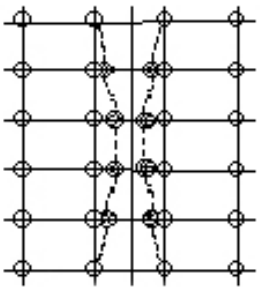


Рисунок 3.3.1 Схема утворення електронних пар в надпровідному металі

Згідно сталим уявленням, явище надпровідності виникає в тому випадку, коли електрони в металі як би притягуються один до одного.

Тяжіння електронів можливо тільки в середовищі, що містить позитивно заряджені іони, поле яких послаблює сили кулонівського відштовхування між електронами. Притягатися можуть лише ті електрони, які беруть участь в електропровідності, тобто розташовані поблизу рівня Фермі. Якщо таке тяжіння має місце, то електрони з протилежним напрямком імпульсу і власного магнітного спина зв'язуються в пари, звані куперівськими. В утворенні куперівських пар вирішальну роль відіграє взаємодія електронів з тепловими коливаннями решітки - фононами. У твердому тілі електрони можуть як поглинати, так і породжувати фонони. Подумки уявімо собі наступний процес: один з електронів, взаємодіючи з решіткою, переводить її в збуджений стан і змінює свій імпульс; інший електрон, також взаємодіючи з решіткою, переводить її в нормальний стан і теж змінює свій імпульс. В результаті стан решітки не змінюється, а електрони обмінюються квантами теплової енергії - фононами. Обмінна фононна взаємодія і викликає сили тяжіння між електронами, які перевершують сили кулонівського відштовхування. Обмін фононами за участю решітки відбувається безперервно. У спрощеному вигляді обмінна фононна взаємодія проілюстрована схемою рисунку 3.3.1. Електрон, що рухається серед позитивно заряджених іонів, поляризує грати, тобто електростатичними силами притягує до себе найближчі іони. Завдяки такому зміщенню іонів в околиці траєкторії електрона локально зростає щільність позитивного заряду. Другий електрон, що рухається слідом за першим, природно, може притягатися областю з надмірним позитивним зарядом. В результаті непрямим чином, за рахунок взаємодії з решіткою між електронами 1 і 2 виникають сили тяжіння. Другий електрон стає партнером першого - утворюється куперівська пара. Оскільки сили тяжіння невеликі, спарені електрони слабо локалізовані в просторі. Ефективний діаметр куперівської пари має порядок 10^{-7}м, тобто охоплює тисячі елементарних осередків. Ці парні утворення перекривають один одного, постійно розпадаються і знову створюються, але в цілому все пари утворюють електронний конденсат,

енергія якого за рахунок внутрішньої взаємодії менше, ніж у сукупності роз'єднаних нормальних електронів. Внаслідок цього в енергетичному спектрі надпровідника з'являється енергетична щілина 2Δ - область заборонених енергетичних станів (рисунок 3.3.2).

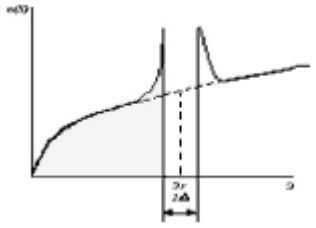


Рисунок 3.3.2 Розподіл електронів по енергіях в металі в стані надпровідності

Спарені електрони розташовуються на дні енергетичної щілини. Груба оцінка показує, що кількість таких електронів становить близько 10^{-4} від загального їх числа. Розмір енергетичної щілини залежить від температури, досягаючи максимального значення при абсолютному нулі і повністю зникаючи при $T = T_{нп}$. Теорія БКШ дає наступний зв'язок ширини щілини з критичною температурою переходу

$$2\Delta_{0K}=3,52кT_{нп} \qquad (3.3.1.)$$

Формула (3.3.1) досить добре підтверджується експериментально. Для більшості надпровідників енергетична щілина становить 10^{-3}-10^{-4} еВ. Як було показано, електричний опір металу обумовлено розсіюванням електронів на теплових коливаннях ґрат і на домішках. Однак при наявності енергетичної щілини для переходу електронів з основного стану в збуджений потрібно достатня порція теплової енергії, яку при низьких температурах електрони не можуть отримати від решітки, оскільки енергія теплових коливань менше ширини щілини. Саме тому спарені електрони не розсіюються на дефектах структури. Особливістю куперівських пар є їх імпульсна впорядкованість, яка полягає в тому, що всі пари мають однаковий імпульс і не можуть змінювати свій стан незалежно один від одного. Електронні хвилі, що описують рух пар,

мають однакові довжину і фазу. Фактично рух всіх електронних пар можна розглядати як поширення однієї електронної хвилі, яка не розсіюється решіткою, «обтікає» дефекти структури. Така узгодженість в поведінці пар обумовлена високою мобільністю електронного конденсату: безперервно змінюються набори пар, відбувається постійна зміна партнерів.

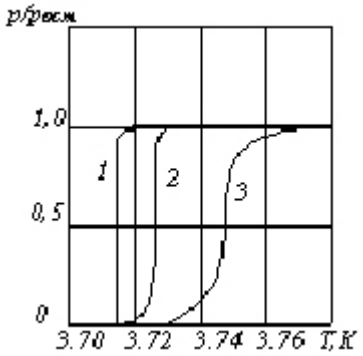


Рисунок 3.3.3 Зміна питомого опору олова поблизу температурних переходів в стані надпровідності: 1 - монокристал; 2 - полікристал; 3 - полікристал з домішками

Перехід речовини в надпровідний стан при його охолодженні відбувається в дуже вузькому інтервалі температур (соті частки градуса). Неоднорідності структури, створювані домішками, спотвореннями решітки, межами зерен, пластичною деформацією і таке подібне, не призводять до знищення надпровідності, а викликають лише розширення температурного інтервалу переходу з одного стану в інший (рисунок 3.3.3). Електрони, відповідальні за створення надпровідності, що не обмінюються енергією з гратами. Тому при температурі нижче критичної спостерігається істотне зменшення теплопровідності металів.

4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ І СПОЛУК

4.1 Чисті метали і сплави, що застосовуються в радіоелектроніці

З металів в радіоелектроніці головним чином застосовують мідь, алюміній, срібло і золото, а із сплавів - бронзу, латунь і ковар.

Мідь - головний матеріал, що володіє високою пластичністю, достатньою механічною міцністю і високою електропровідністю. За електропровідністю мідь стоїть на другому місці після срібла. Мідь має червонувато-оранжевий колір і температуру плавлення 1083°С. Коефіцієнт температурного розширення міді $К_{ТР}$ = 17-10^{-6} 1/°С. Провідникову мідь отримують із злитків міді після очищення їх від домішок в електролітичній ванні (за допомогою постійного струму). У нормальній повітряній атмосфері провідникова мідь стійка до атмосферної корозії. Цьому сприяє тонкий шар оксиду CuO яким мідь покривається на повітрі. Він перешкоджає подальшому доступу кисню повітря до міді.

Для виготовлення виробів (обмотувальні, радіомонтажні проводи та кабелі) застосовують чисту мідь марок М00к, М0ку; М0К; М1К (катодна мідь) і М00б; М0б; М1Б (безкиснева мідь). Зміст міді (з сріблом) 99,99 - 99,90%. Найбільший вміст міді мають марки М00к і М00б.

Домішки в металах надають несприятливий вплив на їх електричні та механічні властивості. Тому для виготовлення проводів застосовують сорти міді, в яких сума всіх домішок не повинна перевищувати 0,1%. Для виготовлення мідної фольги (для друкованих плат) і емальованих обмотувальних проводів застосовують марки безкисневої міді, що відрізняється пластичністю і високою електропровідністю.

Дріт для проводів виготовляють 0,01-10 мм у вигляді м'якого, відпаленого виробу (марка ММ) або твердотягнутого, невідпаленого виробу (марка МТ). У виробів з м'якої міді (при 20 ° С) щільність 8900 кг/$м^3$;

$\delta_р$ = 200-280 МПа; $Е_р$ = 6-35%; ρ = 0,0172-0,01724 мкОм·м; з твердої міді - щільність 8960 кг/м^3; $\delta_р$ = 380 - 450 МПа; $Е_р$ = 0,6 -2%; ρ = 0,0178 -0,180 мкОм ·м. Дріт меншого діаметру володіє великою руйнівною напругою при розтягуванні і значеннями питомого електричного опору, ніж дріт більшого діаметру. Для проводів дуже малого діаметру (0,01 мм), призначених для роботи при підвищених температурах, застосовують дріт, виготовлену з безкисневої міді (марка МООб), що відрізняється високою чистотою (загальний вміст домішок-не більше 0,01%). Температурний коефіцієнт питомого опору для всіх марок міді $Т_{Кρ}$ = 0,004 1°/С.

Бронза є сплавом міді з оловом (олов'яна бронза), алюмінієм (алюмінієва), берилієм (берилієва) і з іншими легуючими елементами. Марки бронзи позначаються буквами Бр (бронза), за якими слідують букви і цифри, що показують, які легуючі елементи і в якій кількості містяться в даній бронзі (таблиця 4.1.1).

Таблиця 4.1.1.

Марки і склад деяких бронз і латуней

марка	Вміст елементів, %						
	олово	фосфор	берилій	алюміній	нікель	мідь	цинк
БрО10	10					решта	
БрОФ6,5 -0,15	6-7	0,15				решта	
БрА7				6-8		решта	
БрБ2			2-2,2		0,2-0,5	решта	
Л62						60-63	40-37
Л80						79-81	21-19

Бронза добре паяється і обробляється різанням і тиском. З бронзи виготовляють напівфабрикати - стрічки, смуги, дріт, листи і трубки, з яких виробляють пружні контакти, струмопровідні пружини, контактні частини для штепсельних роз'ємів та інших конструкційних деталей в радіоапаратах.

При виготовленні деталей з берилієвої бронзи виробляють термічну обробку - загартування бронзи (нагрів і різке охолодження). Загартована бронза володіє пластичністю, що дозволяє виготовляти з неї різні пружні елементи. Зміцнення деталей з берилієвої бронзи досягають відпусткою - нагріванням її до певної температури і подальшим повільним охолодженням, а з алюмінієвої і олов'яної - пластичною деформацією при кімнатній температурі.

Відносно електропровідності бронза поступається міді, але перевершує її по механічної міцності, пружності, опору стирання і корозійної стійкості.

Латунь - сплав міді з цинком, в якому найбільший вміст цинку може становити 45% (по масі), але латунь, що володіє найбільшою пластичністю, містить 30% цинку і менш. Висока пластичність латуні дозволяє виготовляти з неї гарячою і холодною прокаткою і волочінням листи, прутки, стрічки і дріт. З листової латуні можна виготовляти також деталі глибоким штампуванням - ковпачки, фасонні шайби і ін. Крім того, з латуні виготовляють різні затискачі, контакти і кріпильні деталі для радіоапаратури. Латунь дешевше міді, тому там, де не потрібна висока електропровідність, економічно доцільніше виготовляти такі деталі з латуні.

Латунь, що деформується, схильна до корозії у вологої атмосфері більшою мірою, ніж мідь. Марки латуні позначаються літерою Л (латунь), за якою слідують букви і цифри, що вказують вміст міді та інших компонентів. Основні характеристики бронзи, латуні і міді наведені в таблиці 4.1.2.

Ковар - сплав нікелю (28,7 - 29,2% по масі), кобальту (17,3 - 18%) і інше-залізо. Характерною особливістю ковара є близькість значень його $К_{ТР}$ = (4,3-5,4) 10^{-6} 1°/С до значень $К_{ТР}$ скла і кераміки в інтервалі 20 - 200 ° С. Це дозволяє виробляти узгоджені, герметичні спаї ковара зі склом і

керамікою. Щільність ковара 8350 кг/м^3, температура плавлення 1450 °С, питомий електричний опір (при 20 ° С) ρ = 0,45 мкОм • м, $\delta_р$ = 500 - 620 МПа (для відпаленого дроту зі стрічок).

Таблиця 4.1.2.

Основні характеристики бронзи, латуні і міді

матеріал	обробка	провідність,%	руйнівне напруження при розтягуванні, МПа	відносне подовження при розтягуванні,%
провідникова мідь (99,95% міді)	м'яка тверда	100 88	200-250 360-420	40 3
фосфориста бронза (6-7% олова, 0,15% фосфора)	м'яка тверда	15 10	400 450	60 1
берилієва бронза (2% берілія, 0,5% нікеля)	м'яка тверда	36 26	700-790 1600-1750	20 9
Латунь Л62	м'яка тверда	25 24	400 880	60 5

Ковар добре піддається пайці і електрозварюванню, пластичний, що дозволяє отримувати дріт 0,2 - 3 мм, стрічку товщиною 0,1-2,5 мм і шириною 70 - 250 мм. Його застосовують для виготовлення корпусів ІС і напівпровідникових приладів. Щоб уникнути корозії фасонні вироби, отримані глибокої витяжкою, піддають відпалу при оптимальній температурі.

4.2 Сплави високого опору

Сплавами високого опору називають провідникові матеріали, у яких значення ρ в нормальних умовах становить не менше 0,3 мкОм·м. Їх застосовують при виготовленні приладів, зразкових резисторів, реостатів і електронагрівальних приладів. При використанні сплавів в електровимірювальної техніці від них вимагається не тільки високий питомий опір, але і можливо менше значення α_ρ, а також мала термо-е.р.с. щодо міді. Провідникові матеріали в електронагрівальних приладах повинні тривалий час працювати на повітрі при температурах близько 1000 ° С. Серед великої кількості матеріалів для зазначених цілей найбільш поширеними в практиці є сплави на мідній основі - манганін і константан, а також хромонікелеві і залізохромоалюмінієві сплави.

Манганін - основний сплав на мідній основі для приладів та зразкових резисторів; склад і властивості його наведено в таблиці 4.2.1 Манганін відрізняється жовтуватим відтінком, добре витягується в тонкий дріт до діаметра 0,02 мм. З манганіну виготовляють також стрічку товщиною 0,01-1 мм і шириною 10-300 мм.

Манганін - основний сплав на мідній основі для приладів та зразкових резисторів; склад і властивості його наведено в таблиці 4.2.1 Манганін відрізняється жовтуватим відтінком, добре витягується в тонкий дріт до діаметра 0,02 мм. З манганіну виготовляють також стрічку товщиною 0,01-1 мм і шириною 10-300 мм.

Таблиця 4.2.1.

Склад і властивості манганіну, константану, хромонікелевих і залізохромоалюмінієвих сплавів

Сплав	Питомий електричний опір мкОм•м	Температурний коефіцієнт питомого електричного опору $\alpha_\rho \cdot 10^6$, °К$^{-1}$	Термо-е. р.с. відносно міді мкВ/К	Гранична робоча температура, °С
Манганін (86%Cu, 12%Mn, 2%Ni)	0,42-0,48	5-30	1-2	100-200
Константан (60%Cu, 40%Ni)	0,48-0,52	-(5-25)	40-50	450-500
хромонікелеві сплави Х15Н60 (55-61% Ni, 15-18% Cr, 1,5% Mn, інше -Fe)	1,0-1,2	100-200	---	1000
Х20Н80 (76-78% Ni, 20-23% Cr, 1,5% Mn, остальное - Fe	1,0-1,1	100-200	---	1100

Для отримання малого α_ρ і високої стабільності опору в часі манганін піддають спеціальній термічній обробці - відпалу при 350-550 ° С у вакуумі з подальшим повільним охолодженням і додатковою тривалою витримкою при кімнатній температурі. Залежності ρ і α_ρ манганіну від температури наведені

на рисунку 4.2.1.

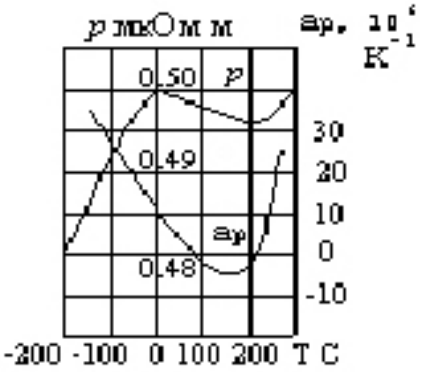


Рисунок 4.2.1 Залежність опору і температурного коефіцієнта питомого опору манганіну від температури

Константан - сплав міді та нікелю (таблиці 4.2.1). Вміст нікелю в сплаві приблизно відповідає максимуму ρ і мінімуму αρ для сплавів Ci-Ni. Константан добре піддається обробці; його можна протягувати в дріт і прокатувати в стрічку тих же розмірів, що і з манганіну. Значення α_ρ константану близько до нуля і зазвичай має негативний знак. Константан застосовують для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів в тих випадках, коли робоча температура не перевищує 400-450°С. При нагріванні до досить високої температури на поверхні константану утворюється плівка оксиду, яка має електроізоляційні властивості (оксидна ізоляція). Покриту такою ізоляцією константановий дріт можна намотувати щільно, виток до витка, без особливої ізоляції між витками, якщо тільки напруга між сусідніми витками не перевищує 1 В. Таким чином, наприклад, виготовляють реостати. Для окислення константанового дроту, що дає досить гнучку і міцну плівку оксиду, потрібно швидкий (не більше 3 с) нагрів дроту до температури 900 ° С з наступним охолодженням на повітрі.

Константан в парі з міддю або залізом набуває більшої термо-е.р.с. Це є недоліком при використанні константанових резисторів у вимірювальних схемах. За рахунок різниці температур в місцях контакту константанових провідників з мідними виникають термо-е.р.с., які можуть бути джерелом помилок, особливо при нульових вимірах в мостових і потенціометричних

схемах. Константан з успіхом застосовують для виготовлення термопар, які служать для вимірювання температури, якщо остання не перевищує декількох сотень градусів.

Хромонікелеві сплави (ніхроми) (таблиця 4.2.1) використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток, паяльників і так далі. З цих сплавів виготовляють дріт діаметром 0,02 мм і більше і стрічку перетином 0,1х1,0мм і більше .

Високу жаростійкість ніхрому (таблиця 4.2.1) можна пояснити значною стійкістю цього сплаву до прогресуючого окислення на повітрі при високих температурах.

Швидкість окислення металів в значній мірі залежить від властивостей оксиду, що утворюється. Якщо окисел летючий, то він видаляється з поверхні металу і не може захистити залишився метал від подальшого окислення. Так, оксиди вольфраму і молібдену легко випаровуються, а тому ці метали не можуть експлуатуватися в розжареному стані при доступі кисню. Якщо ж оксид металу нелетучій, то він утворює шар на поверхні металу.

Стійкість хромонікелевих сплавів при високій температурі на повітрі пояснюється близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення сплавів і їх окисних плівок. Тому оксидні плівки не розтріскуються і не відокремлюються від дроту при її нагріванні і розширенні. Однак хоча температурні коефіцієнти розширення сплаву і оксидів хрому і нікелю близькі, вони не однакові. Внаслідок цього при різких змінах температури може відбуватися розтріскування шару окислів; при подальшому нагріванні кисень проникає в тріщини і виробляє додаткове окислення сплаву. Отже, при багаторазовому короткочасному включенні електронагрівальний елемент з хромонікелевого сплаву може перегоріти швидше, ніж в разі безперервного режиму нагріву (температура нагріву одна і та ж в обох порівнюваних випадках, а термін служби може відрізнятися в 20-30 разів).

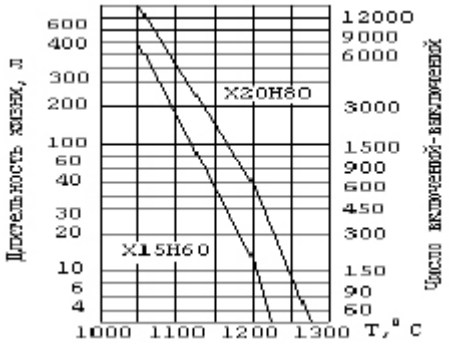


Рисунок 4.2.2 Залежність тривалості життя дроту з хромонікелевих сплавів діаметром 0,4 мм від температури нагріву при переривчастих випробуваннях

Термін служби нагрівальних елементів можна збільшити, якщо закласти спіралі в тверду інертну середу типу глини-шамоту, що охороняє їх від механічних впливів і утрудняє доступ кисню.

Тривалість життя хромонікелевих сплавів характеризує рисунок 4.2.2. Окисні плівки на поверхні нихрома мають невеликі і стабільні в широкому інтервалі температур контактні опори навіть при малих контактних зусиллях. Завдяки цьому тонкий пластичний нихромовий дріт використовується для виготовлення мініатюрних високоомних змінних резисторів з хорошими технічними характеристиками.

Тонкі плівки з ніхрому Х20Н80, одержувані методом термічного випаровування і конденсації в вакуумі, широко застосовуються для виготовлення тонкоплівкових резисторів, зокрема, резисторів інтегральних мікросхем. Хімічний склад плівок може помітно відрізнятися від складу вихідного матеріалу, який випаровується, сплаву, що обумовлено значною різницею в тисках парів нікелю і хрому при температурах випаровування. Тому склад конденсату залежить від багатьох технологічних факторів: швидкості осадження, температури і матеріалу підкладки, тиску залишкових парів в камері і інше.

Зазвичай застосовують тонкі ніхромові плівки з поверхневим опором R_ρ = 50 - 300 Ом і температурним коефіцієнтом опору α_R, що змінюються в

межах від $-3 \cdot 10^{-4}$ до $+ 2 \cdot 10^{-4}$ ° $К^{-1}$. Такі плівки мають досить гарну адгезію до діелектричних підкладок і високою стабільністю властивостей.

4.3 Сплави для термопар.

Хоча багато неметалевих матеріалів (в першу чергу напівпровідники) мають великі потенційні можливості для успішного застосування в термоелектричної термометрії, технологія їх виготовлення є недостатньо досконалою. Тому переважна більшість термопар виготовляють з металевих компонентів. Найбільш часто застосовують такі сплави:

1) копель (56% Cu і 44% Ni);

2) алюмель (95% Ni, решта - Al, Si і Mn);

3) хромель (90% Ni і 10% Cr);

4) платинородій (90% Pt і 10% Rh).

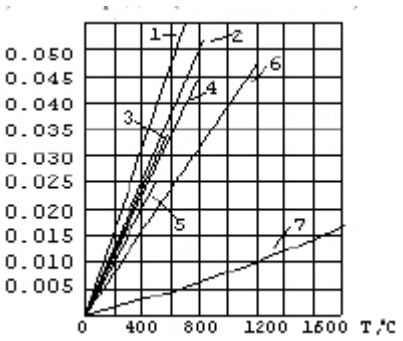


Рисунок 4.3.1 Залежність термо-е.р.с. від різниці температур гарячого і холодного спаїв для термопар: 1 - хромель-копель; 2 - залізо-копель; 3 - мідь-копель; 4 - залізо-константан; 5 - мідь-константан; 6 - хромель-алюмель; 7 - платинородій-платина

На рисунку 4.3.1 наведено залежності термо-е.р.с. від різниці температур гарячого і холодного спаїв для найбільш уживаних термопар.

Невеликі зміни складу сплаву можуть привести до значних змін термо -е.р.с. Однак це не лімітує точності вимірювань, якщо тільки термопара не використовується без попереднього градуювання.

Термопари можна застосовувати для вимірювання наступних температур: платинородій - платина до 1600°С; мідь - констант і мідь -копель до 350°С; залізо - константан, залізо - копель і хромель - копель до 600°С; хромель - алюмель до 900-1000°С. З застосовуваних в практиці термопар найбільшу термо-е.р.с. при даній різниці температур має термопара хромель - копель. Знак термо-е.р.с. у наведених на рисунку 4.3.1 термопар такий, що в холодному спаї струм направлений від першого названого в парі матеріалу до другого (тобто від хромелю до копелю, від міді до константану і так далі), А в гарячому спаї - в зворотному напрямку.

Більшість термопар стійко працює лише в окислювальному середовищі. У процесі тривалої експлуатації може спостерігатися поступова зміна питомої термо-е.р.с.

Причинами нестабільності є забруднення домішками з навколишньої атмосфери, летючість компонентів, окислення дротів, різкі перегини і деформації, які вносять внутрішні напруги і створюють фізичну неоднорідність. Найбільш високою точністю, стабільністю і відтворюваністю володіють платинородієві термопари, незважаючи на малу питому термо-е.р.с. Ці якості пояснюються хімічною інертністю матеріалу і можливістю отримувати його з високим ступенем чистоти.

4.4 Сплави тугоплавких металів

Крім чистих тугоплавких металів в електровакуумної техніці для арматури приладів застосовують сплави вольфраму з молібденом, молібдену з ренієм, вольфраму з ренієм, а також танталовольфрамові сплави. Зміною вмісту компонентів вдається отримувати необхідні механічні властивості і пластичність при необхідних електричних і термічних властивостях вироби. Наприклад, при сплаву молібдену і вольфраму, що утворюють безперервний ряд твердих розчинів, дещо знижується тугоплавкість при збереженні твердості і збільшення питомого опору. Сплав вольфраму з невеликими

добавками ренію характеризується значно більш високою температурою рекристалізації в порівнянні з чистим вольфрамом.

Тугоплавкі метали. До тугоплавким відносяться метали з температурою плавлення, що перевищує 1700°С. Як правило, вони хімічно стійкі при низьких температурах, але стають активними при підвищених. Експлуатація їх при високих температурах може бути забезпечена в атмосфері інертних газів або у вакуумі.

У щільному вигляді ці метали найчастіше отримують методами порошкової металургії - пресуванням і спіканням порошків. В електронній техніці набувають поширення методи електровакуумної технології виробництва чистих тугоплавких металів: плавка електронним або лазерним променем, зона очищення, плазмова обробка та ін. Механічна обробка цих матеріалів важка і часто вимагає їх підігріву. Основними тугоплавкими металами є вольфрам, молібден, тантал, ніобій, хром, ванадій, титан, цирконій і реній. Всі тугоплавкі метали, за винятком платини, при нагріванні на повітрі до високих температур інтенсивно окислюються з утворенням летючих з'єднань. Тому їх можна застосовувати для виготовлення лише тих нагрівальних елементів, які для виготовлення лише тих нагрівальних елементів, які працюють в вакуумі або в захисному середовищі. Однією з різновидів таких нагрівачів є випарники, що застосовуються в установках для вакуумного осадження тонких плівок. Перевагою тугоплавких металів є мізерно малий тиск насиченої пари, навіть при високих робочих температурах (рисунок 4.4.1). У виконанні цієї умови полягає основна вимога до матеріалу випарника.

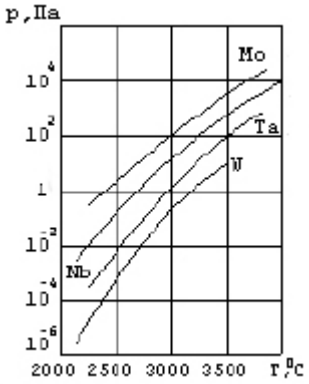


Рисунок 4.4.1 Залежність тиску насичених парів деяких тугоплавких металів від температури

Вольфрам - дуже важкий, твердий метал сірого кольору. З усіх металів вольфрам володіє найбільш високою температурою плавлення. У природі зустрічається лише у вигляді сполук. Внаслідок високої температури плавлення отримання вольфраму в вигляді компактного злитка пов'язане зі значними труднощами. Початковою сировиною для отримання вольфраму служать його власні мінерали- вольфрамит ($FeWO_4$ + $MnWO_4$) і шеелит ($CaWO_4$). Кінцевим продуктом збагачення вольфрамових руд є чиста трехокись $W0_3$, з якої відновленням воднем при нагріванні до 900°С отримують металевий вольфрам у вигляді дрібного порошку. З цього порошку при тиску до 200 МПа відпресовують стрижні, які в подальшому піддають складній термічній обробці в атмосфері водню (щоб уникнути окислення), куванні і волочіння в дріт Діаметром до 0,01 мм, прокатці в листи і тому подібне.

Характерною особливістю вольфраму, що відрізняє його від інших металів, є висока внутрікристалічна міцність при дуже слабкому зчепленні між окремими зернами. Тому спечені вироби, що володіють дрібнозернистою будовою, тендітні і легко ламаються. В результаті механічної обробки куванням та волочінням вольфрам набуває волокнисту структуру і злам його дуже ускладнений. Цим пояснюється гнучкість тонких вольфрамових ниток. Крім того, при зменшенні товщини вольфрамового дроту сильно зростає її межа міцності при розтягуванні (від 500 - 600 МПа для кованих стрижнів

діаметром 5 мм до 3000- 4000 МПа для тонких ниток; останні мають відносне подовження при розриві близько 4%). При нагріванні тягнутого вольфраму до високих температур починається процес рекристалізації, таким чином укрупнення зерен. Волокниста структура поступово зникає, а окремі зерна збільшуються в розмірах до площі поперечного перерізу дроту. Такий рекрісталлізований вольфрам внаслідок слабкого міжзеренного зчеплення стає дуже крихким. Крім того, при високих температурах утворилися великі кристаліти отримують можливість ковзати, «провисати» під дією власної маси щодо, один одного.

Тому дроту і спіралі, виготовлені з чистого вольфраму, при високих температурах виявляються дуже неміцними і неформостійкими. Для поліпшення властивостей чистого вольфраму в нього вводять різні присадки. Найефективнішою присадкою, яка уповільнює процес рекристалізації, є окис торію Th_20_3, яка, утворюючи прошарки між зернами вольфраму, ускладнює дифузію його атомів і внаслідок цього перешкоджає росту кристалів.

Для досягнення більшої формостікості вводять добавки оксидів кремнію, алюмінію, кальцію. Зазначені присадки викликають кристалізацію, головним чином в напрямку осі дроту. Присадки утворюють структуру з подовженими кристалами, що взаємно зачіпляються по великій поверхні, тобто розташованими «внахлест». Такий вольфрам отримав назву непровісающего. Він використовується для виготовлення ниток ламп розжарювання. У цій області застосування вольфрам не має конкурентів. Вперше застосування вольфраму для виготовлення ниток ламп розжарювання було запропоновано російським винахідником А. Н. Лодигіна в 1890 р

Вольфрам є одним з найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. З нього виготовляють електроди, підігрівачі, пружини, гачки в електронних лампах, рентгенівських трубках і тому подібне. В електровакуумному виробництві застосовують вольфрам марок ВА (з кремень-алюмінієвою присадкою) і ВТ (з присадкою оксиду торію). Добавка

окису торію не тільки підвищує механічну міцність вольфраму, а й покращує емісійні властивості катодів за рахунок зниження роботи виходу електронів.

Вольфрам має найменшим температурним коефіцієнтом лінійного розширення серед усіх чистих металів. Це його властивість виявляється цінним при виготовленні термічно узгоджених спаїв вольфраму з тугоплавкими стеклами, які теж мають низький температурний коефіцієнт лінійного розширення.

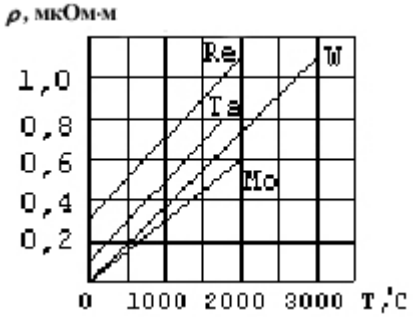


Рисунок 4.4.2 Залежність питомого опору вольфраму, молібдену, танталу і ренію від температури

Молібден - метал, за зовнішнім виглядом, а також за технологією обробки близький до вольфраму. Найважливішою промислової рудою молібдену є молибденит MoS_2. Мікроструктура спеченого, кованого і тяинутого молібдену подібна до структури аналогічно оброблених зразків вольфраму. Однак волокниста структура тягнутого молібдену виражена менш чітко. Нерекрісталлізованний молібден за механічними властивостями близький до вольфраму, але в рекрісталлізованному стані між ними є велика різниця, що полягає в тому, що рекрісталлізованний вольфрам при кімнатній температурі завжди крихкий, в той час як відпалений дрібнозернистий молібден характеризується високою пластичністю. Завдяки цьому механічна обробка заготовок з молібдену при отриманні різних деталей не представляє особливих труднощів. Поліпшення структури і підвищення механічної міцності молібдену домагаються введенням спеціальних присадок, таких, як окис кремнію, окис торію та інше. При кімнатній температурі молібден -

хімічно інертний метал, але більш активний, ніж вольфрам. На повітрі починає окислюватися при 300°С з утворенням нижчих оксидів, а при температурі вище 600°С утворюється трехокись MoO_3, яка швидко випаровується при 700°С. Деталі повинні працювати у вакуумі або відновлювальному середовищі, тому що нагріваються.

Серед усіх тугоплавких металів молібден має найменший питомий опор (рисунок 4.4.2). Висока міцність молібдену в поєднанні з хорошою пластичністю роблять його одним з кращих провідникових матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють при високих температурах. З молібдену виготовляють сітки і електроди електронних ламп, рентгенівських трубок і різні допоміжні деталі електровакуумних приладів з напруженим тепловим режимом.

Дуже важливим є застосування молібдену для виготовлення вакуумщільних термічно узгоджених вводів в балони з тугоплавкого скла. Молібден використовується також в якості нагрівальних елементів електричних печей. Такі елементи в захисній атмосфері можуть стійко працювати при температурах 1700°С, при яких ще слабо виражені процеси рекристалізації в молібдені.

У електровакуумної техніці найбільш поширені марки молібдену МЧ (молібден чистий) і МК (молібден з присадкою оксиду кремнію). Останній має підвищену механічну міцність при високих температурах.

Тантал - метал, що отримується з мало поширеною руди - танталіту $Fe(TaO_3)$ 2 методами порошкової металургії подібно вольфраму і молібдену. Основна відмінність його полягає лише в тому, що процес спікання пресованих штабиков ведуть у вакуумних печах. Це викликано тим, що тантал схильний до поглинання газів, в результаті чого він стає крихким. Механічні операції кування і протягання на відміну від вольфраму і молібдену виробляють при кімнатній температурі. Тантал виготовляють у вигляді дроту, прутків, листів, стрічок та фольги товщиною до 10 мкм. У виробництві використовують матеріал Т (тантал підвищеної чистоти), ТЧ

(тантал високої чистоти) і сплави танталу з ніобієм, маркуються ТН. Тантал характеризується високою пластичністю навіть при кімнатній температурі. Межа міцності танталу при розтягуванні може змінюватися, в залежності від механічної і термічної обробок, від 350 до 1250 МПа.

При нагріванні на повітрі і при анодному окисленні на поверхні танталу утворюється щільна плівка оксиду Ta_2O_5, яка не розкладається аж до температури близько 1500°С. На противагу вольфраму і молібдену тантал не стає крихким при нагріванні в вакуумі до дуже високих температур. Здатність попередньо обезгаженного танталу поглинати гази в діапазоні температур 600-1200°С в поєднанні з тугоплавкостью, хорошою пластичністю і формостійкістю ставлять цей метал в ряд найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. Однак з огляду на природню дефіцитность і відносно високу вартість тантал використовується переважно для відповідальних виробів, що працюють в напруженому тепловому режимі, або в тих випадках, коли до вакууму пред'являють жорсткі вимоги. Зокрема, з танталу виготовляють аноди і сітки генераторних ламп, катоди прямого і непрямого напруження і різні допоміжні деталі електровакуумних приладів. Тантал широко використовується у вакуумній технології як випарники при осадженні тонких плівок різних речовин. Особливе значення тантал має при виробництві конденсаторів. Широке застосування отримали електролітичні і тонкоплівкові конденсатори, одержувані анодуванням. Тантал являє собою приклад металу, що утворює однорідні плівки оксиду у водних розчинах майже будь-якого електроліту. Завдяки підвищеній діелектричної проникності п’ятиокиси Ta_2O_5 ($\varepsilon = 25$), такі конденсатори мають велику питому ємність.

Складовою частиною «танталової технології» є виробництво тонкоплівкових резисторів з цього матеріалу. Внаслідок високої тугоплавкости танталу для отримання тонких плівок кращими є методи катодного або іонно-плазмового розпилення в чистому аргоні, а не термічне випаровування в вакуумі. У металевих плівок танталу спостерігається суттєва зміна питомого опору під електричним навантаженням в атмосферних

умовах, що пояснюють розчиненням в них азоту і кисню. У міру легування танталу азотом стабільність плівок поліпшується. Найкращою часовою стабільністю володіють плівки нітриду Ta_2N, які найбільш широко застосовують для виготовлення резисторів. На рисунку 4.4.3 показана залежність електричних властивостей резистивних плівок від парціального тиску азоту в процесі осадження танталу. Важлива властивість азотовмісних танталових плівок полягає в тому, що їх можна анодувати, як і чистий тантал.

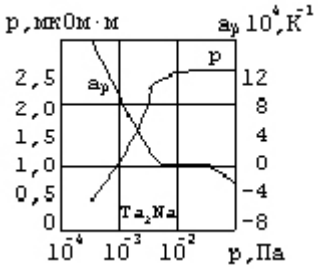


Рисунок 4.4.3 Залежність питомого опору і температурного коефіцієнта питомого опору танталових плівок від парціального тиску азоту

Ніобій - метал, за властивостями близький до танталу і знаходиться, як правило, в тих же рудах, що і тантал. Отримують його також методами порошкової металургії. Метал, що містить 99,4% Nb, високопластічен і випускається у вигляді прутків, листів, стрічки, фольги і дроту.

Ніобій має високу газопоглинаючу здатність в інтервалі температур 400-900°С. Тому в електровакуумних приладах конструктивні деталі з ніобію одночасно виконують функції нерозпиляючего геттера. Серед тугоплавких металів ніобій має найменшу роботу виходу електронів. Тому його застосовують як катоди, що розжарюються в потужних генераторних лампах.

Серед всіх елементарних речовин ніобій характеризується найвищою критичною температурою переходу в стан надпровідності (9,2 К). Однак критичні напруженості магнітного поля у ніобію недостатні для його широкого застосування.

Хром - вельми поширений в земній корі елемент, що володіє високою стійкістю до окислення (дивись рисунок 4.3.2), а тому що використовується для захисних покриттів виробів, в тому числі експлуатованих при

підвищених температурах. Хромування виробляють електролітично або за допомогою насичення хромом поверхневих шарів сталевих виробів за допомогою дифузії із зовнішнього середовища.

З тонких плівок хрому виготовляють резистори і адгезійні підшари для контактних майданчиків і струмопровідних з'єднань в інтегральних мікросхемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів. Електричні властивості хромових плівок дуже чутливі до умов нанесення через поглинання залишкових газів в процесі осадження. Однак хром має гарну адгезію до скляних, сіталлових і керамічних подложкам. Крім того, хром добре сумісний з будь-яким провідним матеріалом. Додатковою перевагою хрому є легкість сублімації при отриманні плівок. Зазвичай для цих цілей використовують вольфрамовий або молібденовий випарник. Термообробка плівок хрому у вакуумі викликає зниження опору внаслідок ефектів відпалу, відсутніх у більш тугоплавких плівок, таких, наприклад, як тантал. Хром входить до складу великої кількості сплавів для нагрівальних приладів, термопар, конструкційних нержавіючих, жароміцних сталей і магнітних матеріалів.

Реній - один з рідкісних дуже важких металів, з температурою плавлення, близької до температури плавлення вольфраму. Отримують реній методами порошкової металургії. Він відрізняється рідкісним поєднанням властивостей, що задовольняють більшості вимог електровакуумної техніки. В атмосфері водню і у вологому середовищі він випаровується в меншій мірі, ніж вольфрам. Реній і його сплави з вольфрамом застосовують у виробництві електроламп і електровакуумних приладів замість вольфраму. Це забезпечує більш тривалий термін служби в умовах динамічних навантажень. Реній і його сплави разом з вольфрамом дозволяють створювати термопари для вимірювань температур до 2500- 2800°С у вакуумі, водні або інертному середовищі.

У радіоелектроніці реній застосовують для захисту від корозії і зносу деталей з міді, срібла, вольфраму, молібдену. Тонкі плівки ренію, одержувані

шляхом випаровування електронним променем у високому вакуумі, використовуються для створення прецизійних резисторів в інтегральних схемах.

4.5 Припої

Припої являють собою спеціальні сплави, що застосовуються при паянні. Пайку здійснюють або з метою створення механічно міцного (іноді герметичного) шва, або для отримання електричного контакту з малим перехідним опором. При паянні місця з'єднання і припій нагрівають. Так як припій має температуру плавлення значно нижче, ніж сполучається метал (або метали), то він плавиться, в той час як основний метал залишається твердим. На кордоні 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, яка після застигання з'єднує деталі в одне ціле.

Припої прийнято ділити на дві групи - м'які і тверді. До м'яких відносяться припої з температурою плавлення до 300 ° С, до твердих - вище 300 ° С. Крім того, припої істотно розрізняються по механічної міцності. М'які припої мають межу міцності при розтягуванні 16-100 МПа, тверді - 100-500 МПа. Тверді припої відрізняються більш високою міцністю при розтягуванні. До них відносяться головним чином мідно-цинкові (ПМЦ) і срібні (ПСР) припої. Вибирають припій з урахуванням фізико-хімічних властивостей металів, що сполучаються, необхідної механічної міцності спаю, його корозійної стійкості і вартості. При пайку струмоведучих частин необхідно враховувати питому провідність припою. Припій вибирають і в залежності від виду з'єднуються металів або сплавів, розміру деталей. Для

пайки товстих проводів використовують припої з температурою плавлення вищою, ніж для пайки тонких проводів.

У радіотехнічної промисловості та радіоаматорської практиці найбільш широко використовуються олов'яно-свинцеві припої. Їх поділяють на бессурьм’яністі, що містять не більше 0,05 ... 0,5% сурми, і сурм'янисті, що містять 0,5 ... 6% сурми (ГОСТ 21930 - 76). Малосурм'янисті припої рекомендуються для пайки цинкових і оцинкованих деталей, сурм'янисті - в основному для пайки сталевих деталей.

М'якими припоями є олов'яно-свинцеві сплави (ПОС) з вмістом олова від 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90), решта свинець. Провідність цих припоїв становить 9-15% провідності чистої міді, а температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу α_l = (26 - 27) $\cdot 10^{-6}°К^{-1}$. Велика кількість олов'яно-свинцевих припоїв містить невеликий відсоток сурми (наприклад, від ПОС-61-05 до ПОС-8-3, решта свинець).

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

Основні характеристики припоїв наведені в таблиці 4.5.1.

Таблиця 4.5.1.

Основні характеристики і область застосування припоїв

марка	Склад, %	Температура плавлення, ºС	міцність при розтягуванні, кг/мм	застосування
1	2	3	4	5
ПОС-90	олово 89…91, свинець-інше	220	4,9	для пайки харчового посуду і медичних інструментів
1	2	3	4	5

ПОС-61	олово 60…62, свинець-інше	190	4,3	для лудіння і пайки в апаратурі, де неприпустимий перегрів
ПОС-40	олово 39…41, свинець-інше	238	3,8	Для пайки в електроапаратурі і деталей з оцинкованої сталі
ПОС-30	олово 29…31, свинець-інше	256	3,2	Для лудіння і пайки деталей з міді і її сплавів і сталі
ПОС-10	олово 9…11, свинець-інше	299	4,5	Для лудіння і пайки контактних поверхонь в електроапаратурі
ПОС-61М	олово 49…51, мідь 1,2….2, свинець-інше	192	6,7	Для лудіння і пайки електропаяльником тонких мідних проводів, друкованих провідників і фольги
ПОСК-50-18	олово 49…51, кадмій 17….19, свинець-інше	145	----	Для пайки чутливих до перегріву деталей
1	2	3	4	5

ПОССу30-20	Олово-30, сурма-0,5	255	----	Для лудіння і пайки деталей з міді і її сплавів, кабелів.
ПОССр-15	Олово - 15, цинк -0.6, свинець - 83, 15, срібло - 1,25	276	----	Для пайки деталей з цинку і оцинкованої сталі
Авіа-1	Олово - 55, цинк - 25, кадмій - 20	200	---	Для пайки тонкостінних деталей з алюмінію і його сплавів
Авіа-2	Олово - 40, цинк - 25, кадмій - 20, алюміній інше	250	---	Для пайки тонкостінних деталей з алюмінію і його сплавів
34А	Мідь - 27 ... 29, кремній - 5 ... 7, алюміній -інше	525	----	Для пайки деталей з міді та її сплавів при високих вимогах до міцності з'єднання
1	2	3	4	5

МФ1	Фосфор - 8,5 ... 10, мідь - інше	800	----	Для пайки деталей з міді та сталей при невисоких вимогах до міцності з'єднання
ПСр-25	Мідь - 40, срібло - 25, цинк - 35	780	28	Для пайки деталей з сталей, міді і її сплавів при високих вимогах до міцності і антикорозійної стійкості
Сплав Вуда	Олово - 12,5, свинець - 25, кадмій - 12,5, вісмут - 50	60,5	---	Для пайки в тих випадках, коли потрібно дуже низька температура плавлення припою
Сплав д'Арсе	Олово - 9,6, свинець - 45,1, вісмут - 45,3	79	----	Для пайки в тих випадках, коли потрібно дуже низька температура плавлення припою

Примітка. У припоях марок ПОС допускаються наступні домішки (%): вісмут - 0,1, миш'як - 0,05, залізо, сірка - до 0,02, цинк, алюміній - до 0,002, мідь - до 0,05. У припої марки ПСР-25 допускається не більше 0,5% домішки, в тому числі не більше 0,15% свинцю.

Допоміжні матеріали для отримання надійної пайки називають флюсами. Вони повинні:

1) розчиняти і видаляти оксиди і забруднення з поверхні металів, що спаюються;

2) захищати в процесі пайки поверхню, а також розплавлений припій від окислення;

3) зменшувати поверхневий натяг розплавленого припою;

4) покращувати розтікання припою і змочуваність їм поверхонь, що з'єднуються.

По впливу на метал, що піддається пайке, флюси поділяють на кілька груп.

Активні, або кислотні, флюси готують на основі активних речовин - соляної кислоти, хлористих і фтористих металів і так далі. Ці флюси інтенсивно розчиняють окисні плівки на поверхні металу, завдяки чому забезпечується хороша адгезія, а, отже, висока механічна міцність з'єднання. Залишок флюсу після пайки викликає інтенсивну корозію з'єднання і основного металу. Застосовують ці флюси тільки в тому випадку, коли можлива ретельна промивка і повне видалення їх залишків. При монтажної пайке електрорадіоприладів застосування активних флюсів категорично заборонено.

Безкислотними флюсами називають каніфоль і флюси, що готуються на її основі з додаванням неактивних речовин (спирту, гліцерину).

Активовані флюси готують на основі каніфолі з добавкою активизаторів - невеликих кількостей солянокислого або фосфорнокислого аніліну, саліцилової кислоти, солянокислого діетиламіну і тому подібне.

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

4.6 Неметалічні матеріали, що проводять

Поряд з металами і металевими сплавами як резистивних, контактних і струмопровідних елементів досить широко використовуються різні композиційні матеріали, деякі оксиди і модифікації вуглецю, що проводять. Як правило, ці матеріали мають вузькоспеціалізоване призначення.

Вуглецеві матеріали. Серед твердих неметалевих провідників найбільш широке застосування в електротехніці отримав графіт - одна з алотропних форм чистого вуглецю. Поряд з малим питомим опором цінними властивостями графіту є значна теплопровідність, стійкість до багатьох хімічно агресивних середовищ, висока нагрівустійкість, легкість механічної обробки. Для виробництва електровугільних виробів використовують природний графіт, антрацит і пиролитический вуглець.

Природний графіт являє собою крупнокристалличний матеріал з дуже високою температурою плавлення (близько 3900 °С). При вільному доступі кисню і високій температурі він окислюється, утворюючи газоподібні оксиди CO і CO_2.

Піролітичний вуглець отримують шляхом термічного розкладання парів вуглеводнів у вакуумі або в середовищі інертного газу (піроліз). Як речовини, що піддаються піролізу, зазвичай вибирають сполуки метанового ряду. Для отримання щільної структури потрібна температура піролізу не менше 900 °С. Плівки пиролитического вуглецю широко застосовуються для отримання лінійних резисторів поверхневого типу. Дрібнодисперсним різновидом вуглецю є сажа. Її отримують як продукт неповного згоряння або термічного розкладання речовин, що містять вуглець. Будучи введеними в сполучну речовину, сажі проявляють схильність до структуроутворення.

Виробництво більшості вугільних виробів полягає в подрібненні вуглецевої сировини в порошок, змішуванні його з єднальними речовинами, формуванні і випалюванні, після якого вироби набувають достатню механічну міцність і твердість, допускають механічну обробку.

Графіт широко використовується в технології напівпровідникових матеріалів для виготовлення різного роду обігрівачів і екранів, човників, тиглів, касет і тому подібне. У вакуумі або захисних газових середовищах вироби з графіту можуть експлуатуватися при температурах до 2500 °С.

Особливу модифікацію графіту скловуглець, одержують полімеризацією органічних полімерних смол типу бакеліта, що проводиться в атмосфері нейтральних газів протягом тривалого часу. Вироби, що виготовляються мають блискучу поверхню, склоподібний вид і раковистий злам. Скловуглець відрізняється від звичайного графіту підвищеною хімічною стійкістю.

Композиційні матеріали, що проводять. Композиційні матеріали являють собою механічну суміш наповнювача, що проводить з діелектричною зв'язкою. Шляхом зміни складу і характеру розподілу компонентів можна в досить широких межах керувати електричними властивостями таких матеріалів. Особливістю всіх композиційних матеріалів є частотна залежність провідності і старіння при тривалому навантаженні. У ряді випадків помітно виражена нелінійність електричних властивостей.

В якості компонентів провідної фази використовують метали, графіт, сажу, деякі оксиди і карбіди. Функції сполучної речовини можуть виконувати як органічні, так і неорганічні діелектрики.

Серед різноманіття комбінованих провідних матеріалів найбільшої уваги заслуговують контактол і кермети. Контактол, використовують в якості струмопровідних клеїв, фарб, покриттів і емалей, являють собою малов’язкі або пастоподібні полімерні композиції. Як сполучна речовина в них використовують різні синтетичні смоли (епоксидні, фенол-формальдегідні, кремнійорганічні і інші), а струмопровідним наповнювачем є дрібнодисперсні порошки металів (срібла, нікелю, паладію). Необхідна в'язкість контактолу перед їх нанесенням на поверхню забезпечується введенням розчинників (ацетон, спирт і тому подібне). Велику роль у формуванні контактів між частинками металів в композиції відіграють

внутрішні напруги, що виникають при відкиданні в результаті усадки через випаровування розчинника і полімеризації сполучної речовини. Внутрішня напруга підводить до появи контактного тиску між частинками наповнювача, що обумовлює різке зменшення контактних опорів.

Контактол використовують для отримання контактів між металами, металами та напівпровідниками, створення електродів на діелектриках, екранування приміщень і приладів від перешкод, для струмопровідних комунікацій на діелектричних підкладках, в гнучких волноводах та інших виробах електронної промисловості.

Керметом називають металодіелектричні композиції з неорганічним сполучною. Вони призначені для виготовлення тонкоплівкових резисторів. Істотною перевагою: керметних плівок є можливість варіювання їх питомим опором в широких межах. Найбільшого поширення набула мікрокомпозиція Cr - SiO, тонкі плівки якої виготовляють методом термічного випаровування і конденсації в вакуумі її наступною термообробкою для стабілізації властивостей.

При термообробці за рахунок взаємодії компонентів відбувається витіснення окисною прошарку між зернами з утворенням фази Cr_3Si. В результаті опір ізоляційних прошарків між зернами замінюється опором контактування.

У товстоплівкових мікросхемах використовують резистори, одержувані на основі композиції скла з паладієм і сріблом. Для цієї мети скло розмелюють в порошок до розміру зерен 3-55 мкм, змішують з порошком срібла і паладію, допоміжною органічною зв'язкою і розчинником. Одержану пасту наносять на: керамічну підкладку і спекають в звичайній атмосфері. Питомий опір плівок залежить від процентного вмісту компонентів, що проводять, і режиму спікання.

Провідні матеріали на основі оксидів. Переважна більшість чистих окислів металів в нормальних умовах є хорошими діелектриками. Однак при неповному окисленні (при порушенні стехіометричного складу за рахунок

утворення кисневих вакансій), а також при введенні деяких домішок провідність оксидів різко підвищується. Такі матеріали можна використовувати і як контактних і резистивних шарів. Найбільший практичний, інтерес в цьому плані являє двоокис олова. У радіоелектроніці вона використовується переважно у вигляді тонких плівок. Такі плівки отримують різними способами: термічним вакуумним випаровуванням і конденсацією з подальшим відпалом на повітрі, окисленням плівок металевого олова, обложеного на діелектричну підкладку, реактивним катодним або іонно-плазмовим розпиленням і інше.

Окисні плівки SnO_2 відрізняються дуже сильним зчепленням з керамічною або скляною підкладкою. Міцність зчеплення досягає 20 МПа, що набагато більше, ніж у металевих плівок. Питомий опір плівок залежить від ступеня порушення стехіометричного складу і може становити 10^{-5}Ом·м. Нагрівання плівок з SnO_2 вище 240 °С призводить до необоротної зміни опору в результаті більш повного окислення.

Разом з тим плівки стійкі до багатьох хімічних середовищ - руйнуються тільки плавиковою кислотою і киплячім лугом. Тонкі шари двоокису олова мають цінну оптичну властивість - високу прозорість у видимій та інфрачервоній частинах спектра. Власне поглинання плівок SnO_2 завтовшки до 2 мкм у видимій частині спектру не перевищує 3%. Поєднання високої оптичної прозорості та підвищеної електричної провідності плівок двоокису олова обумовлює застосування їх в якості покриттів, що проводять, на внутрішніх стінках скляних балонів електровакуумних приладів, електродів електролюмінесцентних конденсаторів і рідкокристалічних індикаторів, передавальних телевізійних трубок, перетворювачів і підсилювачів зображення та інше.

Крім двоокису олова, високою електричну провідність і прозорість в видимій області спектра мають плівки окису індію In_2O_3. Вони мають аналогічне застосування.

4.7 Надпровідні матеріали.

Явище надпровідності при кріогенних температурах досить широко поширене в природі. Надпровідністю володіють 26 металів. Більшість з них є надпровідниками I роду з критичними температурами переходу нижче 4,2 ° К. В цьому полягає одна з причин того, що більшість надпровідних металів для електротехнічних цілей застосувати не вдається. Ще 13 елементів проявляють надпровідні властивості при високому тиску. Серед них такі напівпровідники, як кремній, германій, селен, телур, сурма та інші. Слід зауважити, що надпровідністю не володіють метали, які є найкращими провідниками в нормальних умовах. До них відносяться золото, мідь, срібло. Малий опір цих матеріалів вказує на слабку взаємодію електронів з решіткою. Така слабка взаємодія не створює при Т ≈ 0 °К достатнього міжелектронного тяжіння, здатного подолати кулонівське відштовхування. Тому і не відбувається перехід таких металів в надпровідний стан.

Крім чистих металів надпровідність мають багато інтерметалеві з'єднання і сплави. Загальна кількість найменувань відомих в даний час надпровідників складає близько 2000. Серед них найвищими критичними параметрами володіють сплави і сполуки ніобію (таблиця 4.7.1). Деякі з них дозволяють використовувати для досягнення надпровідного стану замість рідкого гелію дешевший холодоагент - рідкий водень.

Все інтерметалеві з'єднання і сплави відносяться до надпровідників II роду. Однак поділ речовин по їх надпровідним властивостям на два види не є абсолютним. Будь-який надпровідник I роду можна перетворити в надпровідник II роду, якщо створити в ньому достатню концентрацію дефектів кристалічної решітки. Наприклад, у чистого олова $T_{СВ}$ = 3,7 ° С, але якщо викликати в олові різко неоднорідну механічну деформацію, то критична температура зросте до 9 °К, а критична напруженість магнітного поля збільшиться в 70 разів. Надпровідність ніколи не спостерігається в системах, в яких існує ферро- або антиферомагнетизм. Утворенню

надпровідного стану в напівпровідниках і діелектриках перешкоджає мала концентрація вільних електронів. Однак в матеріалах с. великою діелектричною проникністю сили кулонівського відштовхування між електронами в значній мірі послаблені. Тому деякі з них також виявляють властивості надпровідників при низьких температурах. Прикладом може служити титанат стронцію ($SrTiO_3$), що відноситься до групи сегнетоелектриків. Ряд напівпровідників вдається перевести в надпровідний стан добавкою великої концентрації легуючих домішок (GeTe, SnTe, CuS і інші).

Таблиця 4.7.1

Основні властивості надпровідних сплавів

матеріал	$T_{нд}$, ºК	$\mu_0 H_{нд1}(0)$, Тл	$\mu_0 H_{нд2}(0)$, Тл	$J_{доп}(0)$, А/м^2	Відмінні особливості
V_3 Ga	14,8	0,6	21	$1{,}6\cdot10^9$	задовільні механічні властивості
V_3 Si	17,0	0,62	23,4	$2\cdot10^9$	задовільні механічні властивості
Nb_3Sn	18,3	0,54	24,5	$2{,}4\cdot10^9$	Висока щільність струму, технологічність
Nb_3Ga	20,3	----	34,0	----	Висока температура переходу, технологічність
Nb $_3$Ge	21-24 ,3	----	37,0	$1\cdot10^9$	Найбільш висока температура переходу

В даний час промисловість випускає широкий асортимент надпровідних дротів і стрічок для самих різних цілей. Виготовлення таких провідників пов'язано з великими технологічними труднощами. Вони обумовлені поганими механічними властивостями багатьох надпровідників,

їх низькою теплопровідністю і складною структурою проводів. Особливо великою крихкістю відрізняються інтерметалеві з'єднання з високими критичними параметрами. Тому замість простих дротів і стрічок доводиться створювати композиції з двох (зазвичай надпровідник з міддю) і навіть декількох металів. Для отримання багатожильних проводів з тендітних интерметалидів застосовується бронзовий метод (або метод твердофазної дифузії), освоєний промисловістю. За цим методом пресуванням і волочінням створюється композиція з тонких ниток ніобію в матриці з олов'яної бронзи. При нагріванні олово з бронзи дифундує в ніобій, утворюючи на його поверхні тонку надпровідну плівку станід ніобію Nb_3Sn. Такий джгут може згинатися, але плівки залишаються цілими.

Застосування надпровідників. Надпровідні елементи і пристрої знаходять все більш широке застосування в самих різних областях науки і техніки. Розроблено великомасштабні довгострокові програми промислового використання потужнострумової надпровідності.

Одне з головних застосувань надпровідників пов'язано з отриманням надсильних магнітних полів. Надпровідні соленоїди дозволяють одержувати однорідні магнітні поля напруженістю понад 10^7 А/м в досить великій області простору, в той час як межею звичайних електромагнітів із залізною серцевиною є напруженості близько 10^6 А/м. До того ж в надпровідних магнітних системах циркулює незатухаючий струм, тому не потрібне зовнішнє джерело живлення. Сильні магнітні поля необхідні при проведенні наукових досліджень. Надпровідні соленоїди дозволяють значною мірою зменшити габарити і споживання енергії в синхрофазотронах і інших прискорювачах елементарних частинок. Вважається перспективним використання надпровідних магнітних систем для утримання плазми в реакторах керованого термоядерного синтезу, в магнітогідродинамічних (МГД) перетворювачах теплової енергії в електричну, як індуктивних накопичувачів енергії для покриття пікових потужностей в масштабах великих енергосистем. Широкий розвиток отримують розробки електричних

машин з надпровідними обмотками збудження. Застосування надпровідників дозволяє виключити з машин сердечники з електротехнічної сталі, завдяки чому зменшуються в 5-7 разів маса і габаритні розміри машин при збереженні потужності. Економічно обгрунтовано створення надпровідних трансформаторів, розрахованих на високий рівень потужності (десятки-сотні мегават). Значна увага в різних країнах приділяється розробці надпровідних ліній електропередач на постійному і змінному струмі.

Розроблено дослідні зразки імпульсних надпровідних котушок Для живлення плазмових гармат і систем накачування твердотільних лазерів. У радіотехніці починають використовувати надпровідні об'ємні резонатори, що володіють, завдяки мізерно малому електричному опору, дуже високою добротністю. Принцип механічного виштовхування надпровідників з магнітного поля покладений в основу створення надшвидкісного залізничного транспорту на «магнітній подушці».

Порушення надпровідності матеріалу зовнішнім магнітним полем використовується в конструкції приладу, який називають кріотрон. На рисунку 4.7.1 схематично зображено пристрій плівкового кріотрону. В умовах $T < T_{ce}$ плівка з олова залишається надпровідною до тих пір, поки магнітне поле, створюване струмом, пропущеним через свинцевий надпровідник, не перевищить критичного для олова значення. На кріотронних елементах можна виконати осередок обчислювальних машин. З кріотронів можна зібрати будь-яку схему пам'яті або перемикання. Два стану з нульовим і кінцевим опорами природно ототожнити з позиціями 0 і 1 в двійковій системі числення. Перевагами осередків на плівкових кріотронах є висока швидкодія, малі втрати і надзвичайна компактність. Широкі перспективи застосування надпровідників відкриває вимірювальна техніка.

Доповнюючи можливості наявних вимірювальних засобів, надпровідні елементи дозволяють реєструвати дуже тонкі фізичні ефекти, вимірювати з високою точністю і обробляти велику кількість інформації.

Вже зараз на основі надпровідності створені високочутливі болометри для реєстрації ІЧ-випромінювання, магнітометри для вимірювання слабких магнітних потоків, індикатори надмалих напруг і струмів. Коло цих приладів безперервно розширюється.

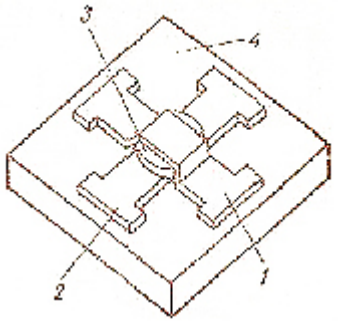


Рисунок 4.7.1 Схема плівкового кріотрону: 1 - керуюча плівка зі свинцю; 2 - вентильная плівка з олова; 3 - ізоляційний шар; 4 – підкладка

5. ФЕРРОМАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Основні характеристики феромагнітних матеріалів

Матеріали, здатні сильно намагнічуватися в слабких магнітних полях, називають феромагнітними (феромагнетиками). Магнітна сприйнятливість феромагнетиків (відношення намагніченості матеріалу до напруженості магнітного поля) має великі позитивні значення (до сотень тисяч і мільйонів). До феромагнетиків відносяться залізо, нікель, кобальт і їхні сплави, а також ферити. З них виготовляють магнітопроводи трансформаторів, сердечники котушок індуктивності, постійні магніти, екрани і тому подібне.

Основні характеристики феромагнетиків визначаються по кривим намагнічування по індукції (залежностям магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H). Початкова крива намагнічування по індукції - крива, що виражає залежність B від H в процесі намагнічування попередньо термічно розмагніченого магнітного матеріалу при послідовному зростанні напруженості магнітного поля (ГОСТ 19693-74). При циклічному

намагнічуванні крива намагнічування утворить петлю гістерезису. Петля гістерезису по індукції - замкнута крива, що виражає залежність індукції матеріалу від амплітуди напруженості поля при періодичній досить повільній зміні напруженості поля (ГОСТ 19693 - 74). На рисунку 5.1. показано сімейство симетричних петель гистерезиса, отриманих при різних максимальних значеннях напруженості поля H_m.

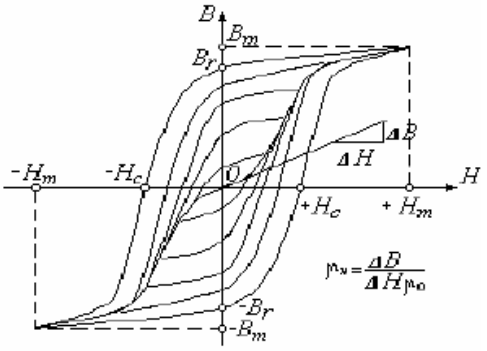


Рисунок 5.1. Сімейство симетричних петель гистерезиса по індукції.

Крива, що представляє собою геометричне місце вершин симетричних петель гистерезиса, які виходять при послідовному зростанні максимального значення H_m, називають основною кривою намагнічування по індукції (ГОСТ 19693 - 74). Ця крива є найважливішою характеристикою матеріалу, задовольняє вимогам хорошої відтворюваності і широко використовується для характеристики намагнічування матеріалу в постійних полях. У довідниках зазвичай призводять граничні симетричні петлі гистерезиса, які отримують за умови насичення матеріалу. Індукція насичення B_S - значення індукції, відповідне насиченню, тобто такого стану матеріалу, при якому магнітна індукція не змінюється при зміні напруженості магнітного поля. Основна одиниця індукції - тесла (Тл). Залишкова індукція B_r - індукція, яка залишається в матеріалі після зняття зовнішнього магнітного поля. Коерцитивна сила по індукції H_c - величина, що дорівнює напруженості магнітного поля, необхідного для зміни індукції від B_r до нуля. Основна одиниця напруженості поля - ампер на метр (А/м). Абсолютна магнітна проникність - величина, що характеризує магнітні властивості речовини і

дорівнює відношенню модулів магнітної індукції і напруженості магнітного поля (ГОСТ 19880 - 74). Відносна магнітна проникність (або просто магнітна проникність) - відношення абсолютної магнітної проникності до магнітної постійної, тобто $\mu = \mu_a/\mu_o$, де $\mu_o = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м = 1,257 мкГн/м. Початкова магнітна проникність $\mu_п$ - значення магнітної проникності на початковій або основній кривій намагнічування по індуктивності при прагненні напруженості магнітного поля до нуля, поділене на магнітну постійну (ГОСТ 19693-47). Практично визначається за нахилом дотичної до основної кривої намагнічування (рисунок 5.1). Петля гістерезису по індукції, отримана при намагнічуванні речовини змінним магнітним полем, називається динамічною. Така петля гістерезису характеризує витрати енергії протягом одного циклу перемагнічування. У загальному випадку вона ширше, ніж петля гістерезису при перемагнічуванні постійним полем, так як відображає втрати не тільки на гістерезис, але і на вихрові струми, а також додаткові втрати.

Крива, що представляє собою геометричне місце вершин динамічних петель гістерезису, отриманих при послідовному зростанні амплітуди напруженості магнітного поля, називається динамічною кривою намагнічування, магнітна проникність, яка визначається за цією кривою, - динамічна крива намагнічування, магнітна проникність, яка визначається за цією кривою, - динамічною магнітною проникністю $\mu_д$.

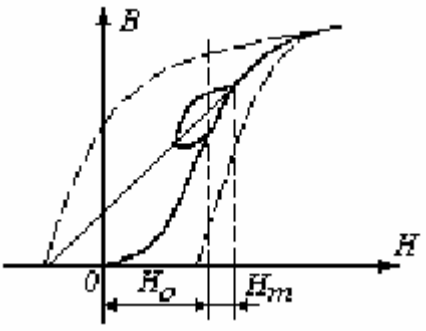


Рисунок 5.2. Приватна петля гистерезиса по індукції.

Оборотна магнітна проникність μ_{rev} (μ_r) - межа відносини зміни магнітної індукції до подвоєної амплітуди зміни напруженості магнітного

поля в даній точці початкової кривої намагнічування (петлі гистерезиса) по індукції, поділена на магнітну постійну (ГОСТ 19693 - 74). Практично визначається за нахилом приватної петлі гистерезиса (рисунок 5.2). Температурний коефіцієнт початкової магнітної проникності (ТКМП або $ТК_{\mu}$) - відношення похідної від початкової магнітної проникності по температурі до початкової магнітної проникності. Практично визначається як відносна зміна початкової магнітної проникності при зміні температури на 1°С.

Питомі магнітні втрати - потужність, що поглинається в одиниці маси магнітної речовини і розсіюється у вигляді тепла при впливі на речовину змінного магнітного поля. Питомі магнітні втрати тим більше, чим більше площа динамічної петлі гістерезису і частота перемагнічування, а також чим менше питомий електричний опір речовини. Часто характеризують втрати в магнітній речовині тангенсом кута загальних втрат tgδ. Для обмеженого діапазону частот слабких магнітних полів (напруженість поля менше 0,1 коерцитивної сили) при $tg\delta<<1$ залежність tgδ від напруженості поля і частоти має наступний вигляд:

$$tg\delta=\delta_f \cdot f+\delta_h \cdot H_m+\delta_п \qquad (5.1.)$$

де δ_f, δ_h і $\delta_п$ - коефіцієнти втрат на вихрові струми, гістерезис і післядію відповідно. При підвищенні частоти f і напруженості магнітного поля H_m починаючи з деяких значень коефіцієнти втрат зростають. Тому вводиться поняття критичної частоти $f_{кр}$, при якій різко збільшується tgδ. Зазвичай користуються поняттями $f_{кр}^{/}$ при $tg\delta = 0,1$ і $f_{кр}^{//}$ при $tg\delta = 0,02$. Чим вище початкова магнітна проникність речовини, тим менше гранична частота. Магнітотверді матеріали характеризуються високою коерцитивної силою (більше 4 кА/м) і застосовуються для виготовлення постійних магнітів. До магнітотвердих матеріалів відносяться деякі вуглецеві стали, вольфрамова, хромиста і кобальтова стали, сплави альні, альнісі, альнико і магнико, а також ферити кобальту і барію.

Магнитом’які матеріали характеризуються високою магнітною проникністю, невеликою коерцитивної силою (менше 4 кА/м) і малими втратами на гістерезис. Їх можна розділити на три групи.

1. Металеві магнітні матеріали (залізо і його сплави) застосовуються в основному в діапазоні звукових частот. Найбільш високочастотний металевий магнітний матеріал - пермаллой виготовляється у вигляді стрічок товщиною до 0,01 мм. Перевага кращих металевих магнітних матеріалів - висока магнітна проникність (до 100000) на низьких частотах.

Сталь електротехнічна є сплави заліза і кремнію (до 4,8%) і виготовляється у вигляді листів і стрічок товщиною від 0,05 до1 мм. Цифри марок сталі позначають: перша - клас по структурному станові й існувати виду прокатки (1 - гарячекатана, 2 - холоднокатана ізотропна, 3 - холоднокатана анізотропна); друга - масова частка кремнію (0 - не більше 0,4%, нелегована, 1 - 0,4 ... 0,8%, 3 - 1,8 ... 2,8%, 4 - 2,8 ... 3,8%, 5 - 3,8 ... 4,8%); третя - групу з основною нормованою характеристикою (0 - питомі втрати при B = 1,7 Тл і частоті 50 Гц; 1 - питомі втрати при B = 1,5 Тл і частоті 50 Гц; 2 - питомі втрати при B = 1 Тл і частоті 400 Гц для гарячекатаної і при в = 1,5 Тл і частоті 400 Гц для холоднокатаної анізотропної; 6 - магнітна індукція в середніх магнітних полях при H = 0,4 А/м; 7 - магнітна індукція в середніх магнітних полях при H = 10 А/м); четверта - порядковий номер сталі (ГОСТ 21427.0 - 75).

Основні параметри електротехнічних сталей деяких марок наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Основні параметри електротехнічних сталей

марка		Магнітна проникність		Коерцитивна сила, А/см	Магнітна індукція при Н=20А/см, Тл	Питомий електричний опір, Ом·мм^2/м
Нове позна-чення	Старе позна-чення	Поч.	Макс.			
1411	Э31	250	5500	0,44	1,52	0,52
1511	Э41	300	6000	0,36	1,49	0,6
1512	Э42	400	7000	0,32	1,49	0,6
1561	Э45	600	10000	0,2	7,7	0,55
1562	Э46	600	7000	–	$8{,}8\cdot10^{-4*}$	0,55
1572	Э48	600	7000	–	$1{,}3\cdot10^{-4*}$	0,55
3411	Э310	500	16000	0,2	1,81*2	0,5
3412	Э320	800 –	33000	0,12	1,73	–

* При Н=8 мА/см і товщині листа 0,35 мм.

*2 При Н=10 А/м

Стали марок 1411, 1511, 1 512 широко застосовуються для виготовлення магнітопроводів дроселів і трансформаторів, що працюють в діапазоні звукових частот. На більш високих частотах застосовують сталь 1521, виготовлену у вигляді листів товщиною 0,1 ... 0,35 мм і яка відрізняється меншими питомими втратами. Найбільш високими магнітними властивостями володіють холоднокатані сталі марок 3411, 3412, 3413, які, крім того, характеризуються поліпшеними магнітними властивостями уздовж прокату. Ці сталі випускаються у вигляді листів і стрічок. Електротехнічні сталі дуже чутливі до механічних впливів. Тому після механічної обробки (різання, штампування і тому подібне) їх піддають відпалу.

Пермалой – магнитом’який сплав на основі нікелю і заліза з високою магнітною проникністю в слабких магнітних полях (при напруженості поля менше 0,1 коерцитивної сили) на низьких частотах. Зі збільшенням вмісту нікелю магнітна проникність пермаллоя підвищується, проте зростають питомі втрати і зменшується індукція насичення. При підвищенні частоти, а також напруженості подмагничивающего (постійного) поля магнітна проникність пермаллоев різко зменшується. Пермаллої дуже чутливі до

механічних впливів. При виготовленні деталей з пермаллоя слід уникати ударів, рихтування і тому подібне. Щоб уникнути деформацій, які призводять до погіршення магнітних властивостей магнітопроводу з пермаллоя, його пластини повинні бути стиснуті слабо, а обмотка не повинна здавлювати магнітопровід. Пермаллои випускаються у вигляді холоднокатаних стрічок товщиною 0,02 ... 2,5 мм, гарячекатаних листів товщиною 3 ... 22 мм і гарячекатаних прутків діаметром 8 ... 100 мм і поставляються в термічно не обробленому стані. Після виготовлення деталей їх термічно обробляють для поліпшення магнітних властивостей Основні параметри пермаллоев наведені в таблиці 5.2.

Пермаллои з малим вмістом нікелю марок 45Н і 50Н застосовуються для виготовлення магнітопроводів малогабаритних трансформаторів, дроселів та інших намотувальних вузлів, що працюють в слабких постійних магнітних полях. Леговані пермаллои марок 38НС, 42НС 50НХС відрізняються підвищеним питомим електричним опором і тому застосовуються для виготовлення магнітопроводів трансформаторів, котушок індуктивності та інших намотувальних вузлів, що працюють при підвищених і високих частотах. Пермаллои з високим вмістом нікелю мають порівняно малий питомий електричний опір і тому використовуються тільки для виготовлення магнітних екранів і магнітопроводів, що працюють в постійних магнітних полях.

Леговані високонікелеві пермаллои також мають підвищений питомий електричний опір. При підвищених вимогах до температурної стабільності застосовують пермаллой марки 76НХД, а при високих температурах - пермаллой марки 77НМД. Випускаються також пермаллои з прямокутною петлею гістерезису, які використовуються в імпульсних і обчислювальних пристроях. В кінці позначення цих пермаллоев стоїть буква П.

Таблиця 5.2.

Основні параметри пермаллоев

Марка	Магнітна проникність		Коерцитивна сила, А/см	Індукція насичення, Тл	Питомий електричний опір, Ом·мм^2/м
	Початкова	Максимальна			
45Н	1700…2800	(16…25)10^3	16…32	1,5	0,45
50Н	1800…3000	(20…35)10^3	10…24	1,5	0,45
50Н-У	3000…4000	(30…40)10^3	10…14	1,5	0,45
38НС	2500…3000	(20…25)10^3	12	0,95	0,9
42НС	2500…3000	(20…25)10^3	8	1,0	0,85
50НХС	1500…3000	(15…20)10^3	10…24	1,0	0,9
76НХД	(10…18)10^3	(5…15)10^4	1,6…5,6	0,75	0,57
77НМД	(40…90)10^3	(15…25)10^4	0,64…1		
78НХ	(10…12)10^3	(30…35)10^3	2	1,07	0,16
79НМ	(20…22)10^3	(7…15)10^4	1,2…2,4	0,75	0,55
79НМА	(18…50)10^3	(8…30)10^4	0,8…4,8	0,75	0,56
70НМ-	(20…30)10^3	(10…22)10^4	1,2…2,4	0,73	0,55
У	(10…12)10^4	(3…4,5)10^5	0,48…0,72		
80НМ	(18…35)10^4	(7…17)10^4	1,2…4,0	0,65	0,63
80НХС	(50…70)10^3		0,4…0,8	0,5	0,8
81НМА					

* Цифри і букви марок пермаллоя позначають: цифри і буква Н на початку - процентний вміст нікелю, У в кінці - поліпшені властивості, інші літери - основні легуючі матеріали (Д - мідь, М - молібден або марганець, С - кремній, Х - хром).

2. Магнітодіелектрикі - це пластичні маси, в яких єднальним є діелектричний матеріал, а наповнювачем - порошок з магнітомягкого матеріалу. Переваги магнітодіелектриків - малі питомі втрати енергії, порівняно слабка залежність параметрів від температури, часу і напруженості магнітного поля, сталість магнітної проникності в широкому діапазоні частот,

а недолік - порівняно мала початкова магнітна проникність, що обмежує можливості підвищення добротності котушок індуктивності.

Електромагнітні параметри магнітодіелектриків визначають на зразках кільцевої форми. За цими параметрами оцінюється якість матеріалів і кільцевих сердечників.

Магнітодіелектрики на основі карбонільного заліза виготовляються пресуванням порошку карбонільного заліза з бакелітом, амінопластом або іншими сполучними. Карбонильне залізо - це тонкодисперсний порошок, що складається з частинок сферичної форми Ø 1-8 мкм. Карбонильное залізо отримують термічним розкладанням пентакарбонила заліза $Fe(CO)_5$ - з'єднання оксиду вуглецю з залізом. При термічному розкладанні парів пентакарбонила заліза виділяються частки чистого заліза. В результаті забруднення частинок карбонільного заліза оксидом вуглецю отриманий порошок піддають термічній обробці в середовищі водню. Карбонильне залізо в такому вигляді має високі магнітні характеристики: $\mu_н$ = 2500 - 3000; $\mu_м$ = 20000 - 21 000; H_c = 4,5 - 6,2 А/м. Промисловістю випускається два класи карбонільного заліза: Р (марки Р-10, Р-20, Р-100 і Р-100Ф) - для радіоапаратури і $П_с$ - для дротового зв'язку. Крім того, з карбонільного заліза класу Р відпалом в водні отримують відновлене карбонильне залізо (ВКЗ), яке відрізняється підвищеною магнітною проникністю і підвищеними втратами. Деталі з ВКЗ мають характерний металевий блиск. Основні параметри карбонільного заліза наведені в таблиці 5.3. Діапазон робочих температур карбонільного заліза - від -60 до + 100°С; тангенс кута втрат змінюється лінійно до частоти 100 МГц (для класу Р) і до частоти 50 МГц (для класу $П_с$), а також при зміні напруженості магнітного поля до 2400 А/м.

Таблиця 5.3.

Електромагнітні параметри магнітодіелектриків на основі карбонільного заліза (ГОСТ 13610 - 79)

марка	Початкова Магнітна проник-ність	Коефіцієнт втрат			ТКМП в діапазоні температур от -60 до +100°С, %/°С	Макси-мальна робоча частота, МГц
		$\delta_h \cdot 10^6$, м/А	$\delta_f \cdot 10^9$, 1/Гц	$\delta_П \cdot 10^4$		
Р-10	12…15	3…5	2…3,5	1,5…2,5	0,0025…0,018	10
Р-20	12…15	1,5…2,5	2…3	0,5…1	0,002…0,015	20
Р-100	10…12	1,2…1,9	0,5…1,2	0,5…1	0,005…0,01	100
Р-100Ф	10…12	1…2	1…2,8	0,5…1,5	0,003…0,015	100
Пс	11…13	≤1,5	≤3,5	≤0,2	0,0025…0,011	20
ВКЖ	25				0,025…0,035	0,2

* Кольори маркування: для Р-10 - білий, для Р-20 - червоний, для Р-100 - синій, для Р-100Ф - зелений, для Пв -жовтий.

Альсифера отримують пресуванням порошку зі сплаву альсифера (алюміній - кремній - залізо) з бакелітом або амінопластів. Він відрізняється хорошими електромагнітними властивостями і невисокою вартістю. Важливою особливістю альсифера є те, що його температурний коефіцієнт магнітної проникності в залежності від вмісту кремнію і алюмінію може бути менше, більше нуля або дорівнювати йому. Більшість альсифера має негативний температурний коефіцієнт магнітної проникності, що дозволяє використовувати їх для температурної компенсації параметрів котушок індуктивності. Найменшими значеннями ТКМП характеризується компенсований альсифера, в позначенні марок якого міститься буква К. Альсифера є нековким тендітним сплавом, що складається з 5,5-13% алюмінію, 9-10% кремнію, інше - залізо. Промислові сорти альсифера мають наступні характеристики: $\mu_н$ = 6000-7000; $\mu_м$ = 30000 = 35 000; H_c = 2,2 А / м; ρ = 0,8 мкОм·м.

Таблиця 5.4.

Електромагнітні параметри магнітодіелектриків на основі альсифера

марка	Початкова Магнітна проникність	Коефіцієнт втрат			ТКМП в діапазоні температур от 20 до +70°С, %/°С	tgδ на частоті 100 кГц при H_m=8А/м	крітична частота, H_m=8 А/м, кГц
		$\delta_h \cdot 10^6$, м/А	$\delta_r \cdot 10^9$, 1/Гц	$\delta_П \cdot 10^4$			
ТЧ-90	79…91	1,1		3	≤ -|0,06|	0,0849	20
ТЧ-60	53…63	0,81		2	≤ -|0,04|	0,0277	70
ТЧК-55	48…58	0,81		2	-0,015…0,005	0,01	70
ВЧ-32	28…33	0,38		1,2	≤ -|0,025|	0,01	200
ВЧ-22	19…24	0,25	25	2	≤ -|0,02|	0,0047	700
ВЧК-22	19…24	0,25	25	2	-0,005…0,005	0,0047	700

* Кольори маркування: для ТЧ-90 - синій, для ТЧ-60 - чорний, для ТЧК-55 - червоний, для ВЧ-32 - білий, для ВЧ-22 - зелений, для ВЧК-22 - жовтий.

* 2Прі tgδ = 0,02.

Основні параметри альсифера наведені в таблиці 5.4. Діапазон робочих температур магнітодіелектриків на основі альсифера - від -60 до + 120°С, межі лінійності tgδ: по частоті - 0,5 МГц для марки ТЧ-90, 1МГц для ТЧ-60, 2МГц для ВЧ-32 і 20МГц для ВЧ 22; по напруженості поля - 240 А/м для марки ТЧ-90, 400 А/м для ТЧ-60, 800 А/м для ВЧ-32 і 1200 А/м для ВЧ-22.

3. Ферити представляють собою спечену суміш оксиду заліза Fe_2O_3 з оксидами одного або декількох двовалентних металів ZnO; NiO. Назва ферит визначається назвою двовалентного або (рідше) одновалентного металу, оксид якого входить до складу фериту. Так, якщо до складу фериту входить оксид цинку ZnO, то ферит називається феритом цинку, якщо оксид нікелю NiO - феритом нікелю і так далі. Ферити, до складу яких крім оксиду заліза Fe_2O_3 входить тільки один оксид іншого металу, називаються простими. Хімічна формула простого фериту в загальному вигляді записується так:

MeO x Fe_2O_3 або $MeFe_2O_4$, де Me - позначення металу, оксид якого входить до складу фериту.

Хімічні формули феритів цинку і нікелю записуються так: $ZnFe_2O_4$ або $NiFe_2O_4$ Не всі прості ферити намагнічені. Так, ферити цинку і кадмію $CdFe_2O_4$ є немагнітними речовинами. Наявність або відсутність магнітних властивостей у простих феритів визначається їх складом і розподілом іонів в кристалічній решітці. Перераховані вище прості ферити мають кубічну решітку типу шпінелі. Така решітка має щільну упаковку двовалентних негативно заряджених іонів кисню, між якими розподілені позитивно заряджені іони металів, оточені чотирма або шістьма іонами кисню. Іони металів в кубічної решітці шпінелі можуть розподілятися, утворюючи нормальну або звернену шпинель. Ферити цинку і кадмію, що кристалізуються в нормальну шпинель, не володіють магнітними властивостями, а ферити, що кристалізуються в звернену шпинель, намагнічені.

Найкращі магнітні характеристики мають складні або змішані ферити, що представляють собою тверді розчини одного простого фериту в іншому. В цьому випадку можуть бути використані і немагнітні ферити в поєднанні з магнітними простими феритами. Наприклад, твердий розчин двох простих феритів цинку і нікелю утворює змішаний нікель-цинковий ферит, хімічну формулу якого записують так:

$Ni_xZn_{(1-x)} \cdot Fe_2O_3$

У наведеній формулі x позначає молярну частку оксиду нікелю в матеріалі, а (1-x) - молярна частку оксиду цинку, причому сума цих часток дорівнює одиниці.

Ферити тверді, крихкі і за механічними властивостями подібні кераміці. Порошкоподібні оксиди металів, взяті в певному співвідношенні, подрібнюють в млинах. З цієї суміші тонкопомолотих порошків пресують брикети, які піддають первинному випалу в печі. Брикети, що спеклися розмелюють і в отриманий тонкодисперсний порошок вводять будь-якої

пластифікатор, наприклад розчин полівінілового спирту. З отриманої маси пресують феритові вироби (сердечники, кільця), які обпалюють при 1000-1400 °С. Отримані тверді крихкі вироби (переважно чорного кольору) можна обробляти тільки шліфуванням. Щільність феритів значно менше щільності металевих магнітних матеріалів і становить 3,7 ... 5,8 г/см^3. Ферити добре шліфуються і поліруються абразивними матеріалами. Їх можна склеювати, наприклад, клеєм БФ-4. Ферити є напівпровідниками і володіють електронною провідністю. Їх питомий електричний опір може бути дуже великим (до 10^{10} Ом·см), що обумовлює малі втрати на вихрові струми в змінних полях високої частоти. Однак зі зростанням частоти втрати збільшуються, а магнітна проникність феритів зменшується. Багато феритів мають порівняно велику коерцитивну силу і малу залишкову індукцію, тому їх не використовують у сильних магнітних полях. Властивості магнитом’яких феритів істотно залежать від частоти, напруженості магнітного поля і температури.

Найбільш широко застосовують в РЕА змішані магнітно-м'які ферити: нікель-цинкові, марганець-цинкові, літій-цинкові. Умовні позначення феритів: ПН - нікель-цинкові; НМ - марганець-цинкові; ВЧ - літій-цинкові високочастотні; СЧ - надвисокочастотні; ВТ - з прямокутною гистерезисной петлею. Цифри, що стоять попереду літерних позначень, вказують середнє значення початкової магнітної проникності. У марках надвисокочастотних феритів ці цифри позначають середню довжину хвилі (см), в марках феритів з прямокутною гистерезисной петлею - коерцитивну силу (А/м). Наприклад: 4000НМ - марганець-цинковий ферит з початковою магнітною проникністю, яка дорівнює 4000; 150ВЧ - високочастотний ферит з початковою магнітною проникністю 150.

Магнітні характеристики широко застосовуваних магнітно-м'яких феритів наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5.

Основні характеристики магнітно-м'яких феритів

Марка феррита	Початкова магнітна проникність (середнє значення)	Коерцитивна сила, А/м	Питомий електричний опір, Ом·м	Гранична частота, МГц	Температура Кюрі, °С
6000НМ	6000	12	0,1	0,01	130
4000НМ	4000	16	0,5	0,7	130
3000НМ	3000	24	0,5	0,8	140
2000НМ	2000	20	0,5	1,5	200
1000НМ	1000	80	0.5	1,6	200
1000НН	1000	32	20	0,4	110
600НН	600	56	10^2	1,2	110
400НН	400	80	10^3	2,0	120
200НН	200	160	10^3	3,0	120
150ВЧ	150	640	10^6	25	400
100ВЧ	100	720	10^4	35	400
50ВЧ2	50	800	10^6	70	450
10ВЧ1	10	560	10^8	250	500

* Граничною називають частоту, при перевищенні якої починається різке падіння магнітної проникності і збільшення втрат енергії в фериті.

Додатковими характеристиками феритів є: КТР = (5-12) $\cdot 10^{-6}$ 1/°С; пористість 1-15%.

З рисунку 5.3. випливає, що наведені тут ферити в порівнянні з металевими магнітно-м'якими матеріалами мають малу індукцією насичення, тому в сильних полях їх застосовувати не раціонально. Є ферити, наприклад НМС, які володіють великою індукцією насичення. Чим менше початкова магнітна проникність фериту, тим в більш широкому діапазоні частот він може бути використаний.

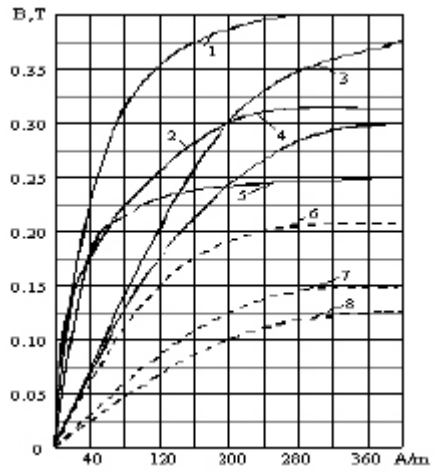


Рисунок 5.3. Криві намагнічування марганець нікель-цинкових (НН) феритів: 1 -4000 НМ, 2 - 3000 НМ, 3 - 2000 НМ, 4 - 1000 НМ, 5 - 2000 НН, 6 - 600 НН, 7 - 400 НН, 8 - 200 НН

Перевагами феритів є стабільність магнітних характеристик в широкому діапазоні частот, малі втрати на вихрові струми, малий коефіцієнт загасання електромагнітної хвилі, а також простота виготовлення феритових деталей. Як все магнітні матеріали, ферити зберігають свої магнітні властивості тільки до температури Кюрі $T_К$. У різних за складом феритів значення $T_к$ коливаються в широких межах: від 70 до 500 °С. У радіоапаратурі НВЧ металеві магнітні матеріали і низькочастотні ферити (нікель-цинковий і інші) не можуть застосовуватися через малий питомий електричний опір, який призводить до великих втрат на вихрові струми. У техніці НВЧ застосовують полікристалічні і монокристалічні ферити. До полікристалічних відносяться літієвий (10СЧ9), магнієві, нікелеві та інші ферити. Ця група феритів володіє великим питомим електричним опором (10^8 - 10^{10} Ом·м) і стабільністю магнітних характеристик в діапазоні НВЧ. Широке застосування в техніці НВЧ отримали ферити-гранати, що відрізняються підвищеним питомим електричним опором і малими діелектричними втратами. Сучасні магнітом’які ферити ділять на шість груп, що розрізняються електромагнітними параметрами і призначенням. Термостабільні високочастотні ферити (марки 150ВН, 100ВН, 50ВН, 30ВН, 20ВН) можуть використовуватися в слабких магнітних полях при частоті до

100 МГц. Вони відрізняються малими втратами і малим ТКМП в широкому діапазоні температур, тому найбільш часто застосовуються в високоякісних котушках індуктивності, а перших двох марок - також для магнітних антен. Термостабільні низькочастотні ферити (марки 2000НМ1, 1500НМ1, 2000НМ3, 1500НМ3, 1000НМ3, 700нм) характеризуються порівняно малими втратами на низьких частотах. Ферити марок 2000НН, 1000НН, 600НН, 400НН, 400НН1, 100НН характеризуються низькою вартістю, тому широко використовуються при невисоких вимогах до стабільності. Ферити останніх чотирьох марок застосовуються в котушках коливальних контурів і магнітних антенах при частотах до декількох мегагерц. Ферити марок 2000НМ і 1000Нм перевершують никелево-цинкові з такими ж значеннями магнітної проникності, проте дорожчі. Марганцево-цинкові ферити з великими значеннями магнітної проникності (3000 і більше) рекомендується застосовувати в магнітопроводах замість тонколистового пермаллоя (товщиною 0,1 ... 0,02 мм і менше).

Ферити з високою індукцією призначені для роботи в сильних змінних магнітних полях. Вони можуть використовуватися, зокрема, для магнітопроводів імпульсних трансформаторів джерел вторинного електроживлення.

Малими втратами в сильних полях характеризуються ферити марок 300ВПН, 200ВПН, 10ВПН і інші з цієї групи. Їх основне призначення - сердечники котушок коливальних контурів, які перебудовуються підмагнічуванням сердечника, і котушок магнітних модуляторів. У слабких полях tgδ і ТКМП цих феритів значно більше, ніж феритів групи ВПС, які доцільно використовувати для сердечників високочастотних широкосмугових трансформаторів.

Для виготовлення постійних магнітів використовують магнітно-тверді ферити, найбільше застосування з яких отримали ферити барію $BaO{\cdot}6Fe_2O_3$. На відміну від магнітно-м'яких барієві ферити мають не кубічну, а гексагональну кристалічну структуру, що володіє магнітною анізотропією,

яка збільшує коерцитивної силу цих феритів. За своєю структурою ферити барію є полікристалічні матеріали, що складаються з безлічі кристалічних частинок, орієнтованих довільно, що визначає однорідність властивостей фериту в усіх напрямках. Ці ферити є ізотропним (марка БІ).

Якщо ж в процесі пресування магнітів порошкоподібну масу піддати впливу зовнішнього магнітного поля великої напруги (Н≈800 кА/м), кристалічні частинки будуть орієнтовані в одному напрямку. Виготовлені таким чином барієві магніти є анізотропними (марка БА), які після видпалу в печах і намагнічування володіють більш високими магнітними характеристиками в порівнянні з ізотропним. Магніти, виготовлені з барієвих феритів, володіють великим питомим електричним опором (10^3-10^6Ом·м). Для кращого використання барієвим магнітам надають форму, при якій їх довжина мала в порівнянні з перерізом.

Барієві ферити відрізняються гарною стабільністю своїх характеристик, але чутливі до різкої зміни температури. Їх виготовляють з недефіцитних порошкоподібних матеріалів - оксидів заліза Fe_2O_3 і вуглекислого барію $BaCO_3$ методами керамічної технології. Магніти з барієвих феритів значно дешевше магнітів з залізо-нікельалюмінієвих сплавів і інших металевих матеріалів. Недоліками всіх феритів є крихкість, а також різко виражена залежність магнітних властивостей від температури і механічних впливів. Ферити є магнітними напівпровідниками, і, отже, з ростом температури їх питомий опір зменшується, що викликає збільшення втрат на вихрові струми. Широко застосовуються барієві ферити наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6.

Основні характеристики магнітно-твердих барієвих феритів

Марка ферита	Залиш-кова магнітна індукція, Тл	Коерцитивна сила, А/м	Максимальна магнітна енергія, кДж/м	Питомий електрик-тричний опір, Ом·м	Температура Кюрі, °С
6БИ240	0.19	240	6	10^3 - 10^6	450
7БИЗОО	0,20	300	7	10^3 - 10^6	450
16БА190	0.30	190	16	10^3 - 10^6	450
15БАЗОО	0,30	300	15	10^3 - 10^6	450
18БА220	0,33	220	18	10^3 - 10^6	450
22БА220	0,36	220	22	10^3 - 10^6	450
24БА210	0,37	210	24	10^3 - 10^6	450
25БА150	0,38	150	25	10^3 - 10^6	450
28БА170	- 0,38	170	25	10^3 - 10^6	450
28БА190	0,39	190	28	10^3 - 10^6	450

6. ДІЕЛЕКТРИКИ

6.1. Характеристики діелектриків в постійних електричних полях

Діелектрична проникність і поляризованність, температурний коефіцієнт діелектричної проникності. Обмежене зміщення зв'язаних зарядів діелектриків або орієнтація їх дипольних молекул під дією електричного поля називається поляризацією.

Якщо обкладки конденсатора, що проводять, помістити в вакуум і прикласти до них постійну напругу, на обкладинках з'явиться заряд Q_0 (рисунок 6.1.1 а). Тепер якщо між тими ж обкладками розмістити діелектрик, то під дією електричного поля відбудеться зміщення зарядів у напрямку до обкладкам (рисунок 6.1.1 б)

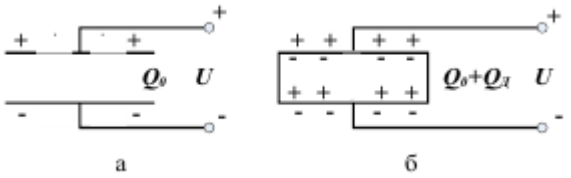


Рисунок 6.1.1. Конденсатор з обкладками

Необхідність нейтралізувати дію зарядів діелектрика викликає потік додаткових зарядів на обкладки конденсатора. Там з'являється заряд $Q_0 + Q_Д$. Ємність конденсатора С, що визначається як відношення заряду Q до прикладеній напрузі U, зростає.

Здатність діелектрика поляризуватися в електричному полі характеризується відносною статичної діелектричної проникністю ε, причому

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0+Q_д}{Q_0} = 1 + \frac{Q_д}{Q_0} \qquad (6.1.1.)$$

де: $Q_Д$ - заряд, обумовлений поляризацією діелектрика; Q_0 - заряд на обкладках вакуумованого конденсатора.

Відносна діелектрична проникність показує, у скільки разів зростає ємність плоского конденсатора, якщо між його обкладками помістити діелектрик.

Видно, що ε> 1, причому для газів ε ≈ 1, для рідини ε = 2 - 100, для твердих діелектриків ε = 2 - десятки тисяч.

Абсолютна діелектрична проникність

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \qquad (6.1.2.)$$

де: ε_0 - діелектрична проникність вакууму,

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

Діелектрики поділяються на лінійні і нелінійні. У лінійних діелектриків ε не залежить від напруженості поля Е і зв'язок електричної індукції D з напруженістю поля Е має вигляд:

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E \qquad (6.1.3.)$$

У нелінійних діелектриків ε залежить від напруженості поля Е. Електричну індукцію в однорідному лінійному діелектрику можна представити у вигляді:

$$D=D_0+P \qquad (6.1.4.)$$

де: D_0 - індукція у вакуумі; Р - поляризованность діелектрика.

Поляризованість Р з кількісної сторони характеризує процес поляризації діелектрика в електричному полі і дорівнює сумарному електричному моменту, віднесеному до одиниці об'єму, тобто

$$P = \frac{\sum m}{V} = \frac{\sum qd}{Sd} = \frac{Q}{S} = \sigma \qquad (6.1.5.)$$

де: d - товщина діелектрика; q - одиничний заряд; S - площа обкладок конденсатора; Q - загальний заряд; σ - поверхнева щільність зарядів.

Слід пам'ятати, що Е, D, Р - векторні величини. В ізотропному (однородному) діелектрику вектори D, D_0, і Р збігаються за напрямком. В лінійному діелектрику поляризованість зростає пропорційно напруженості поля, тобто

$$P=\chi E \qquad (6.1.6.)$$

де: χ - діелектрична сприйнятливість.

З урахуванням вищевикладеного отримаємо

$$\varepsilon\varepsilon_0=D_0+\chi E \qquad (6.1.7.)$$

або

$$\varepsilon\varepsilon_0=\varepsilon_0+\chi \qquad (6.1.8.)$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{\chi}{\varepsilon_0} \qquad (6.1.9.)$$

Для нелінійних діелектриків поляризованість $P_н$ нелінійно залежить від Е, тобто

$$P_н=\chi(E)\cdot E \qquad (6.1.10.)$$

Фізично це обумовлено тим, що поляризованість діелектриків складається з двох складових: індукованої поляризованісті $P_{инд}$, пропорційної напруженості поля; спонтанної поляризованности $P_{СП}$, яка залежить від E не за лінійним законом. Тоді

$$P_н=P_{инд}+P_{сп}=\chi_{инд}E+\chi_{сп}(E)E \qquad (6.1.11.)$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{\chi_{инд}}{\varepsilon_0} + \frac{\chi_{сп}}{\varepsilon_0} \qquad (6.1.12.)$$

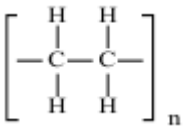
У лінійних діелектриків $\chi_{инд}$ така, що ε становить одиниці-десятки, а у нелінійних діелектриків за рахунок $\chi_{СП}$ (E) ε досягає десятків тисяч. Для оцінки температурних властивостей діелектриків введено поняття температурного коефіцієнта діелектричної проникності

$$TK\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon\Delta l}\left(\frac{1}{K}\right) \qquad (6.1.13.)$$

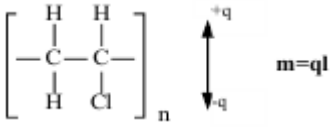
ТКε може бути як позитивним так і негативним і визначається за графіками залежності ε від температури t методом графічного диференціювання.

6.2. Рівняння Клаузіуса-Моссоті

Залежно від будови все діелектрики діляться на нейтральні і полярні. Діелектрики, в молекулах яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, називаються нейтральними, якщо вони не збігаються - полярними. Наприклад, у поліетилену структурна формула має вигляд



Тут n - індекс полімеризації, що показує скільки молекул мономера входить в молекулу полімеру. Формула симетрична, тому електричний момент m = 0. У поліхлорвінілу структурна формула має вигляд:



Тут електричний момент m ≠ 0. Між діелектричною проникністю і поляризуємостью елементарних частинок речовини існує певне співвідношення, зване рівнянням Клазіуса-Моссоті.

Для неполярних газів і рідин

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}=\frac{n\alpha_e}{3\varepsilon_0} \qquad (6.2.1.)$$

де n - число молекул в одиниці об'єму; α_e - електрична поляризованість однієї молекули.

Для полярних газів і з певним наближенням для полярних рідин

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}=\frac{n(\alpha_e+\alpha_д)}{3\varepsilon_0} \qquad (6.2.2.)$$

де $\alpha_Д$ - дипольная поляризованість однієї молекули.

Рівняння Клазіуса-Моссоті використовується для аналітичного визначення залежності ε до температури. Для твердих діелектриків через близьке розташування молекул рівняння Клазіуса-Моссоті не справедливо.

6.3. Діелектрична проникність складних діелектриків

Діелектрична проникність шаруватого діелектрика або суміші різних діелектриків визначається за формулою Ліхтенекера

$$\varepsilon^x = Q_1 t_1^x + Q_2 t_2^x \qquad (6.3.1.)$$

де ε, ε_1 і ε_2 - загальна діелектрична проникність і проникність компонентів, Q_1 і Q_2 - об'ємні концентрації компонентів ($Q_1 + Q_2 = 1$); X - константа, що характеризує розподіл компонентів в просторі, X = -1 ÷ +1

При паралельному включенні компонентів (рисунок 6.3.1.а) X = 1 і

$$\varepsilon = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 \qquad (6.3.2.)$$

При послідовному включенні компонент (рисунок 6.3.1.б) X = -1 і

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{Q_1 \varepsilon_1 + Q_2 \varepsilon_2} \qquad (6.3.3.)$$

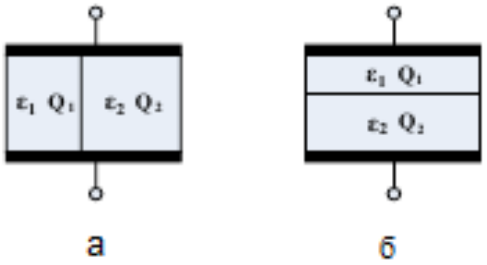


Рисунок 6.3.1. Паралельне (а) та послідовне (б) включення компонент конденсатора.

Коли компоненти розподілені хаотично,

$$\varepsilon = \varepsilon_1^{Q_1} + \varepsilon_2^{Q_2} \qquad (6.3.4.)$$

Формула Ліхтенекера справедлива, коли ε_1 і ε_2 не сильно розрізняються. При великому розходженні ε_1 і ε_2 використовуються інші формули.

6.4. Деполяризуючий фактор

При розміщенні діелектрика в електричному полі з електричною індукцією D він поляризується. При цьому заряди елементарних диполів у внутрішніх шарах діелектрика взаємно компенсують один одного, а заряди на

зовнішніх поверхнях не компенсовані. Вони створюють електричну індукцію полюсів D_d (поле, що деполярізується), тоді індукція всередині діелектрика

$$D_{вн}=D-D_d \qquad (6.4.1.)$$

Напрямок D_d протилежне напрямку D. Величина індукції поверхневих зарядів D_d залежить від форми зразка і від зовнішнього поля D. Вплив форми і напрямки зовнішнього поля на внутрішнє поле в діелектрику оцінюється за допомогою фактора, що деполяризує

$$\gamma=\gamma_x i+\gamma_y j+\gamma_z k \qquad (6.4.2.)$$

поле, що деполяризує

$$D_d=-\gamma P \qquad (6.4.3.)$$

Знак "-" пов'язаний з тим, що заряди на поверхні діелектрика викликають приплив на обкладки зарядів протилежного знака. Якщо поле перпендикулярно поверхні плоского конденсатора,

$$\gamma_x=\gamma_y=0,\ \gamma_z=1 \qquad (6.4.4.)$$

Тоді $D_{ВН} = D + P$ і, як показано раніше,

$$\varepsilon = 1 + \frac{\chi}{\varepsilon_0} \qquad (6.4.5.)$$

При напівкулястої формі електродів конденсатора

$$\varepsilon = 1 + \gamma_{z\text{ш}} \frac{\chi}{\varepsilon_0} \qquad (6.4.6.)$$

а при полуциліндрічеcкой формі електродів

$$\varepsilon = 1 + \gamma_{z\text{ц}} \frac{\chi}{\varepsilon_0} \qquad (6.4.7.)$$

$$\gamma_{zш} = 1/3,\ \gamma_{zц} = 1/2 \qquad (6.4.8.)$$

Таким чином, тільки у плоского конденсатора ємність за рахунок діелектрика змінилася в ε раз. При інших формах обкладок ємність збільшується в меншу кількість разів.

6.5. Токи абсорбції

Процес поляризації діелектриків проходить протягом деякого часу. Розрізняють миттєві і уповільнені види поляризації. До миттєвих видів поляризації відносять ті, час встановлення яких менше 10-12 с. Час встановлення уповільнених видів поляризації може досягати декількох хвилин. За час встановлення даного виду поляризації приймають час, протягом якого струм, пов'язані з цим видом поляризації, зменшується в е раз.

Токи в діелектрику, пов'язані з його поляризацією, називаються струмами зміщення $I_{зм}$. Токи в діелектрику, пов'язані з наявністю в ньому невеликого числа вільних носіїв зарядів, називаються струмами наскрізної провідності $I_{СНП}$. Повний струм через діелектрик

$$I = I_{СНП} + I_{зм} \qquad (6.5.1.)$$

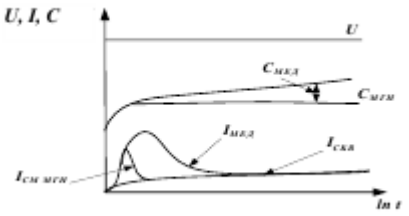


Рисунок 6.5.1. Заряд конденсатора від джерела постійної напруги U

При заряді конденсатора від джерела постійної напруги U (рисунок 6.5.1.) за час менше 10-12с відбудеться миттєва поляризація діелектрика, потече струм $I_{зм\ мит}$, ємність встановиться $C_{мит}$. Уповільнені види поляризації приведуть до повільного збільшення ємності, тече струм

уповільнених видів поляризації $I_{пов}$. Повільна зміна ємності і заряду конденсатора називається явищем абсорбції. Струм $I_{пов}$ називають струмом абсорбції. У деяких діелектриків $I_{абс}$ спадає до нуля за 30-60 хвилин. Токи абсорбції великі у діелектриків складної структури, полярних (папір, діелектрики електролітичних конденсаторів).

Облік явища абсорбції важливий при вимірюванні опору ізоляції діелектриків $R_{із}$. Відлік $R_{із}$ слід проводити через певний час, коли $I_{пов} = 0$.

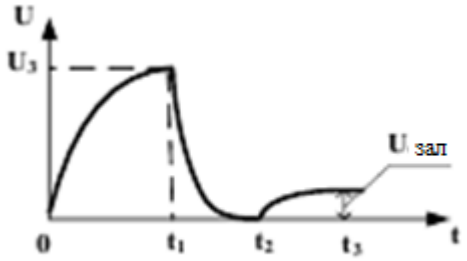


Рисунок 6.5.2. Зарядка конденсатора

Якщо конденсатор зарядити до напруги U_3 (рисунок 6.5.2) за час t_1, потім замкнути його з'єднав безпосередньо на час t_2-t_1, потім залишити на деякий час t_3-t_2 розімкненим, то при наявності в діелектрику явища абсорбції на обкладинках з'явиться напруга $U_{зал}$ (залишкове) . Коефіцієнтом абсорбції називається відношення $U_{зал}$ до U_3, тобто

$$К_{абс} = \frac{U_{зал}}{U_з} \qquad (6.5.2.)$$

Величина коефіцієнта абсорбції може досягати 10% (у електролітичних конденсаторів).

7. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

7.1. Види електропровідності діелектриків

Залежно від природи носіїв заряду розрізняють такі види електропровідності:

- електронна, провідність не залежить від часу;

- іонна, проходження струму через речовину супроводжується електролізом, провідність зменшується з часом;

- моліонная, носіями зарядів є заряджені групи молекул, проходження струму через речовину супроводжується явищем електрофорезу, провідність зменшується з часом;

- змішана електропровідність, коли носіями заряду є електрони і іони одночасно або інші носії.

Виділимо в однорідному діелектрику з носіями заряду одного знака куб (рисунок 7.1.1).

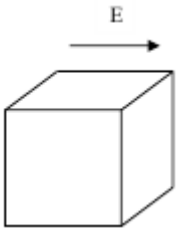


Рисунок 7.1.1. Куб в однорідному діелектрику з носіями заряду одного знака

Заряд куба дорівнює

$$Q=nq \qquad (7.1.1.)$$

де: n - число носіїв заряду в одиниці об'єму; q - заряд носія.

При наявності електричного поля щільність струму дорівнює кількості електрики, що протікає в одиницю часу через поперечний переріз куба, тобто

$$j=qnV_{ср} \quad (7.1.2.)$$

де: $V_{ср}$ - середня швидкість руху носіїв. С іншого боку закон Ома в диференціальній формі має вигляд

$$j=\gamma E \quad (7.1.3)$$

де: γ - об'ємна провідність речовини.

тоді

$$\gamma E =qnV_{ср} \quad (7.1.4.)$$

$$\gamma = nq\frac{V_{ср}}{E} = nq\mu \quad (7.1.5.)$$

Тут μ- рухливість носіїв, тобто середня швидкість руху носіїв на одиницю напруженості електричного поля. Якщо у створенні струму беруть участь носії заряду різних типів,

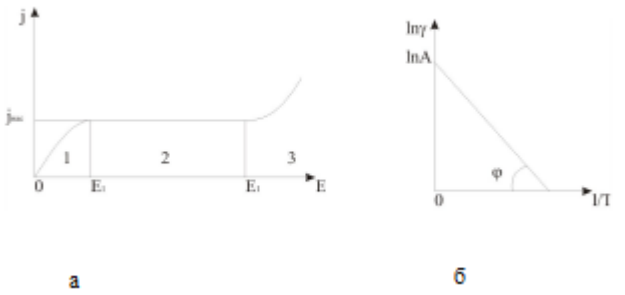
$$\gamma = \sum_{i=1}^{p} n_i q_i \mu_i \quad (7.1.6.)$$

Характер електропровідності і величина питомої провідності залежать від хімічного складу речовини, його будови, агрегатного стану, температури, матеріалу електродів, напруженості поля.

7.2. Електропровідність газів

Іонізація нейтральних молекул газу відбувається або під впливом зовнішніх факторів (рентгенівські, ультрафіолетові, космічні промені і т.д.), або внаслідок зіткнення заряджених частинок з молекулами. Електропровідність газів, обумовлена дією зовнішніх факторів, називається несамостійною.

Графік залежності щільності струму j, що протікає через газ, від напруженості поля E показаний на рисунку 7.2.1.



а б

Рисунок 7.2.1. Графік залежності щільності струму j, що протікає через газ, від напруженості поля E

Тут ділянка 1 - несамостійна провідність, закон Ома виконується, концентрація носіїв заряду постійна. Для повітря E_1 = 0,006 В/см. Ділянка 2 - несамостійна провідність, закон Ома не виконується, всі іони йдуть на електроди, не встигаючи рекомбінувати. Ділянка 3 - самостійна провідність, обумовлена дією ударної іонізації. Для повітря $E_2 \approx 10^4$ В/см. При несамостійної провідності повітря є хорошим діелектриком, $j_{нас} \approx 10^{-19}$ А/см^2. Провідність газів залежить від температури. Типовий графік цієї залежності представлений на рисунку 7.2.1. Цей графік апроксимують формулою

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{kT}}, \qquad (7.2.1.)$$

де: Δ E - енергія іонізації молекул газу; k - постійна Больцмана: k = 8,6·10^{-5} еВ/град; T - абсолютна температура.

Як видно, з ростом температури провідність зростає (внаслідок збільшення концентрації носіїв заряду).

Так як

$$ln\gamma = lnA - \frac{\Delta E}{kT}, \qquad (7.2.2.)$$

То при T→∞ lnγ=lnA

Це рівняння є рівнянням прямої в відрізках координат типу y=ax+b. Тут b=lnγ, $x = \frac{1}{T}$, $a = -\frac{\Delta E}{k} = tg\varphi$. Звідси енергія іонізації молекул газу ΔE=k·tgφ. Знак "-" говорить про те, що кут φ знаходиться в другій чверті, де tgφ негативний.

7.3. Електропровідність рідин

Електропровідність рідин залежить від будови молекул, наявності домішок, їх типу. Електропровідність нейтральних рідин-діелектриків визначається дисоціацією домішок, полярних - крім дисоціації домішок дисоціацією молекул самої рідини. Струм в рідині обумовлений як пересуванням іонів, так і пересуванням великих заряджених колоїдних частинок.

Полярні рідини мають більшу провідність, ніж нейтральні. Графік залежності щільності струму від напруженості поля наведено на рисунку 7.3.1.

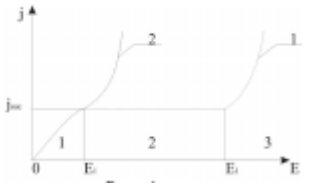


Рисунок 7.3.1. Графік залежності щільності струму від напруженості поля

Крива 1 відповідає чистій рідині, а крива 2 - рідини з домішками. На ділянці 2 кривої 2 провідність обумовлена збільшенням рухливості іонів, ступенем дисоціації, ударної іонізацією, холодної емісією електронів з катода (ефект Шотткі).

Зі збільшенням температури зростає рухливість іонів, ступінь дисоціації, тому провідність зростає і може бути апроксимована формулою

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{kT}} \qquad (7.3.1.)$$

Для нейтральних рідин $\gamma=10^{-13} – 10^{-15}$ 1/(Ом·см) слабополярная $\gamma=10^{-12} – 10^{-7}$ 1/(Ом·см)полярних $\gamma=10^{-7} – 10^{-5}$ 1/(Ом·см)

7.4. Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих діелектриків обумовлена пересуванням іонів самого діелектрика, іонів домішок і електронів. Залежність провідності твердого діелектрика від температури в загальному випадку підпорядковується висловом

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E_1}{kT}} + Be^{-\frac{\Delta E_2}{kT}} \qquad (7.4.1.)$$

де: A і B - провідність при $T \to \infty$; ΔE_1 і ΔE_2 - енергії, що залежать від механізму електропровідності, це можуть бути енергії, необхідні для перекладу з вузлів в міжвузля решітки позитивних або негативних іонів, енергія іонізації атомів домішок і т.д.

Як правило, одне з двох додатків переважає в низькотемпературної області, інше в високотемпературної. Графік залежності γ від 1/T показаний на рисунку 7.4.1.

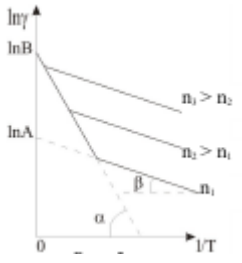


Рисунок 7.4.1. Графік залежності γ від 1/T

Тут: n_1, n_2, n_3- концентрації домішок. При низьких температурах переважає домішкова провідність, при високих - власна.

Наприклад, в іонних кристалічних діелектриках електропровідність обумовлена переміщенням власних іонів, що вириваються з решітки під впливом флуктуацій теплового руху, і іонами домішок. В цьому випадку

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E_{пп}+\frac{1}{2}\Delta E_{ип}}{kT}} + Be^{-\frac{\Delta E_{пс}}{kT}} \qquad (7.4.2.)$$

тут: $\Delta E_{пп}$ - енергія переміщення іонів домішки; $\Delta E_{ип}$ - енергія іонізації іонів домішки (1/2 пов'язана з виникненням двох зарядів); $\Delta E_{пс}$- енергія переміщення власних іонів.

З цієї формули випливає, що

$$\Delta E_{пс} = k \cdot tg\alpha \qquad (7.4.3.)$$

$$\Delta E_{пп} + 1/2\ \Delta E_{ип} = k \cdot tg\beta \qquad (7.4.4.)$$

У кристалічних діелектриках з атомною або молекулярною решіткою електропровідність пов'язана тільки з наявністю домішок.

Електропровідність аморфних діелектриків, як правило, іонна (скла, слюди, полімерів, більшості видів кераміки), вона залежить від хімічного складу речовини, хімічного складу домішок, кількості домішок, ступеня полімеризації.

З ростом температури провідність аморфних діелектриків збільшується по показовому закону.

При сильному електричному полі, коли E> 10^5 - 10^6 В/см, в твердих діелектриках з'являється електричний струм, швидко зростаючий зі збільшенням напруженості поля. Справедлива формула Пуля

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta E} \qquad (7.4.5.)$$

де: β - коефіцієнт, що залежить від матеріалу; γ_0 - провідність при E = 10^5 - 10^6 В/см. Іноді працює закон Френкеля

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta\sqrt{E}} \qquad (7.4.6.)$$

Для деяких твердих діелектриків характерне явище "повзучості" (старіння) питомого опору, тобто ефект його зменшення з часом під дією поля. Цей процес звернений, він пояснюється зміною хімічної будови матеріалу. Наприклад, старіння титановмістної кераміки пояснюється виходом кисню з решітки. Старіння характерно для матеріалів з іонною провідністю. У матеріалів з електронною провідністю старіння не спостерігається. При примесній іонній провідності струм спадає з часом, тому що зменшується концентрація іонів домішки. Цей процес називається електрохімічним очищенням.

Якщо діелектрик гигроскопичен, то волога, яка їм вбирається, збільшує провідність. Це пояснюється збільшенням числа носіїв заряду за рахунок дисоціації молекул домішки, наявних у воді, і дисоціацією молекул самого діелектрика.

7.5. Поверхнева електропровідність діелектриків

Внаслідок неминучого зволоження, окислення і забруднення поверхні у твердих діелектриків створюється помітна поверхнева електропровідність. Питомий поверхневий опір чисельно дорівнює опору квадрата поверхні будь-яких розмірів. Так як

$$R_s = \rho_v \frac{l}{ab} \qquad (7.5.1.)$$

де: ρ_v - об'ємний питомий опір поверхні глибиною a, шириною b і довжиною l, то

$$R_s = \rho_v \frac{l}{ab} = \rho_s \frac{l}{b} \qquad (7.5.2.)$$

де: ρ_s - питомий поверхневий опір, Ом/кв. Опір ізоляції діелектрика

$$R_{\text{із}} = \frac{R_v \bullet R_s}{R_v + R_s} \qquad (7.5.3.)$$

Щоб збільшити R_s довжину поверхні ізоляторів намагаються збільшити. Всі матеріали діляться на розчинні у воді (парафіни, кераміка, бурштин), частково розчинні (скло), з пористою структурою (папір). Зі збільшенням вологості навколишнього середовища питомий поверхневий опір падає тим сильніше, чим краще матеріал розчиняється в воді, чим більше він забруднений.

Присутність забруднень на поверхні мало позначається на електропровідності гідрофобних (не змочуються водою) діелектриків і сильно впливає на електропровідність гідрофільних (змочуваних водою) діелектриків.

8. ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ В ЗМІННИХ ПОЛЯХ

8.1. Комплексна діелектрична проникність, тангенс кута втрат

Помістимо лінійний однорідний діелектрик між обкладинками плоского конденсатора, що знаходиться під напругою де U_m - амплітуди напруги, ω - кругова частота, t - поточний час (рисунок 8.1.1).

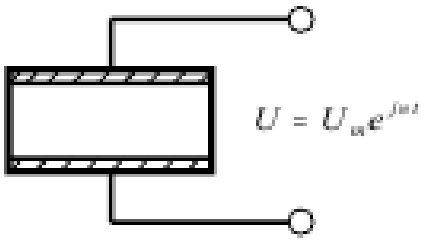


Рисунок 8.1.1. Лінійний однорідний діелектрик між обкладинками плоского конденсатора

Такий конденсатор можна представити схемою заміщення (рисунок 8.1.2).

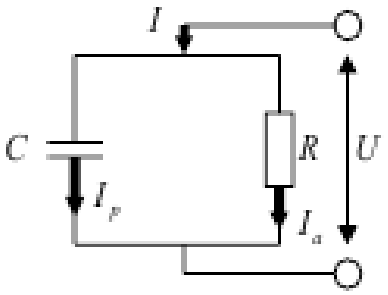


Рисунок 8.1.2. Схема заміщення конденсатору

Схема заміщення не відображає суті фізичних процесів, що відбуваються в діелектрику, і введена умовно. Цей рисунок є схемою заміщення конденсатора, якщо її реакція на вплив зовнішньої напруги така ж, як у самого конденсатора, тобто однакові частотні характеристики, рівні кути зсуву фаз між струмом і напругою, рівні енергії, що запасається і втрачаються. Ємність С характеризує електричну енергію, яка запасається в конденсаторі, опір R - втрати енергії в діелектрику, що йде на його нагрівання. Припустимо, що втрати на наскрізну провідність і втрати в обкладинках конденсатора відсутні.

Побудуємо векторну діаграму струмів і напруги в реальному конденсаторі (рисунок 8.1.3).

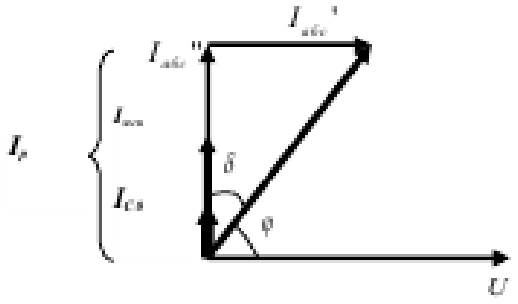


Рисунок 8.1.3. Векторна діаграма струмів і напруги в реальному конденсаторі

Реактивний струм I_p випереджає напругу U на чверть періоду (90^o), причому

$$I_p = I_{c0} + I_{абс}^{//} + I_{мгн}, \qquad (8.1.1.)$$

де I_{c0} - ємнісний струм через конденсатор при відсутності діелектрика між його обкладинками; $I_{абс}^{//}+I_{мгн}$ - струми миттєвої і повільної поляризаций, пов'язані з енергією, що запасається.

Активний струм $I_a = I_{абс}^{/}$, де $I_{абс}^{/}$, складова абсорбційного струму, пов'язана з енергією, що втрачається. Струм через конденсатор

$$I = I_m e^{j(\omega t+\varphi)}, \quad (8.1.2.)$$

де Im - амплітуда струму; φ - кут зсуву фаз між струмом I і напругою U; δ - кут втрат, що доповнює кут φ до 90 °.

Закон Ома для паралельної схеми заміщення

$$I = U(\frac{1}{R} + j\omega C) \quad (8.1.3.)$$

Для діелектриків в змінних полях вводять поняття комплексної діелектричної проникності $\varepsilon^{\cdot} = \varepsilon' - j\varepsilon''$, де ε' - дійсна частина $\varepsilon^{\cdot}$, причому,

$$\varepsilon^{/} = \frac{C}{C_0}, \quad (8.1.4.)$$

де C_0 - ємність вакуумного конденсатора, ε"- уявна складова $\varepsilon^{\cdot}$.

Тоді

$$I = U\left(\frac{1}{R} + j\omega\varepsilon^{|}C_0\right) = j\omega C_0 U\left(\varepsilon^{|} + \frac{1}{Rj\omega C_0}\right) = j\omega C_0 U(\varepsilon^{|} - j\varepsilon^{||}) \quad (8.1.5.)$$

Звідси

$$I_a=\omega C_0\varepsilon^{||}U,\ I_p=\omega C_0\varepsilon^{|}U \quad (8.1.6.)$$

З рисунку 8.1.3 видно, що

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{\omega C_0 \varepsilon^{||} U}{\omega C_0 \varepsilon^{|} U} = \frac{\varepsilon^{||}}{\varepsilon^{|}} \quad (8.1.7.)$$

потужність втрат

$$P_a = UI_a = \omega CU^2 tg\delta \quad (8.1.8.)$$

потужність, що запасається

$$P_p = UI_p = \omega CU^2 \quad (8.1.9.)$$

тоді

$$tg\delta = \frac{P_a}{P_p} \quad (8.1.10.)$$

Звідси видно, що втрати потужності важливо враховувати на високих частотах, особливо при великих робочих напругах. Якщо існує наскрізна активна провідність, то на діаграмі до току $I'_{абс}$ слід додати $I_{скв}$ (струм наскрізної) і tgδ буде великим.

8.2. Види поляризації діелектриків

Розрізняють такі види поляризації діелектриків:

- деформаційні - пружний зсув зарядів один щодо одного під впливом електричного поля, не супроводжується втратами енергії; це електронна і іонна поляризації;

- релаксаційні - пов'язані з тепловими коливаннями електронів, іонів або з поворотом полярних молекул в електричному полі; супроводжуються втратами енергії; це електронно-релаксаційна, іонно-релаксаційна, дипольно-релаксаційна поляризації;

- з особливим механізмом, пов'язані з втратами енергії; це структурна, спонтанна і резонансні поляризації.

Електронна поляризація - пружне зміщення і деформація оболонок атомів і іонів під дією зовнішнього електричного поля (рисунок 8.2.1.).

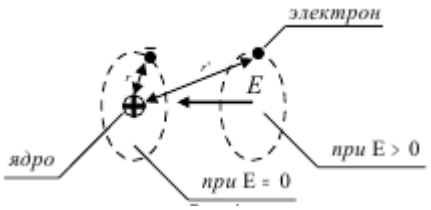


Рисунок 8.2.1. Електронна поляризація

Спостерігається у всіх діелектриків без винятку. Час встановлення одно 10^{-15}-10^{-14}с. Виявляється на частотах 10^{14}-10^{16} Гц. Величина відносної діелектричної проникності речовини тільки з цим видом поляризації чисельно дорівнює квадрату показника заломлення світла, тобто $\varepsilon = n^2$.

До числа діелектриків, у яких спостерігається тільки електронна поляризація, відносяться наступні: кисень, азот, метан, трансформаторне масло, чотирихлористий водень (рідина), толуол, бензол, парафін, церезин, поліетилен, поліізобутилен, поліпропілен, натуральний каучук, ескапон, полістирол, фторопласт-4.

Графіки залежності ε 'від частоти і температури наведені на рисунку 8.2.2.

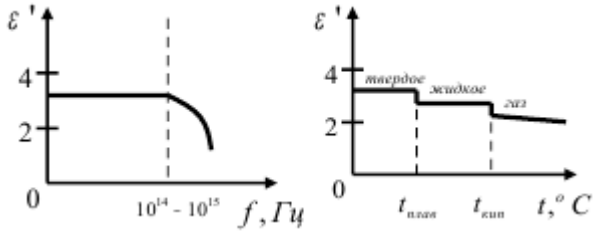


Рисунок 8.2.2. Графіки залежності ε' від частоти і температури електронної поляризації

До числа діелектриків, у яких спостерігається тільки електронна поляризація, відносяться наступні: кисень, азот, метан, трансформаторне масло, чотирихлористий водень (рідина), толуол, бензол, парафін, церезин, поліетилен, поліізобутилен, поліпропілен, натуральний каучук, ескапон, полістирол, фторопласт-4.

Графіки залежності ε' від частоти і температури наведені на рисунку 8.2.2.

$$\varepsilon' = 1 + \frac{\chi}{\varepsilon_0} = 1 + n\alpha_e \qquad (8.2.1.)$$

де: n - число атомів або іонів в одиниці об'єму; α_e - електронна поляризованість одного атома або іона.

При цьому α_e не залежить від температури. Деяке зменшення ε' з ростом температури пов'язано зі зменшенням числа частинок в одиниці об'єму. Найбільш різке зниження ε' спостерігається при переході речовини з одного агрегатного стану в інше.

Іонна поляризація

Характерна для твердих тіл з іонною будовою і щільною упаковкою іонів. Виражається в пружному зсуві іонів в електричному полі. Час встановлення лежить в межах 10^{-12} -10^{-13} с. Поляризованість одного іона

$$\alpha_u = \frac{2q}{v} \qquad (8.2.2.)$$

де: q - заряд іона; ν - коефіцієнт пружного зв'язку між іонами.

Діелектрична проникність

$$\varepsilon = 1 + n(\alpha_e + \alpha_n) \qquad (8.2.3.)$$

Графіки залежностей ε' від частоти і температури представлені на рисунку 8.2.3.

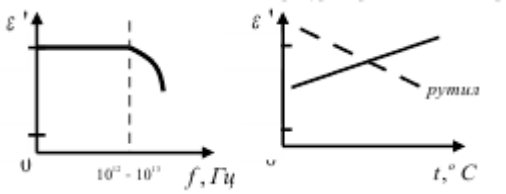


Рисунок 8.2.3. Графіки залежностей ε' від частоти і температури іонної поляризації

Зі збільшенням температури ν зменшується і α_u збільшується, тому ε' зростає. Виняток становить рутил (TiO_2), у якого $\alpha_e > \alpha_u$ з ростом температури ε' зменшується.

До діелектриків, у яких превалює іонна поляризація, відносяться наступні: KCl; NaCl; $CaCO_3$; PbO; Al_2O_3.

Електронно-релаксаційна поляризація

Виникає за рахунок орієнтації порушених тепловою енергією надлишкових «дефектних» електронів або «дірок». Характерна для діелектриків з високим показником заломлення, великим внутрішнім полем і електронної електропровідністю: TO_2 з домішками Nb, Ca, Ba, Ti; ряду з'єднань на основі оксидів металів зі змінною валентністю (Nb, Bi, Ti, V, Fe). Величина ε' дуже висока, в її температурної залежності є максимум, головним чином, в області негативних температур. Час встановлення лежить в межах 10^{-13}-10^{-8} с. Графіки залежності ε' від частоти і температури показані на рисунку 8.2.4.

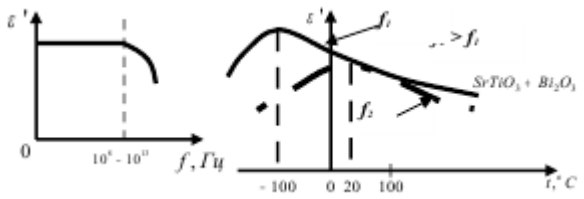


Рисунок 8.2.4. Графіки залежності ε' від частоти і температури електронно-релаксаційної поляризації

Іонно-релаксаційна поляризація

Спостерігається в неорганічних стеклах і в деяких іонних кристалічних неорганічних речовинах з нещільної упаковкою іонів. В цьому випадку слабо пов'язані іони речовини під дією зовнішнього електричного поля серед

хаотичних теплових перекидань отримують надлишкові перекидання в напрямку поля. Час встановлення лежить в межах 10^{-13} -10^{-8} с.

Графіки залежності ε 'від частоти і температури показані на рисунку 8.2.5.

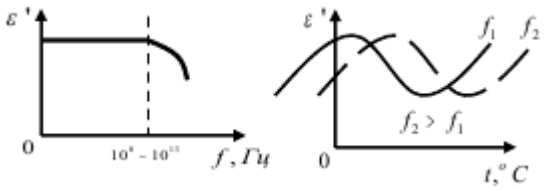


Рисунок 8.2.5. Графіки залежності ε' від частоти і температури іонно-релаксаційної поляризації

Спочатку зі збільшенням температури збільшується кількість іонів, що беруть участь в іонізації, що полегшує поляризацію і ε' зростає. Потім, зменшується число молекул в одиниці об'єму, збільшуються хаотичні коливання, ε' падає. Потім, ε' знову може зростати в зв'язку з появою нових видів поляризації. Максимум ε' спостерігається в області негативних температур при низьких частотах. До речовин, у яких переважає цей вид поляризації, відносяться деякі сорти кераміки.

Дипольно-релаксаційна поляризація

Полягає в частковому орієнтуванні полярних молекул речовини під дією електричного поля, а також в пружному змішуванні зарядів всередині молекул. Пов'язана з тепловими коливаннями часток. Характерна для полярних газів і рідин, а також для твердих полярних органічних діелектриків, але в цьому випадку поляризація обумовлена не поворотом самої молекули, а поворотом в ній полярних радикалів по відношенню до молекули. Таку поляризацію також називають дипольно-радикальної. Цей вид поляризації характерний для поліамідних, епоксіальних,

фенолофармальдегідних, поліефірних, органічних смол, фторопласту-3, поліхлорвінілу, целюлози і її похідних. Час встановлення лежить в межах 10^{-13}-10^{-8}с. Залежно ε' від частоти і температури такі ж, як показання на рисунку 8.2.5.

При негативних температурах в залежності є максимум. Зі збільшенням частот максимум переміщається в область позитивних температур.

Структурна поляризація

Виявляється в твердих діелектриках з неоднорідною структурою при наявності макроскопічних неоднорідностей і домішок. Помітна на низьких частотах і пов'язана зі значними втратами енергії. Окремі області діелектрика - з різною провідністю поводяться як великі полярні молекули. В електричному полі вільні носії заряду переміщаються в межах кожної області. Зі збільшенням частоти ε' падає (рисунок 8.2.6), тому що області не встигають переорієнтуватися. За графіком ε' = f (f) можна судити про ступінь неоднорідності діелектрика. Час встановлення лежить в межах від сотих часток секунди до декількох годин. Характерна для паперу, просоченої головаксом, текстоліту, гетинаксу.

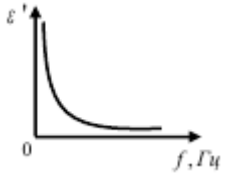


Рисунок 8.2.6. Графік ε' = f (f)

Резонансні види поляризації

Спостерігаються на частотах, що збігаються з власною частотою коливань електронів та іонів. Характерні залежності ε' і ε'' показані на рисунку 8.2.7.

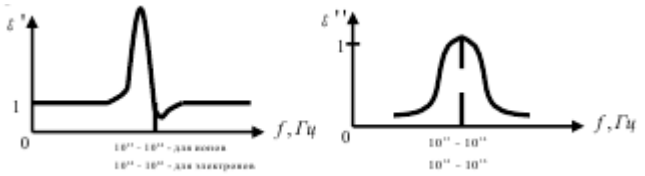


Рисунок 8.2.7. Характерні залежності ε' і ε" для резонансних видів поляризації

На резонансній частоті поглинання енергії максимально, тобто ці види поляризації хоча і миттєві, але з втратами. Спонтанна (мимовільна) поляризація пов'язана з утворенням в ряді речовин при певній температурі угруповань іонів, що володіють великим електричним моментом. Поляризованність нелінійно залежить від напруженості зовнішнього електричного поля. Поляризація супроводжується значними втратами енергії. Спонтанною поляризацією мають сегнетоелектрики.

9. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ І ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

9.1. Види діелектричних втрат

Розрізняють такі види втрат енергії в діелектрику:

- втрати, зумовлені наскрізною провідністю;
- втрати, пов'язані з поляризацією.
- втрати на іонізацію повітряних включень.
- втрати, зумовлені неоднорідністю структури.,

Втрати на наскрізну провідність значні у матеріалів високої об'ємної і поверхневої провідності. Якщо конденсатор з втратами уявити паралельною схемою заміщення, що складається з ємності С і опору $R_{із}$, то

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{\frac{U}{\omega C}}{R_{із} U} = \frac{1}{R_{із}\omega C} \qquad (9.1.1.)$$

потужність втрат

$$P_a = I_a U = \frac{U^2}{R_{із}} \quad (9.1.2.)$$

Видно, що tgδ обернено пропорційний частоті, а потужність втрат від частоти не залежить.

З іншого боку, тому що $C = \frac{\varepsilon' S}{d}$ (S-площа обкладок, d – товщина діелектрика), то питома наскрізна провідність.

$$tg\delta = \frac{d}{R_{із}\omega S\varepsilon'} = \frac{Y_{скв}}{\omega\varepsilon'}, \quad (9.1.3.)$$

$$\text{Де } Y_{скв} = \frac{d}{R_{із}S} \quad (9.1.4.)$$

питома наскрізна провідність. Чим більше Yскв і менше ε', тим більше tgδ. Для хороших діелектриків втратами на наскрізну провідність можна знехтувати вже на частотах 1-100 кГц.

Температурні залежності tgδ і P_a описуються виразами

$$tg\delta = Be^{-\frac{c}{T}}, P_a = Ae^{-\frac{b}{T}} \quad (9.1.5.)$$

де: A, B, b, c, - постійні коефіцієнти, що залежать від матеріалу.

Видно, що і tgδ і P_a з ростом температури зростають, що пов'язано зі зменшенням $R_{із}$.

Так як $tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ для втрат на поляризацію, то загальну частотну залежність ε' і ε'' для діелектриків зручніше представляти у вигляді, наведеному на рисунку 9.1.1

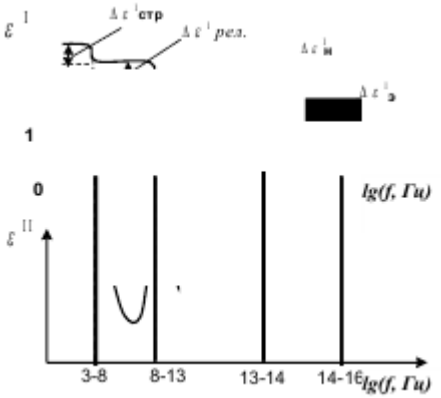


Рисунок 9.1.1. Загальна частотна залежність ε' і ε'' для діелектриків

Тут:

$\Delta\varepsilon'_{стр}$ приріст ε' за рахунок структурної поляризації; $\Delta\varepsilon'_{рел}$ - приріст за рахунок релаксаційних видів поляризації; $\Delta\varepsilon'_{и}$ і $\Delta\varepsilon'_{е}$ - приріст за рахунок іонної і електронної поляризацій.

При збігу частоти сигналу з частотою власних коливань частинок речовини спостерігається інтенсивне поглинання енергії електричного поля. Втрати і $tg\delta = \frac{\varepsilon^{II}}{\varepsilon^{I}}$ зростають з частотою в кожному піку до тих пір, поки поляризація встигає слідувати за зміщенням поля. Чим більше частота f, тим більше число переорієнтації диполя, тим більше tgδ і P_a. Коли частки не встигають орієнтуватися за полем, ε'', tgδ падає, а потужність втрат стає постійною ($P_a = U^2\omega\, Ctg\delta$, ω - зростає, tgδ - падає, P_a = const). Це показано на рисунку 9.1.2.

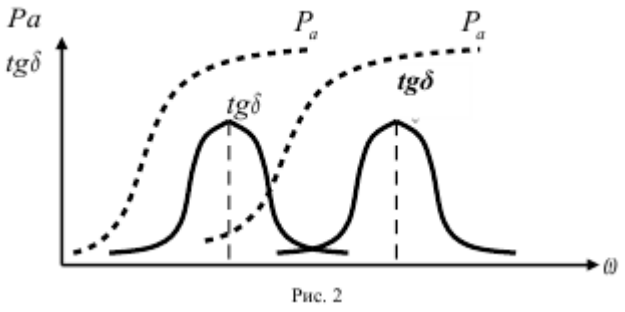


Рисунок 9.1.2. Залежність P_a і tgδ від частоти

У температурних залежностях tgδ і P_a є максимум. Наприклад, для силікатного скла і паперу такі залежності показані на рисунку 9.1.3.

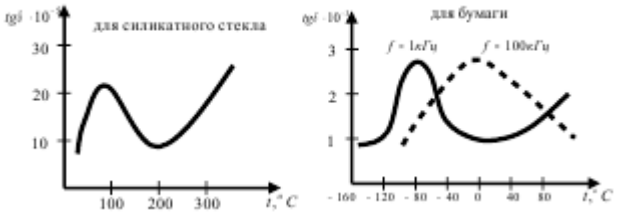


Рисунок 9.1.3. Залежність tgδ від температури для силікатного скла і паперу

Графіки, наведені на рисунку 9.1.1, можна використовувати для орієнтованого передбачення частотних характеристик діелектриків. Наприклад, для поліетилену, що має тільки електронний вигляд поляризації, залежність ε' і ε" від частоти будуть мати вигляд, показаний на рисунку9.1.4

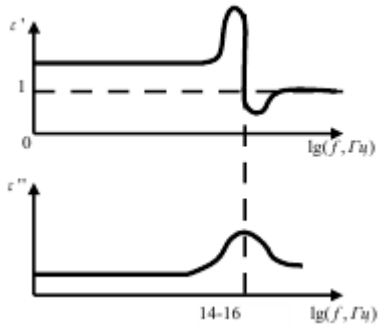


Рисунок 9.1.4. Залежність ε' і ε" від частоти для поліетилену

Для паперу, у якого можлива структурна дипольно-релаксаційна і електронна поляризації ці ж залежності будуть такими, як показано на рисунку 9.1.5.

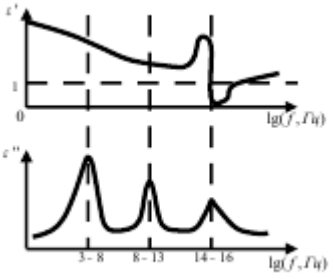


Рисунок 9.1.5. Залежність ε' і ε" від частоти для паперу

Втрати в діелектриках з неоднорідною структурою залежать від ступеня і характеру неоднорідності. У частотної залежності tgδ також є максимум, а в температурної залежності tgδ може бути кілька максимумів. Наприклад, для

паперу, просоченого олійно-каніфольним компаундом в залежності tgδ від температури є два максимуму, перший (-60°С) характерний для паперу, другий (60°С) характерний для компаунда.

Втрати на іонізацію повітряних включень в твердому діелектрику виникають при високій напрузі, коли починається їх іонізація. При збільшенні напруги tgδ спочатку зростає, а потім зменшується, коли всі молекули вже іонізовані.

9.2. Пробої діелектриків

Порушення електричної міцності діелектрика в електричному полі називають пробоєм.

Напруга, при якому відбувається пробій, називають пробивною - $U_{пр}$, а відповідне значення напруженості електричного поля - пробивною напруженістю $E_{пр}$. При цьому $E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d} \left[\frac{В}{м}\right]$

Пробій газів обумовлений ударною іонізацією і фотоіонізацією, супроводжується коронним розрядом. Пробивна напруженість залежить від хімічного складу газу, температури, тиску, відстані між електродами, від форми напруги, що впливає. При нормальних умовах пробивна напруженість повітря $E_{пр} = 30 \frac{кВ}{см}$.

Тривалість підготовки пробою газів становить, 10^{-7}-10^{-8}с. Чим більше величина прикладеного до газового проміжку напруги, тим швидше розвивається пробій.

Пробивна напруга при впливі імпульсів вище, ніж при впливі постійної напруги, що оцінюється коефіцієнтом імпульсу $\beta = \frac{U_{пр\,імп}}{U_{пр}}$ величина β досягає 1,5. При зменшенні зазору між електродами $E_{пр}$ збільшується (рисунок 9.2.1), що пояснюється труднощами формування розряду.

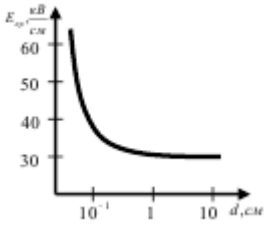


Рисунок 9.2.1. Залежність пробою газів $E_{пр}$ від величини зазору між електродами d

Графік залежності Епр повітря від тиску показаний на рисунку 9.2.2.

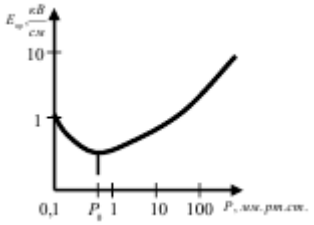


Рисунок 9.2.2. Графік залежності $E_{пр}$ повітря від тиску

При збільшенні тиску від P_o зменшується відстань між молекулами, зменшується довжина вільного пробігу, $E_{пр}$ зростає. При зменшенні тиску від P_o зменшується число молекул в одиниці об'єму, зменшується ймовірність зіткнення атомів з електронами, $E_{пр}$ також зростає. Вплив частоти f на $E_{пр}$ повітря видно з рисунку 9.2.3.

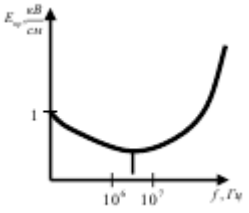


Рисунок 9.2.3. Вплив частоти f на $E_{пр}$ повітря

Зі збільшенням частоти до $5 \cdot 10^6$ Гц, $E_{пр}$ спочатку зменшується, що пояснюється спотвореннями поля, зумовленими утворенням об'ємних зарядів в повітрі і внаслідок відмінності в рухомому іонів і електронів. При збільшенні частот більше $5 \cdot 10^6$ Гц $E_{пр}$ зростає, що пояснюється тим, що ударна іонізація не встигає розвиватися за напівперіод прикладеної напруги.

Вплив хімічного складу газу на пробивну напруженість видно з наступних даних: для азоту $\frac{E_{пр}}{E_{пр\ возд}} = 1$ для гексафториду сірки (елегазу) SF_6 це відношення дорівнює 2,5, для фреону CCl_2F_2 -2,6, для парів чотирихлористого вуглецю - 6,4.

На $E_{пр}$ також впливає ступінь однорідності поля. У неоднорідному полі можливо виникнення коронного розряду в критичних місцях (між вістрями). Неоднорідність поля веде до зменшення $E_{пр}$.

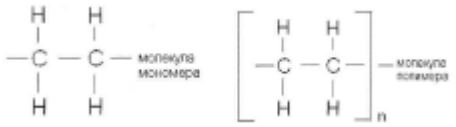
Пробій рідин відбувається при більш високих напруженістях, ніж в газах. Пробивна напруженість сильно залежить від концентрації домішок, особливо води. Соті частки відсотків води знижує $E_{пр}$ в кілька разів. Пробій рідин пояснюється дисоціацією молекул домішок і власних молекул при високих напруженістях поля, а також ударною іонізацією

10. ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

10.1. Основи будови і класифікація органічних діелектриків

Діелектрики поділяються на органічні та неорганічні. Основою органічних матеріалів служить вуглець, а неорганічних - кремній. Зустрічаються також і кремній-органічні матеріали. Органічні діелектрики діляться на природні і синтетичні. Це високомолекулярні сполуки-смоли. До природних смол відносяться каніфоль, шелак, янтар, натуральний віск, гірський віск (озокерит). Каніфоль виходить із соків дерев хвойних порід, бурштин - викопна смола, шеллак- відкладення випорожнень комах тропічних країн.

Синтетичні смоли виходять шляхом хімічних реакцій полімеризації або поліконденсації. Реакція полімеризації - це хімічний процес з'єднання молекул простих за складом речовин (мономерів) в великі молекули (полімери) без отримання побічних продуктів. Наприклад, етилен C_2H_4:



Тут n - ступінь полімеризації, тобто число молекул мономера в молекулі полімеру.

Сполуки, що містять одиниці молекул мономера - гази, десятки-рідина, сотні- тверді речовини. Зі збільшенням кількості атомів вуглецю збільшується температура розм'якшення речовини.

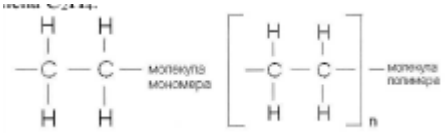
Якщо в реакції бере участь кілька полімерів - це реакція кополімеризації і отримується речовина сополимер.

Реакція поліконденсації - хімічний процес утворення високомолекулярних сполук, коли в молекулу полімеру входять не всі молекули мономера і утворюються низькомолекулярні побічні продукти у вигляді води, аміаку та інших. За будовою молекули полімери діляться на лінійні і просторові. Лінійні полімери утворюються. коли молекула мономера має дві реактивні точки (дві вільні валентності), що створюють зв'язок між молекулами, як у етилену. При великій кількості реактивних точок виходять просторові полімери. Лінійні полімери гнучкі і еластичні, легко розм'якшуються і розплавляються при підвищенні температури, легко розчиняються в розчинниках. Просторові полімери володіють великою жорсткістю, плавляться при високих температурах, а багато хто з них при високих температурах руйнуються (згоряють, обвуглюються), розчиняються погано, багато практично нерозчинні. Лінійні полімери термопластичні, тобто їх властивості змінюються при нагріванні і охолодженні. Термопластичні матеріали легко переробляються литтям, пресуванням, видавлюванням. Лінійні полімери можуть мати аморфну структуру, а також містити і кристалічну фазу (до 90%). Матеріали з кристалічною фазою втрачають здатність розчинятися. Просторові полімери термореактивні, тобто при нагріванні переходять в новий стан.

Полімеризаційні смоли термопластичні, поліконденсаційні- бувають як термопластичними (новолак і поліамідні смоли), так і термореактивними (гліфтальовиє, бакелітові). Поліконденсаційні смоли полярні і гігроскопічні, полімеризації смоли можуть бути полярними і неполярними. Полярні смоли практично не гігроскопічні.

10.2. Полярні високочастотні полімери

Поліетилен виходить полімеризацією етилену, який витягують з газів, що виділяються при переробці нафти і коксового вугілля. Структурна формула етилену C_2H_4:



Коефіцієнт полімеризації n досягає $(20\text{-}35)\cdot 10^3$. Існують два способи отримання поліетилену - при високому і низькому тиску. У першому випадку полімеризація відбувається при температурі t = 200ºС і тиску Р = 1500 - 3000 атмосфер в присутності каталізатора. При другому способі полімеризація відбувається при тиску Р = 1--75 атмосфер в розчиннику (вуглеводні) з додаванням металоорганічного каталізатора, температура t = (30-70)ºС.

Поліетилен є білий (роговідний) матеріал, на дотик нагадує парафін, в тонких плівках прозорий. До переробки у виріб поліетилен гранулюється. Це легкий матеріал, питома вага $d=0{,}92\div 0{,}96$ г/см^3. При підпалюванні поліетилен загоряється, повільно горить синюватим полум'ям без кіптяви. Поліетилен термопластичний, температура розм'якшення t = 110ºС. При кімнатній температурі на нього не діють ні кислоти, ні луг, крім концентрованої азотної кислоти. Поліетилен міцний на розрив, твердий, гнучкий в діапазоні температур t = (-60- + 60)ºС, морозостійкий, стійкий до стирання.

Маслостійкість погана, в бензині набухає, розчиняється в ацетоні, чотирихлористий вуглець $CC1_4$, хлороформі, толуолі, ксилолі. Містить кристалічну (75%) і аморфну (25%) фази.

Електричні параметри:

$\varepsilon=2,2\div2,5$, $tg\delta=10^{-3}\text{-}2\cdot10^{-4}$, $\rho_V=10^{17}$ Ом·см, $E_{пр}=45\div60$ кВ/мм

Залежності від частоти і температури показані на рисунку 10.2.1.

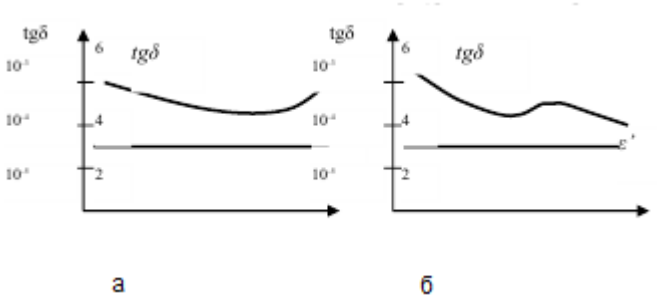


Рисунок 10.2.1. Залежності від частоти (а) і температури (б) tgδ

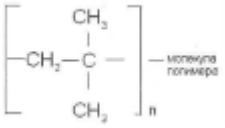
Механічні властивості поліетилену залежать від температури, поліетилен високої щільності в 2-3 рази міцніше на розрив, ніж низької щільності. Водопоглинання поліетилену, зануреного в воду при кімнатній температурі на 1 місяць, становить 0,03%.

Залежно від величини відносного подовження при розриві випускається поліетилен марок (цифри - відносне подовження в процентах). Випускається також пористий поліетилен, який виходить введенням до складу поліетилену газоутворювачей. Електричні характеристики пористого поліетилену: $\varepsilon=1,1$, $tg\delta=10^{-3}$

Водопроникність зростає в 10 разів. Сонячна енергія руйнує поліетилен. Для збільшення світлостійкості в нього вводять до 2% сажі. Горючість поліетилену може бути знижена додаванням в нього хлорованого парафіну і трехокиси сурми. При опроміненні -променями температура плавлення збільшується до (180-200)°С, поліпшуються і механічні властивості.

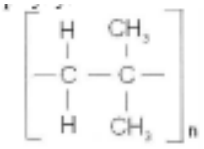
Поліетилен високого тиску застосовують для виготовлення ізоляції і захисних оболонок кабелів зв'язку. Поліетиленові плівки низького тиску застосовують в якості антикорозійного й пакувального матеріалу. Опромінений електронами поліетилен має в 5 разів більшу теплостійкість.

Поліпропілен виходить полімеризацією пропілену, що міститься в газах, що виділяються при переробці нафти. Структурна формула поліпропілену:



Залежно від техпроцесу поліпропілен може бути отриманий як аморфний каучукоподібний, так і кристалічний. Поліпропілен є жорсткий матеріал без кольору і запаху, з глянцевою поверхнею. Він має різко виражену температуру плавлення в діапазоні 164-168ºС. По електричним властивостям аналогічний поліетилену. Він негигроскопичен, стійкий до дії кислот, лугів і розчинів солей, руйнується тільки концентрованою азотною кислотою при температурі 70° С, руйнується під дією сонячних променів, світлостійкість поліпшується при введенні в нього (1-2)% сажі. Розчиняється в бензолі, толуолі. Застосовується для виготовлення штучних волокон, хімічного посуду. Сополимер СЕП-15 етилену і пропилену (2-15% пропілену) має велику теплостійкість, стійкість до розчинення в агресивних середовищах. Плівки поліпропілену міцніше, ніж плівки поліетилену.

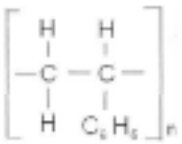
Полиизобутилен - виходить полимеризацией изобутилена, має таку структурну формулу:



Залежно від коефіцієнта n (10^3-$4 \cdot 10^5$) може бути як рідким так і твердим каучукоподібним матеріалом. Поліізобутилен еластичний в діапазоні

температур (78-100)°С. При його нагріванні до температур, що перевищують 100°С, знижуються механічні властивості, пластичність зростає. Він стійкий до впливу води та хімічних розчинів аж до 100°С. Горить коптящим полум'ям. Під дією сонячних променів поліізобутилен стає липким (розпадається), його міцність і еластичність зменшуються. Світлостійкість підвищують введенням 1% сажі. Поліізобутилен випускається марок П-200, П-155, П-118, П-85 (цифри коефіцієнт полімеризації в тисячах). Застосовується при виготовленні високочастотних кабелів, як антикорозійне покриття. Набухає і розчиняється в бензині, гасі. Електричні характеристики близькі й аналогічні характеристикам поліетилену, але $E_{пр}$ в 2-3 рази нижче.

Полістирол виходить полімеризацією стиролу C_8H_8. Структурна формула має вигляд:

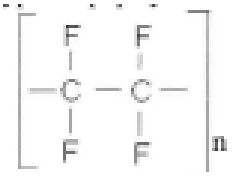


Стирол - побічний продукт сухої перегонки кам'яного вугілля, дерева. Стирол легко полімеризується навіть при зберіганні на холоді, в темряві, при відсутності каталізатора. Полістирол виходить у вигляді блоків, плит, емульсії. Блоковий полістирол володіє кращими електричними властивостями, аналогічними властивостями поліетилену. Полістирол розчиняється в бензолі, ароматичних і хлорованих вуглеводнях. Він стійкий до дії кислот, крім концентрованої азотної, лугів, озону. Мастила руйнують полістирол. Він горить полум'ям, що коптить, володіє підвищеним опором на розрив (в 5 разів міцніше поліетилену), має малу водопоглинаємість. Полістирол застосовується при виготовленні радіокабелів, плівкових конденсаторів, каркасів котушок індуктивності, настановних деталей. Плівка з полістиролу називається стірофлексовой. Емульсійний полістирол застосовується для виготовлення лаків, компаундів. Недоліком полістиролу є низька температура розм'якшення (80°С), розроблений полістирол і з високою

(220 ° С) температурою плавлення. Вироби з полістиролу схильні до утворення найтонших тріщин з часом. Для боротьби з цим явищем в полістирол вводять синтетичний каучук. Полістирол входить до складу пластмас. Пластмаса ПТ-3 містить 3% рутилу TiO_2. Блоковий полістирол легко забарвлюється.

З полістиролу можна виготовляти пінопласт (ПС-1, ПС-Б).

Політетрафторетилен (фторопласт-4) виходить полімеризацією тетрафторетилену C_2F_4. структурна формула:



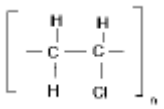
Це білий або сіруватий матеріал, на дотик нагадує мило, найважчий з усіх полімерів d=2,3 г/см^{3}Він має високу теплостійкість (250°С), за хімічними властивостями перевершує платину, не горить, не розчиняється ні в чому, негигроскопичен. ФТ-4 легко склеюється з металами і пластмасами епоксидними, карбинольними клеями. ФТ-4 має гарні електричні характеристики:

$\varepsilon=1,9\div2$, $tg\delta=(2\div4)\cdot10^{-4}$, $\rho_V=10^{19}$ Ом·см, $E_{пр}\geq25$ кВ/мм

Електричні властивості практично не змінюються в діапазоні частот до 10^{10}Гц. Його недоліки: дорогий, тече на холоді при навантаженні більше, токсичний при t = 250°С, так як виділяється фтор, $E_{пр}$ знижується при тривалому впливі напруги, при впливі радіації властивості погіршуються. Застосовується в СВЧ пристроях, в конденсаторах, для виготовлення вакуумних прокладок.

10.3. Полярні низькочастотні полімери

Поліхлорвініл (полівінілхлорид) виходить полімеризацією хлорвінілу (C_2H_3Cl) n. Структурна формула має вигляд:



Ця формула схожа на формулу етилену, але один атом водню замінений атомом хлору. Внаслідок асиметрії формули поліхлорвініл - полярний діелектрик. Тому він має знижені електричні властивості:

ε = 3-6; tgδ = 10^{-1} - 10^{-3}; ρv = 10^{14} - 10^{15} Ом см; $E_{пр}$ = 10 - 50 кВ/мм.

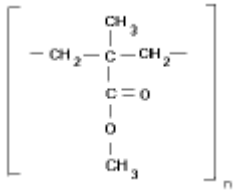
Теплостійкість поліхлорвінілу низька (60 - 80˚С), морозостійкість задовільна (-75 ÷ -60˚С).

Випускається пластифікований поліхлорвініл - пластикат. Поліхлорвініл стійкий до дії хімічних реагентів, набухає в діхлоретане, при нагріванні розкладається, виділяючи хлористий водень. Під дією світла пластикати старіють (підвищується крихкість, зменшується морозостійкість). Для підвищення температури розкладання в поліхлорвініл вводять стабілізатори - вуглекислий свинець, солі кальцію, кадмію, барію, стронцію, епоксидні смоли. Пластикати випускаються як без барвників у вигляді прозорого матеріалу, так і пофарбованими в чорний, коричневий і рожевий кольори. Барвники захищають пластикати від світлового старіння. Пластикати горять у полум'ї, але припиняють горіти, якщо їх з полум'я видалити. Трансформаторне масло розчиняє пластикати. Безпосереднє зіткнення пластикату з поліетиленом знижує електричні властивості поліетилену. Пластикати застосовують для ізоляції телефонних і монтажних проводів, захисних оболонок кабелів (марки ПХВ - 1, ПХВ - 2). Вініпласт отримують термічним пресуванням поліхлорвінілу.

Його колір може бути від світлого до чорного. Він застосовується для виготовлення радіодеталей, як конструкційний матеріал. Вініпласт зварюється потоком гарячого повітря, добре механічно обробляється, він не

горить. Випускається сополимер поліхлорвінілу з бутилакрилатом, метилметакрилатом (оргсклом), ізобутіленом. Він має більшу еластичність, володіє кращими електричними властивостями.

Полиметилметакрилат (оргскло) виходить полімеризацією метилметакрилату. Структурна формула має вигляд:



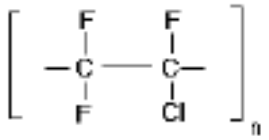
Це прозорий матеріал, що володіє теплостійкістю до 70˚С, морозостійкістю до -180˚С. Електричні властивості наступні:

$\varepsilon = 2,8 – 3,5$; $tg\delta = 0,02 – 0,03$; $\rho_v = 10^{13} - 10^{14}$ Ом см; $E_{пр} = 18 - 40$ кВ/мм.

Оргскло випускається пластифіковане (з пластифікатором) і непластифіковане, володіє високою світлостійкістю, пропускає ультрафіолетові промені, має маслостійкість, бензіностійкість, вологостійкість. Розчини кислот і лугів не руйнують оргскло. Оргскло горить з виділенням шкідливих газів. Листове оргскло обробляється гарячим штампуванням при t = (80 - 125)˚С. Порошкове оргскло добре пресується при температурі (120 - 200)˚С. З нього можуть виходити деталі литтям під тиском P = 1200 кг / см^2 при температурі (130 - 270) ˚С.

Оргскло використовується як конструкційний матеріал. Добре склеюється діхлоретаном, оцтовою кислотою, зварюється при t = (140 - 150)˚С і P = 510 кг/см^2. При тривалому кип'ятінні оргскло набуває молочного кольору. Оргскло застосовується для виготовлення лаків і клеїв.

Політріфтормонохлоретілен (фторопласт - 3) виходить полімеризацією тріфторхлоретілена (C_2F_3Cl) n. структурна формула:



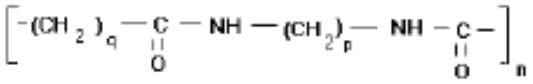
Зовні подібний фторопласту-4, але має підвищену жорсткість, знижені електричні та хімічні властивості. Електричні властивості:

$\varepsilon = 3$; $tg\delta = 0{,}01 – 0{,}02$; $\rho_v = 10^{16} - 10^{17}$ Ом см; $E_{пр} = 15 - 20$ кВ/мм.

Теплостійкість - 200˚С, морозостійкість - -200˚С. ФТ-3 має високу лугостійкість, не стійкий до радіації, електрична міцність знижується при тривалому впливі напруги.

Застосовується для виготовлення антикорозійних і ізоляційних покриттів на алюмінії, стали, нікелі. Може бути підданий загартуванню. Загартовані деталі майже прозорі.

Поліамідні смоли виходять при поліконденсації амінів і амінокислот. структурна формула:



Індекси p і q лежать в межах 4 - 8. Відрізняються високою механічною міцністю і еластичністю, хімічно стійки по відношенню до бензину, спирту, бензолу, лугів. Концентровані кислоти руйнують поліамідні смоли, мурашина і оцтова кислота, феноли розчиняють поліамідні смоли при $t = 70$˚С.

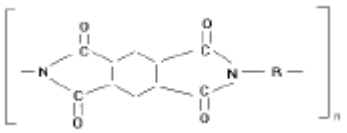
Колір цих смол змінюється від світлого до темно-коричневого.

Випускаються такі поліамідні смоли: капрон (p = q = 5), нейлон (p = 6, q = 4), енант, поліамід 68, 548, АК-7, поліуретан ПУ-1. Капрон за кордоном називають - перлон, синонім, дідерон. Теплостійкість цих смол - 110˚С, морозостійкість -30 ÷ -50º С. Електричні властивості:

$\varepsilon = 4 - 6$; $tg\delta = 10^{-1}$-10^{-2}; $\rho_v = 10^{10}$-10^{14}Ом см; $E_{пр} = 20$-30 кВ/мм.

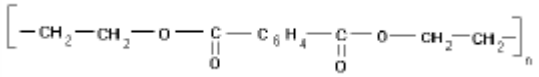
Поліамідні смоли мають підвищену гігроскопічність, старіють при нагріванні, застосовуються для виготовлення міцних волокон, ізоляційних плівок, деталей конструкцій методом гарячого лиття під тиском.

Поліїміди отримують реакцією поліконденсації і являють собою складні високомолекулярні сполуки. структурна формула:



Поліїміди відносяться до числа найбільш нагревостійких органічних полімерів. При t = 500˚С поліімідна плівка вдвічі міцніше, ніж плівка з поліетилену при t = 20˚С. Вони не плавляться, що не розм'якшуються при температурах нижче 800˚С, проте з них виділяються гази CO і CO_2 при t> 400˚С. Мають хороші електричні властивості, застосовуються як підкладки гібридних мікросхем, як основа друкованих плат.

Поліетилентерефталат (лавсан) отримують поліконденсацією етилену і терефталевої кислоти. структурна формула:



Відноситься до поліефірним смол (глифталевая, полікарбонатна, поліамідна, епоксидна). Хімічно стійкий, але при підвищених температурах добре окислюється на повітрі, тому переробку лавсану виробляють в середовищі нейтральних газів. Має високу механічну міцність (як сталь), електричною міцністю ($E_{пр}$ = 20 - 30 кВ/мм). За кордоном називається майлар. Електричні характеристики: ε = 3-3,5; tgδ = 0,002 – 0,02; ρ_v = 10^{14} - 10^{16} Ом см.

Теплостійкість - 250˚С, морозостійкість - -100˚С. Застосовується для виготовлення підкладок гібридних інтегральних схем, як конструкційний матеріал. Плівки лавсану використовуються як ізоляційні при виготовленні трансформаторів, конденсаторів.

Ефіри і етроли целюлози

Целюлоза - рослинні високомолекулярні сполуки (бавовна, дерево і т.д.). Структурна формула гілляста, хімічна формула:
$[C_2H_{10}O_5]$ n, де n = 1000-2000. Так як структурна формула містить групу (OH), целюлоза дуже гігроскопічна. При відповідній обробці целюлози виходять її ефіри. При обробці спиртами виходять прості ефіри, кислотами - складні: нитроцеллюлоза ((OH) замінюється на (NO_2)), ацетилцелюлози, етилцелюлоза, тріацетатцеллюлоза. Електричні властивості: ε = 3-5; $tg\delta = 10^{-2}$-10^{-3}; $\rho_v = 10^{10}$-10^{14} Ом см; $E_{пр}$> 3 кВ/мм.

Ефіри целюлози використовуються для одержання волокон (віскозне, ацетатне, штапельне), плівок (кіно, фото, целофан), пластиків, лаків (розчиняють ефіри в ацетоні).

На основі ефірів целюлози отримують етроли целюлози шляхом змішування ефірів з пластифікаторами, наповнювачами, стабілізаторами, барвниками. Етроли допускають переробку методом гарячого і холодного лиття, пресування. Їх недоліки - низька теплостійкість (30 - 50 ° С), схильність до займання.

11. ПОЛЯРНІ НИЗЬКОЧАСТОТНІ ПОЛІМЕРИ

11.1. Термореактивні смоли

Фенолоформальдегідні смоли отримують шляхом реакції поліконденсації між фенолом і формаліном, діляться на дві групи: новолачна і резольна.

Новолачна смола виходить при надлишку фенолу і кислому каталізатору. Утворюється смола і вода як побічний продукт. Новолачна смола термопластична, називається ідітола. Вона розчиняється в спирті,

ацетоні. Застосовується для виготовлення лаків, пластмас. Для перекладу її в термореактивний стан в неї додається уротропін.

Резольна смола виходить за однакової кількості концентрацій фенолу і формаліну і лужному каталізаторі (аміаку). Після варіння крім води виходить смола в стадії А - резол (низькомолекулярні з'єднання). Він термопластичний, плавиться при нагріванні, розчиняється в розчинниках. Якщо резол прогріти протягом 6 -7 годин при t = 60 - 70°С, виходить смола в стадії Б - резитол (високомолекулярна сполука). Резитол не плавиться, але розм'якшується при нагріванні і не розчиняється в розчинниках. При нагріванні резитолу протягом 4-5 годин при t = 80°С з підвищенням до 140°С і підвищеному тиску виходить смола в стадії С - резит. Резит не плавиться при нагріванні і не розм'якшується. Фенолоформальдегідна смола називається бакелітом. Бакеліт в стадії С малоеластічен, вологостійкість низька.

Смола в стадії А використовується для просочування паперу, тканини, скловолокна, з метою отримання після перекладу смоли в стадії Б і С гетинакса, текстоліту, склотекстолита. Випускаються такі пресспорошки, що містять крім резола наповнювачі (крейда, деревні стружки і т.д.). З пресспорошков виготовляються фенопласти. Всі ці матеріали мають наступні електричні властивості:

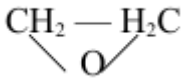
$\varepsilon = 4 - 6$; $tg\delta = 10^{-1}\text{-}10^{-2}$; $\rho_v = 10^{11}\text{-}10^{12}$Ом см; $E_{пр} = 12\text{-}16$ кВ/мм.

При заміні фенолу аніліном C_6H_5 (NH_2) отримують анілінoформальдегідную смолу. Полярні властивості цієї смоли виражені слабше. При реакції формальдегіду з карбамідом (NH_2) 2CO виходить карбамидоформальдегидная смола. При реакції формальдегіду з меланіном $C_3H_6N_6$ виходить меланіну-формальдегідна смола. Ці смоли мають високу клейкість і використовуються для виготовлення клеїв, лаків. Дві останні смоли використовуються для виготовлення амінопластів.

Гліфталева смола виходить реакцією поліконденсації між гліцерином і фталевим ангідридом. Смола в стадії А розчиняється в ацетоні, спирті,

бензині, має високу клейкість. Перехід в стадію З відбувається при більш високій температурі і протягом більшого часу в порівнянні з фенолоформальдегидной смолою. Гліфталева смола більш еластична, має кращі електричні характеристики. Вона стійка до теплового старіння, використовується для виготовлення міканітів, текстолітів, гетинаксу.

Епоксидні смоли утворюються в результаті реакції поліконденсації багатоатомних фенолів і з'єднань, що містять епоксидну групу:



Багатоатомні феноли: резорцин, гідрохінон, пирокатехин, салігенін, діоксідіфенілпропан, діоксідіфенілсульфон, новолачна і резольна смоли, крохмаль, полісахариди та інші. Сполуки, що містять епоксидну групу: епіхлоргідрин гліцерину, бутадіендіоксід, дігліцідний ефір гліцерину, діхлоргідрін гліцерину і інші.

Найчастіше застосовується діоксідіфенілпропан і епіхлоргідрин гліцерину - діанові смоли. Реакція відбувається в розчині їдкого натрію. Залежно від співвідношення компонент, смоли можуть бути рідкими і твердими; кольори від прозорого до темно - коричневого. Широке застосування отримали смоли ЕД-5 і ЕД-6.

Епоксидні смоли токсичні, викликають шкірні захворювання. Вони мають високу клейкість, еластичність, хімічно стійки, розчиняються в ацетоні. Ці смоли розчиняють лакоткані, кембрікові трубки. Найчастіше використовують не смоли, а компаунди на їх основі, що містять самі смоли, затверджувач, каталізатори, пластифікатори. В якості затверджувача застосовують аміни та ангідриди кислот (гексаметілдіамін, метафенілдіамін, малеїновий і фталевий ангідриди). У разі застосування амінів затвердіння відбувається без нагріву, ангідридів - при нагріванні до t> 100°С. Каталізатор прискорює процес затвердіння. Наповнювач підвищує механічну міцність компаунда (кварцове і слюдяне борошно, кераміка і т.д.), зменшує усадку при

твердінні, коефіцієнт лінійного розширення, покращує теплопровідність, знижує горючість. Пластифікатор збільшує еластичність компаундов (трикрезилфосфат, дибутилфталат і інші), зменшує крихкість, підвищує стійкість до теплових ударів. Усереднені електричні властивості наступні:

$\varepsilon = 3,7\text{-}6$; $tg\delta = (1\text{ -}4)\ 10^{-3}$; $\rho_v = 10^{15} - 10^{17}$ Ом см; $E_{пр} = 25 - 30$ кВ / мм.

Епоксидні компаунди мають високу адгезію (зчеплення) до металів, дерев, пластмас, високу механічну міцність, водостійкість. Епоксидні клеї склеюють метали, скло, фарфор, кераміку, пластмаси.

11.2. Низькочастотні термореактивні композиційні пластмаси

Пластмаси діляться на прості і композиційні. Прості пластмаси складаються тільки з смол, композиційні крім смоли містять наповнювач, пластифікатор, барвник. Властивості композиційних пластмас обумовлюються як властивостями смоли (сполучна речовина), так і властивостями наповнювача.

Фенопласти виходять пресуванням або литтям під тиском пресспорошків з балелітових або новолачних фенолоформальдегідних смол, з крезольно-формальдегідних смол або їх суміші. Пресспорошків випускають 54 марок, які діляться на 7 груп від загального призначення до особливого призначення. Електроізоляційні пресспорошкі марок К-21-22, К-211-3, К-221-34 і інших мають в якості наповнювача мелену слюду, кварц. Застосовуються для виготовлення штепсельних вилок, вимикачів, розеток, корпусів телефонів. Вироби з фенопласту називають карбалітовимі виробами.

Амінопласти (карбамідні пластини) виготовляють з мочевино-формальдегіду або меламіно-формальдегіду.

Наповнювачі - сульфатна целюлоза, азбест. Випускаються різних кольорів, застосовуються для виготовлення декоративних виробів, побутової техніки, харчового посуду. Випускаються марки ВЕН-11, ВЕН-12, що допускають холодне пресування, а також інші. Різновидом амінопластів є

Мікор - отверділа піна мочевино-формальдегіду, що містить вогнезахисні солі (білого кольору). Випускається у вигляді пластин, блоків для теплоізоляції.

Шаруваті пластини в якості сполучного матеріалу містять фенолоформальдегідну, епоксидну, кремнійорганічну смоли, в якості наповнювача служить папір, бавовняні і синтетичні тканини, азбестове волокно. Основні шаруваті пластини - це гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, асботекстоліт, деревні шаруваті пластини. Гетінакс виготовляється методом гарячого пресування паперу, просоченого смолою. Випускається фольгований і декоративний гетинакс. Текстолит виготовляється так само, але наповнювачем містить тканину. Текстолит більш міцний, ніж гетинакс. Склотекстоліт може використовуватися на високих частотах. Якщо в якості наповнювача використовується скловолокно, матеріал називається скловолокніти.

11.3. Пінопласти і поропласти

Пінопластами і поропластами називають пластмаси з газоповітряним наповнювачем. Пінопласт містить не пов'язані один з одним бульбашки, а поропласти мають пори, пропускають повітря від однієї поверхні до іншої. Широко використовуються пінопласти і поропласти на основі полістиролу, фенолоформальдегідної смоли, каучуку, поліхлорвінілу, кремнійорганічних смол, поліуретану, епоксидної смоли.

В основі технології виготовлення пінопластів і поропластів лежить метод спінювання смол з подальшим їх затвердінням. В результаті утворюється легка маса з великою кількістю пор або бульбашок. Пінопласти мають меншу газо- і водонепроникність, важче ніж поропласти. Застосовуються в якості звукопоглинального, теплоізоляційного матеріалу, в НВЧ пристроях. Усереднені електричні характеристики:

ε = 1,1-1,4; tgδ = 0,0005÷0,01; $\rho_v = 10^{10} - 10^{14}$ Ом см; $E_{пр}$ = 6 - 10 кВ / мм.

Марки поропластов і пінопластів: ПС-1, ПС-254, ПС-5, ПХВ-1, ФФ, ФК-20, К-40, ПУ-101 та інші.

11.4. Волокнисті електроізоляційні матеріали

Діляться на органічні і неорганічні (скловолокно). Органічні волокнисті матеріали бувають природні (папір, картон, лляні, бавовняні тканини, шовкові тканини, нитки) і штучні (віскозний, ацетатний, триацетатний шовк, тканини з капрону, нейлону).

Конденсаторний папір випускається товщиною від 4 до 24 мкм. Кабельний папір має від 80 до 170 мкм, телефонний папір має товщину 90 мкм. Електротехнічні картони випускаються для роботи в трансформаторному маслі і в повітряному середовищі, їх товщина від 0,1 до 3 мм. Електричні властивості:

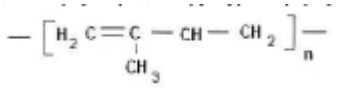
ε = 2,5-3; tgδ = 0,002÷0,03; $\rho_v = 10^9 - 10^{11}$ Ом см; $E_{пр}$ = 8 - 40 кВ / мм.

Випускаються електроізоляційні лаковані трубки - бавовняні або шовкові панчохи, просочені лаками. Бавовняні трубки, просочені бакелітовим лаком, називаються кембріковимі трубками. Їх діаметр від 1 до 12 мм. Просочені лаками тканини називаються лакоткань. Вони використовуються як міжобмоточна і міжслойна ізоляція трансформаторів. Випускаються також ізоляційної стрічки, як тканинні, просочені бітумом, так і хлорвінілові.

12. КАУЧУКОВІ МАТЕРІАЛИ

Основою для створення каучукових матеріалів є натуральні каучуки, синтетичні каучуки. Натуральний каучук (НК) отримують з рослин каучуконосів (дерева тропічних країн, кульбаба). Це аморфний матеріал, вуглеводень, що має склад $[C_5H_{8.}]_n$. При t = 50°С він розм'якшується і стає

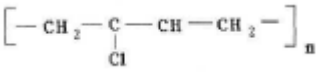
липким, при низьких температурах крихкий, розчиняється у вуглеводах і сірковуглеці структурна формула:



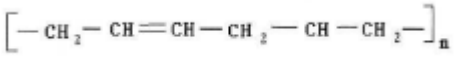
Натуральний каучук - неполярний матеріал.

Синтетичні каучуки (СК) - аморфні речовини, одержувані з спирту та нафти. Поширені бутадієновий каучук (СКБ), неопрен (СКХ), бутадієн - стірольний каучук (СКС), бутадієн - нітрілакрільний каучук (СКН), бутилкаучук (СКБ), поліуретановий каучук, ізопрен каучук (СКІ) та інші.

Бутадієновий каучук виходить полімеризацією газоподібного бутадієну. Він має структурну формулу:



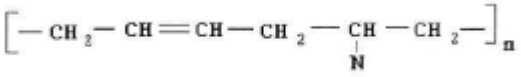
Це полярний матеріал. Володіє невисокими ізоляційні властивостями, не стійкий до дії масел, бензину, озону. Застосовується для виготовлення оболонок кабелів, так як протистоїть тепловому старінню. Бутадієн - стірольний каучук - це сополімер бутадієну і стиролу, за властивостями близький до натурального каучуку. структурна формула:



Чинить опір тепловому старінню.

Бутадієн - нитрилакриловой каучук - сополімер бутадієну і акрил нітрит, полярний матеріал з низькими електроізоляційними властивостями.

Структурна формула:



Набухає в маслі, теплостоек: t = 230 ° С.

Бутилкаучук - сополімер изобутілена і ізопрену або бутадієну. Має високу стійкість до дії кисню і озону, сірчаної та азотної кислот, газопроникність в 10 - 20 разів менше, ніж у НК, еластичність невисока, але зберігається до температур нижче -60 ° С.

Ізопреновий каучук (СКІ) виходить полімеризацією ізопрену, за складом близький до НК, по еластичності перевершує всі каучуки.

Поліуретановий каучук виходить на основі поліуретану і характеризується високою механічною міцністю і малим старінням.

На основі каучуків випускаються наступні діелектрики: гуми, ебоніт, ескапон.

Гуми виходять шляхом вулканізації каучуків, тобто нагрівають їх після введення в них сірки. Сірка зшиває ланцюжки каучуків і робить їх термореактивними. Вулканізація покращує теплостійкість, морозостійкість, підвищує механічну міцність і стійкість до розчинників. При введенні сірки в розмірі 1 - 3% отримують м'яку гуму. Крім каучуку і сірки при виготовленні гуми до складу гумової суміші вводять наповнювачі (тальк, крейда), барвники, каталізатори. Гуми застосовуються для ізоляції проводів, для виготовлення прокладок, амортизаторів. До недоліків гуми відносяться низька теплостійкість, маслостійкість, світлостійкість. При накладенні на мідь з гуми виділяється сірка і з'єднується з міддю. Для усунення цього в каучуки вводять не чисту сірку, а сірчисте з'єднання - тіурам. Якщо в якості наповнювача застосовується сажа, виходить фільтром сажі гума, що володіє низькими електроізоляційними властивостями, високою механічною міцністю, вона світлостійка, не старіє, тому застосовується для виготовлення захисних оболонок шлангів. Усереднені електричні властивості гум:

ε = 3-7; tgδ = 0,02÷0,1; $\rho_v = 10^{15}$ Ом см; $E_{пр}$ = 20 - 30 кВ / мм.

Ебоніт - тверда гума, виходить на основі НК, СКБ, СКС, їх сумішей. Виходить вулканизацией каучуків з додаванням 30 - 35% сірки. Ебоніт добре обробляється і застосовується як ізоляційний і конструкційний матеріал, має

низьку теплостійкість, під дією світла ρ_s різко зменшується завдяки виходу сірки на поверхню. електричні характеристики:

ε = 2,7-3; tgδ = 0,005÷0,08; $\rho_v = 10^{15} - 10^{16}$ Ом см; $E_{пр}$ = 20 - 30 кВ / мм.

Випускається у вигляді плит, трубок, стрижнів. На рисунку 12.1. наведені залежності ε і tgδ гуми і ебоніту від вмісту сірки.

Зростання ε пояснюється посиленням полярних властивостей матеріалу за рахунок атомів сірки. При вмісті сірки понад 15% орієнтація дипольних молекул не може, ε зменшується. Видно, що малим tgδ матеріал володіє при вмісті сірки менше 5% (гума) і більше 25% (ебоніт).

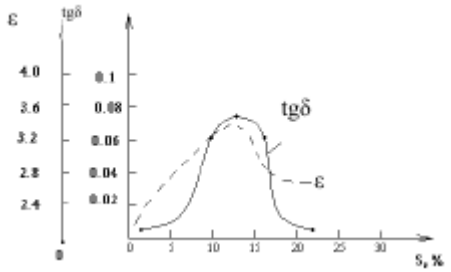


Рисунок 12.1. Залежності ε і tgδ гуми і ебоніту від вмісту сірки

Ескапон виходить вторинною полімеризацією бутадієну каучуку (250 ° С, р = 50 атм., каталізатор). Ескапон не містить сірки. Залежно від ступеня полімеризації виходить м'який або твердий продукт. Твердий ескапон зазвичай світло-коричневого кольору, механічні властивості такі ж, як і у ебоніту, однак після спеціальної обробки його твердість досягає твердості сталі. Нагрівостійкість більше ніж у ебоніту (70 - 130 ° С), кислотостійкість і розчинність в розчинниках середні. Електричні властивості краще, ніж у ебоніту:

ε = 2,7-3; tgδ = 0,0005; $\rho_v = 10^{17}$ Ом см; $E_{пр}$ = 35 - 40 кВ / мм.

Ескапон - неполярний матеріал, застосовується в НВЧ пристроях. М'який ескапон розчиняється в розчинниках, застосовується для

виготовлення ескапонового клею, який використовується при виготовленні лакотканин.

13. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

13.1. Електропровідність напівпровідників

Розрізняють електропровідність власну і домішкову. Власна електропровідність спостерігається у чистих напівпровідниках, домішкова - у напівпровідниках з домішками. Оскільки ширина забороненої зони для напівпровідників відносно велика (<2-3 еВ), то під дією слабкого електричного поля електрони не можуть перейти з заповненої (валентної) зони в зону провідності. Цей перехід електронів може бути здійснений за рахунок теплової енергії, енергії світла, корпускулярного випромінювання. При температурі абсолютного нуля напівпровідник є ізолятором, тому що всі його електрони перебувають в заповненій зоні. При температурі більшій температури абсолютного нуля, середня енергія атомів дорівнює 3/2КТ (К - постійна Больцмана, Т-абсолютна температура). При кімнатній температурі цієї енергії недостатньо, щоб перевести електрони в зону провідності:

3/2КТ=0,04еВ

Однак завжди є деяка кількість атомів, що володіють енергією, більшою ΔЕ, і здатних надати електрону енергію, достатню для виходу в зону провідності

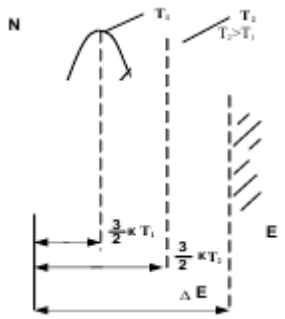


Рисунок 13.1.1. Криві розподілу електронів по енергіях

На рисунку 13.1.1. представлені криві розподілу електронів по енергіях. По осі абсцис відкладені значення енергії теплового руху атомів, по осі ординат число атомів, що володіють цією енергією. Кількість атомів, що мають енергію більше ΔЕ, відповідає заштрихованим областям. З підвищенням температури Т число таких атомів збільшується. Однак, чим

$$n = A \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{3E}{2KT}} \qquad (13.1.1.)$$

де А - коефіцієнт, що дорівнює 10^{16}см$^{-3}$град$^{-3/2}$ для германію і $4 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$град$^{-3/2}$для кремнію. З цієї формули випливає, що при Т = 293К для германію n = 10^{13}см$^{-3}$, для кремнію n = $1{,}27 \cdot 10^{10}$см$^{-3}$.

Особливістю напівпровідників є те, що в створенні електричного струму беруть участь не тільки електрони, а й так звані дірки.

На рисунку 13.1.2 показані зонні діаграми. Для твердих тіл за рахунок взаємного впливу сусідніх атомів один на одного енергетичні рівні розщеплюються на безліч рівнів, які і складають зону провідності і валентну зону. Ширина забороненої зони ΔЕ розташовується між крайніми рівнями валентної зони і зони провідності. Посеред забороненої зони проходить рівень Фермі E_{fc}. Під ним розуміють той рівень, ймовірність заповнення якого дорівнює 1/2. Рівень Фермі являє собою хімічний потенціал, тобто вільну енергію в розрахунку на один електрон, здатний брати участь в створенні провідності. Рівень Фермі визначається з умови сталості кількості електронів в кристалі незалежно від розподілу їх по енергіях.

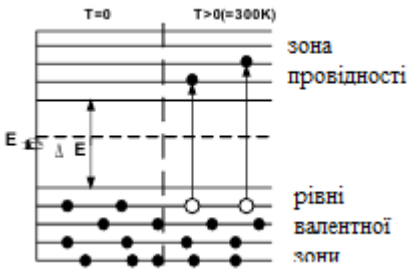


Рисунок 13.1.2. Зонні діаграми

З рисунку 13.1.2. видно, що при T = 0 всі електрони перебувають у валентній зоні. При T> 0 частина електронів переходить в зону провідності. Вільний квантовий стан, який покинув електрон, називають діркою. Цей квантовий стан може бути зайнятий як електронами сусідніх рівнів, так і електронами інших атомів. Дірки поводяться подібно частці з позитивним зарядом, рівним заряду електрона. При приміщенні напівпровідників в електричне поле електрони будуть переміщатися в напрямку, протилежному напрямку напруженості електричного поля, а дірки - в напрямку поля. Загальна провідність

$$\gamma=\gamma_e+\gamma_д=q\mu_n n+q\mu_p p \qquad (13.1.2.)$$

де γ_e - електронна провідність, $\gamma_д$ - діркова провідність, μ_n і μ_p - рухливість електронів і дірок, n і p - концентрації електронів і дірок. У чистому (власному) напівпровідникові

$$n_i=p_i \qquad (13.1.3.)$$

$$\gamma=q\, n_i(\mu_n+\mu_p) \qquad (13.1.4.)$$

У домішковому напівпровідникові знаходяться домішки, які діляться на домішки заміщення і домішки впровадження. Домішки порушують періодичність кристала і утворюють в енергетичному спектрі напівпровідника додаткові рівні, розташовані в забороненій зони, що показано на рисунку 13.1.3.

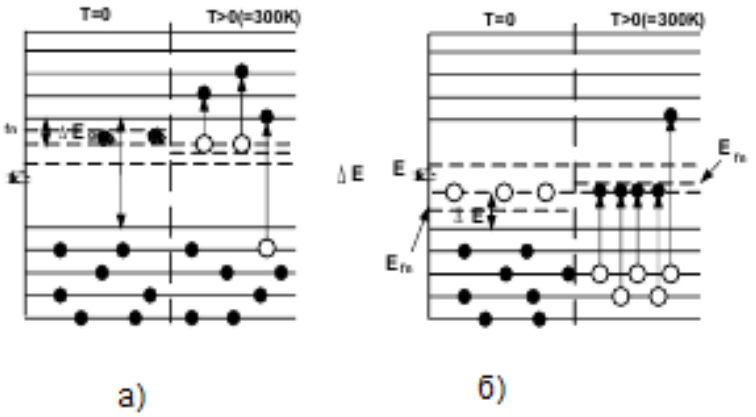


Рисунок 13.1.3. Додаткові рівні, розташовані в забороненій зони в енергетичному спектрі напівпровідника

Домішки, що створюють додаткові рівні поблизу дна зони провідності, називаються донорними (рисунок 13.1.3а), а домішки, що створюють додаткові рівні поблизу стелі валентної зони, називаються акцепторними. E_{fn} - рівень Фермі для примесного напівпровідника. З ростом температури становище E_{fn} змінюється. Для Ge і Si елементи 5 групи таблиці Менделєєва - донорні, 3 групи - акцепторні. У разі наявності донорних домішок теплове перекидання електронів з донорних рівнів в зону провідності більш імовірне, ніж перехід електронів з валентної зони, тому що $\Delta E_д << \Delta E$. При цьому число електронів в зоні провідності більше числа дірок у валентній зоні. Така провідність називається електронною, а напівпровідник - напівпровідником п-типу.

Загальна провідність.

$$\gamma = q\mu_n n_i + q\mu_p p_i + q\mu_n n_n \approx q\mu_n n_n \qquad (13.1.5.)$$

При наявності акцепторних домішок під дією теплового руху перехід електронів з валентної зони на рівні домішок (рисунок 13.1.3б) більш імовірний, ніж перехід електронів у вільну зону. Така провідність називається дірковой, а напівпровідник - напівпроводником р-типу. Загальна провідність

$$\gamma = q\mu_n n_i + q\mu_p p_i + q\mu_p p_n \approx q\mu_p p_n \qquad (13.1.6.)$$

Якщо в напівпровідник вводиться ряд домішок, що створюють донорні або акцепторні рівні, провідність визначається рухливістю і концентрацією надлишкових носіїв заряду, тобто

$$\gamma = q\mu_{над}n_{над} \text{ або } \gamma = q\mu_{над}p_{над} \qquad (13.1.7.)$$

Елементи 5 і 3 груп таблиці Менделєєва є в Ge і Si домішками заміщення. Домішки впровадження також змінюють тип провідності напівпрвідників. Атоми лужних металів (Li, Na, K, Pb, Cs) легко віддають валентні електрони і є донорами.

Атоми металлоїдів зазвичай є акцепторами (O_2). Інші метали можут створювати як донорні, так і акцепторні рівні. Теплові дефекти в Ge і Si можуть створювати два рівня: впровадженний в междоузлие атом діє як донор, а порожній вузол, який залишився, як акцептор.

13.2. Вплив температури на електропровідність напівпровідників

На відміну від металів в напівпровідниках спостерігається сильна залежність концентрації носіїв заряду і їх рухливості від температури, а тому

$$\gamma = q\mu(T)n(T) \qquad (13.2.1.)$$

провідність сильно залежить від температури.

Характер залежності провідності від температури визначається будовою напівпровідників, кількістю і типом домішок, структурними дефектами. Для власного напівпровідника залежність концентрації носіїв заряду від температури має вигляд, показаний на рисунку 13.2.1. Зі збільшенням температури концентрація носіїв заряду зростає. Для домішкового напівпровідника з одним типом домішок залежність концентрації носіїв заряду від температури представлена на рисунку 13.2.2.

Рисунок 13.2.1. Залежність концентрації носіїв заряду від температури для власного напівпровідника

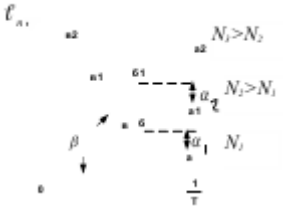


Рисунок 13.2.2. Залежність концентрації носіїв заряду від температури для домішкового напівпровідника

При низьких температурах постачальником носіїв заряду є атоми домішок, тому що вони легше іонізуються ΔЕд <Δ Е - ділянки аб, а1б1, а2б2. На ділянках бв, б1в1, домішкові атоми вже іонізовані, але енергії на вистачає для іонізації власних атомів напівпровідників. Це ділянка виснаження. Нахил ділянки, що визначається іонізацією домішок, залежить від концентрації домішок N_1, N_2, N_3 - з ростом концентрації домішок їхня енергія іонізації зменшується, тому що зменшується відстань між атомами, збільшується їх взаємодія (рисунок 13.2.3.). При дуже високих концентраціях домішок N_3 концентрація носіїв заряду не залежить від температури. Такий напівпровідник називається виродженим.

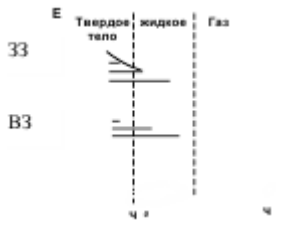


Рисунок 13.2.3. Залежність концентрації носіїв заряду від температури у виродженому напівпровіднику

При високих температурах ионизуються власні атоми напівпровідників, домішковий напівпровідник стає власним. При іонізації атомів домішок виходять або тільки електрони або тільки дірки, а при іонізації власних атомів напівпровідників виходять і електрони, і дірки.

Залежність рухливості носіїв заряду від температури в загальному випадку має вигляд, який показаний на рисунку 13.2.4.

Рисунок 13.2.4. Залежність рухливості носіїв заряду від температури

При низьких температурах відбувається розсіювання носіїв заряду на іонах домішок. З ростом температури відстань між іонами збільшується, рухливість зростає. Потім при високих температурах відбувається розсіювання носіїв заряду на теплових коливаннях атомів в решітці. З ростом температури амплітуда коливань зростає, рухливість падає. Зі збільшенням концентрації домішок рухливість зменшується і максимум в температурної залежності μ зміщується в область більш низьких температур. Рухливість з урахуванням механізму розсіювання представляється у вигляді:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_д} + \frac{1}{\mu_т} \qquad (13.2.2.)$$

де $\mu_д$ - рухливість при розсіянні на іонах домішок, $\mu_т$ - рухливість при розсіянні на теплових коливаннях атомів в решітці. Для атомарних напівпровідників (Si, Ge)

$$\mu_p(T) \approx T^{\frac{3}{2}}, \mu_т(T) \approx T^{\frac{-3}{2}} \quad (13.2.3.)$$

Тогда,

$$\frac{1}{\mu} = a \bullet T^{-\frac{3}{2}} + b \bullet T^{\frac{3}{2}} \quad (13.2.4.)$$

де a і b - коефіцієнти пропорційності.

Ступінь ± 3 / 2- не у всіх напівпровідників (вона може бути від ± 1/2 до ± 3). З урахуванням вище сказаного, графіки залежності провідності від температури для власного та домішкових напівпровідників виходять такими, як показані на рисунку 13.2.5. і 13.2.6.

Рисунок 13.2.5. Графік залежності провідності від температури для власного напівпровідника

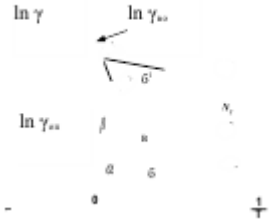


Рисунок 13.2.6. Графік залежності провідності від температури для домішкового напівпровідника

Для власного напівпровідника:

$$\gamma = \gamma_{0в} \bullet e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (13.2.5.)$$

Для домішкового напівпровідника:

$$\gamma = \gamma_{0в} \bullet e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \gamma_{0д} \bullet e^{-\frac{\Delta E_д}{kT}} \quad (13.2.6.)$$

Звідси, як і для діелектриків, енергія іонізації власних атомів $\Delta E = 2 \cdot k \operatorname{tg} \beta$, а енергія іонізації атомів домішок $\Delta E = k \cdot \operatorname{tg}\alpha$.

Таким чином, за графіками залежності γ від Т визначають енергію іонізації атомів домішок і власних атомів напівпровідника.

14. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛ

14.1. Вплив сильного електричного поля на провідність напівпровідників

Закон Ома в диференціальній формі має вигляд:

$$j=\gamma \cdot E \quad (14.1.1.)$$

Закон Ома зберігається, якщо γ не залежить від напруженості поля Е. В загальному випадку

$$\gamma = \sum_{i=1}^{e} q_k \bullet n_k \bullet \mu_k \quad (14.1.2.)$$

тобто, поле впливає на рухливість і концентрацію носіїв заряду. На електрон, що знаходиться в електричному полі, діє сила

$$F=m^* \cdot a \quad (14.1.3.)$$

де m * - маса електрона; а - прискорення.

Так як F=q·E то, прирівнюючи два вирази для сили F, отримаємо, що

$$a = \frac{q \cdot E}{m^*} \qquad (14.1.4.)$$

Додаткова швидкість на довжині вільного пробігу електрона дорівнює

$$\Delta V = \frac{1}{2} a \bullet \tau \qquad (14.1.5.)$$

де τ - час вільного пробігу електрона. З огляду на статистичний розподіл електронів за швидкостями, середня швидкість електрона дорівнює

$$\Delta V = \frac{q \cdot E \cdot \tau}{m^*} \qquad (14.1.6.)$$

тоді рухливість

$$\mu = \frac{\Delta V}{E} = \frac{q \cdot \tau}{m^*} = \frac{q}{m^*} \bullet \frac{l}{V_{абс}} \qquad (14.1.7.)$$

де l - довжина вільного пробігу, $V_{абс}$ - абсолютна швидкість електрона.

Поле впливає на l і $V_{абс}$, причому ступінь і характер впливу залежить від механізму розсіювання електронів, який в свою чергу, залежить від температури. При слабких полях l і $V_{абс}$ змінюється незначно і μ постійна. При сильних полях, якщо носії заряду розсіюються на теплових коливаннях атомів решітки (високі тематури), l не залежить від E, а $V_{абс}$ зростає. Тоді μ падає. Якщо при сильних полях носії розсіюються на іонах домішок (низькі температури), то l зростає швидше, ніж $V_{абс}$, μ зростає. Залежність μ від E для германію приведена на рисунку 14.1.1.

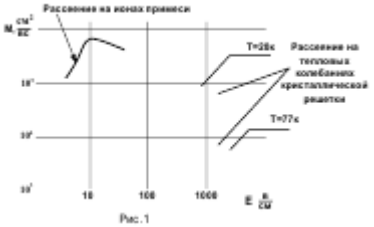


Рисунок 14.1.1. Залежність μ від E для германію

Напруженість поля, при якому стає помітним зміна μ і, отже, порушується закон Ома, називається критичною ($E_{кр}$). У напівпровідників з великою μ помітна зміна $V_{абс}$ і l з ростом поля проявляється раніше, ніж у напівпровідників з малою рухливістю. Отже, $E_{кр}$ буде тим менше, чим вище рухливість.

Для германію:

$$\mu_p = 1900\frac{см^2}{В{\cdot}с},\ E_{кр} = 1400\frac{В}{см},\ \mu_n = 3900\frac{см^2}{В{\cdot}с},\ E_{кр} = 800\frac{В}{см}$$

Для кремнію:

$$\mu_p = 500\frac{см^2}{В{\cdot}с},\ E_{кр} = 7500\frac{В}{см},\ \mu_n = 1200\frac{см^2}{В{\cdot}с},\ E_{кр} = 2800\frac{В}{см}$$

Залежність j від E для германію представлена на рисунку 14.1.2.

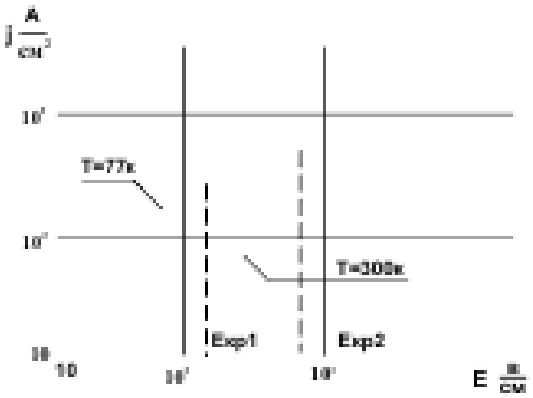


Рисунок 14.1.2. Залежність j від E для германію

Незважаючи на те, що при E> 10^3 В/см концентрація носіїв заряду зростає, μ падає сильніше, тому зростання j зі збільшенням E сповільнюється. Причиною зміни концентрації є термоелектронна іонізація, ударна іонізація, електростатична іонізація, ефект Штарка. Дія термоелектронної іонізації, полягає в тому, що електричне поле полегшує перехід електронів в зону провідності за рахунок теплової енергії. Дія ударної іонізації полягає в порушенні вільних електронів, які отримали на ділянці вільного пробігу

велику енергію від поля, пов'язаного електрона домішкового атома або атома основної решітки. Дія електростатичної іонізації пов'язана з тим, що електричне поле нахиляє рівні валентної зони і зони провідності (рисунок 14.1.3), електрони віддають перевагу горизонтальному переходу 2 і 2 і вертикальному переходу 1 і 1'.

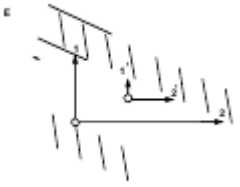


Рисунок 14.1.3. Дія електростатичної іонізації

Ефект Штарка пов'язаний зі зменшенням ширини забороненої зони в сильному електричному полі при високих концентраціях домішок, коли напівпровідник вироджений. Для більшості напівпровідників залежність γ від Е визначається зростанням концентрації носіїв заряду зі збільшенням Е і залежність від Е має вигляд, показаний на рисунку14.1.4.

Рисунок 14.1.4. Залежність γ від Е для більшості напівпровідників

При цьому,

$$\mathrm{E}_{\text{кр1}} = 10 - 10^4 \frac{\text{В}}{\text{см}},\ \mathrm{E}_{\text{кр2}} = 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}},\ \mathrm{E}_{\text{кр3}} > 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

14.2. Вплив корпускулярних опромінень на електропровідність напівпровідників

При бомбардуванні напівпровідника потоками електронів, нейтронів, протонів їх електропровідність змінюється з чотирьох причин:

- корпускулярне опромінення іонізує атоми, внаслідок чого концентрація носіїв струму збільшується, провідність зростає. Після припинення опромінення провідність швидко зменшується;

- під дією частинок, що бомбардують, відбувається зміщення впорядкування розташованих атомів (іонів), внаслідок чого в кристалічній решітки утворюються стабільні дефекти двох типів: вакансії та атоми (іони), які впроваджуються в міждоузлие (дефект по Френкелю); ці дефекти, як і хімічні домішки, змінюють енергетичний спектр напівпровідника, що веде до зміни рівноважної концентрації носіїв струму, що створюється термічним збудженням;

- під дією корпускулярного опромінення відбуваються різноактивні перетворення, в результаті яких в напівпровіднику з'являються стабільні атоми або іони таких елементів, які були відсутні в напівпровіднику.

Цей процес рівносильний введенню в напівпровідник хімічних домішок.

- дефекти решітки і домішки постійних елементів, що створюються корпускулярним опроміненням, знижують рухливість, якщо при даній температурі вона визначається розсіяним носієм на домішкових центрах.

Ступінь і характер впливу цих факторів на провідність напівпровідника визначається його будовою, температурою, енергією облучающих частинок часом опромінення.

При опроміненні електронами з енергією менше 0,55 МеВ, провідність Ge n і p-типу зростає і падає з припиненням опромінення за 10^{-3} с. При енергії електронів 1 МеВ зміна провідності по-різному для германію n і p-типу.

Германій n-типу спочатку зменшує провідність, а потім з плином часу опромінення збільшує її до значення, що перевищує початкову провідність, причому германій n-типу перетворюється в германій p-типу. У германію

р-типу провідність весь час зростає. Це говорить про те, що дефекти створені опроміненням, мають акцепторний характер.

При опроміненні нейтронами в германии з'являються атоми гелію - акцептори, миш'яку - донори, селену (нейтральний). Атомів гелію утворюється більше, тому вплив на германій нейтронів таке ж, як і вплив електронів. При опроміненні кремнію швидкими нейтронами провідність його падає.

Для кожного напівпровідника є своя причина зміни провідності.

14.3. Вплив деформації напівпровідників на їх провідність

Деформація напівпровідника позначається на їх провідності з наступних причин:

- змінюється міжатомна відстань, що призводить до зміни енергії активації власних і домішкових атомів, зміни ефективної маси електронів і дірок; це може призводити до зміни концентрації носіїв заряду і провідності;

- при зміні міжатомних відстаней змінюється амплітуда теплових коливань атомів решітки, змінюється довжина вільного пробігу носіїв заряду а, отже, рухливість, може змінитися ефективна маса носіїв заряду.

Для напівпровідника основну роль грає фактор зміни енергії активації, що веде до зміни концентрації носіїв заряду. Тому зі збільшенням тиску провідність може як зростати, так і падати, причому цей ефект залежить від орієнтації кристала, типу провідністі напівпровідника.

Для германію n і р-типів, кремнію n-типу провідність зростає при розтягуванні по осі (100), а для кремнію р-типу - падає. При розтягуванні по осі (110) у германію та кремнію n-типу провідність зростає, а у германію та кремнію р-типу - зменшується. При всебічному стиску під дією тиску 30 1/см^2 у германію n- типу провідність зменшується в 4,5 рази, у германії

р-типу зростає на кілька відсотків. У кремнію n-типу - зростає в 2 рази, у кремнію р-типу - зростає в 600 разів.

Для оцінки зміни питомого опору напівпровідника вводиться поняття тензочувствительности α_ρ, причому

$$\alpha_\rho = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \qquad (14.3.1.)$$

14.4. Вплив світла на провідність напівпровідників

Напівпровідники поглинають енергію світлового потоку, причому існує два види поглинання - фотоелектрично активно і фотоелектрично неактивно. У першому випадку виникає внутрішній фотоефект, у другому випадку утворюється екситон.

Внутрішній фотоефект полягає в збільшенні концентрації вільних носіїв заряду в напівпровіднику за рахунок енергії світла і виникає, коли енергія світла перевищує ширину забороненої зони, тобто $h\nu > \Delta E$ - для власного напівпровідника, $h\nu > \Delta E_д$ - для домішкового напівпровідника. Тут h - частота, ν - постійна Планка.

Енергія видимого спектру лежить в межах 1,6 - 3,1 еВ, причому) ($\nu = (4 - 8)10^{14}$ 1/с. Енергія 1,6 еВ відповідає червоному кольору; 3,1 еВ - фіолетовому.

Залежності фотоструму $I_ф$ і коефіцієнта поглинання світла К від довжини хвилі наведені на рисунку 14.4.1.

Рисунок 14.4.1. Залежності фотоструму $I_ф$ і коефіцієнта поглинання світла К від довжини хвилі

При великих λ енергії мало, щоб іонізувати атоми напівпровідника. Зі зменшенням λ збільшується енергія, $I_ф$ зростає. В області фіолетового спектру $I_ф$ падає внаслідок збільшення коефіцієнта поглинання, тобто енергія поглинається тільки тонким поверхневим шаром напівпровідника. Підвищення концентрації носіїв заряду біля поверхні викликає посилену рекомбінацію (ефект Суля). Іноді посилена рекомбінація поширюється вглиб напівпровідника внаслідок дифузії носія заряду, що може привести до того, що загальна провідність напівпровідника при опроміненні буде не збільшуватися, а зменшуватися.

Зі збільшенням освітленості L провідність напівпровідника збільшується, як показано на рисунку 14.4.2. Ділянка насичення пов'язана з тим, що майже всі атоми вже іонізовані.

Внутрішній фотоефект виникає у напівпровідників з ε> 4.

Рисунок 14.4.2. Залежність провідності напівпровідника від освітленості L

Фотоелектричне неактивне поглинання світла полягає в тому, що під дією світла атом переходить в збуджений стан, зване ексітоном. Екситони хаотично мігрують по напівпровідника. Наявність екситонів не змінює провідність напівпровідника. Зовнішнє електричне поле не змінює хаотичного руху екситонів. Однак в кристалі можуть існувати умови, що призводять до загибелі екситона. Наприклад, при зіткненні екситона з домішковим центром їм іншим дефектом структури екситон може «лопнути». Замість нього з'являється вільні носії заряду - електрони і дірка. Виникає

фотопровідність, при цьому збуджений атом забирає енергію з решітки. При зіткненні з домішковим центром екситон може і зникнути з передачею енергії кристалічній решітці.

15. ЕФЕКТИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ

15.1. Ефект Ганна

Ефект Ганна пов'язаний зі зміною рухливості вільних носіїв заряду μ під дією сильного електричного поля. Він спостерігається у напівпровідників, що мають два мінімуму в зоні провідності, наприклад, у GaAs (рисунок 15.1.1)

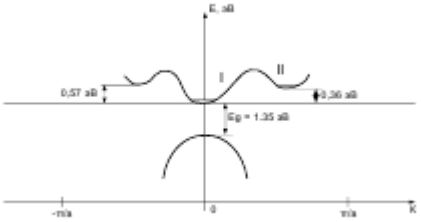


Рисунок 15.1.1. Ефект Ганна у GaAs

На рисунку 15.1.1. к - хвильовий вектор, а - параметр решітки. У мінімумі I μ_n в 25-30 разів вище, ніж в мінімумі II. При сильному зовнішньому електричному полі енергія електронів першого мінімуму підвищується настільки, що виявляється можливим їх перехід у другій мінімум. В результаті провідність γ ($\gamma = n \bullet q \bullet \mu_n$) зменшується і щільність струму j ($j = E \bullet \gamma$) падає. На вольтамперної характеристиці (ВАХ) з'являється ділянка негативного диференціального опору (рисунок 15.1.2).

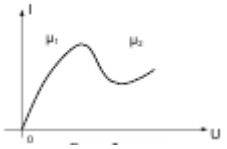


Рисунок 15.1.2. Вольтамперна характеристика GaAs

ВАХ N-образна. Якщо такий діод включити в резонансну систему (відрізок хвилеводу), то в ньому виникають незгасаючі електричні коливання.

При товщині відрізка d = 100 мкм генеруюча частота f = 1 ГГц, а при d = 2 мкм f = 30 ГГц.

15.2. Фотолюмінісценція

Якщо тіло нагріти до високої температури, воно починає світитися, тобто випускати світлову енергію з довжиною хвилі, яка визначається температурою, будовою і складом тіла. Випускання світла, яке не потребує нагрівання тіла, називається люмінесценцією.

Відомо кілька видів люмінесценції. Якщо речовина світиться при зниженні його температури - термолюмінесценція. Розріджені гази при проходженні через них електричного струму світяться - електролюмінесценція. Деякі речовини світяться при хімічної реакції, наприклад, жовтий фосфор, окислюючись. Це хемілюмінесценція. Деякі речовини світяться при їх деформації - тріболюмінесценція, при бомбардуванні їх електронами - катодолюмінесценція, при опроміненні α-частинками - радіолюмінесценція, при опроміненні рентгенівськими променями - рентгенолюмінесценція, під дією світлового потоку -фотолюмінесценція.

Розрізняють флуоресценцию і фосфоресценцію. Якщо процес світіння триває протягом менш 10^{-6}с після впливу світла - флуоресценція, якщо більш 10^{-6}с (10^{-5}- 10^{-4}с) - фосфоресценція.

Фотолюмінесцірующіе речовини - напівпровідникові з'єднання з введеними в них спеціальними домішками - активаторами. Якщо на поверхню флуоресціюючої речовини падає фотон з енергією hν, то він поглинається атомами активатора, в результаті чого електрон з рівня активатора А переходить в зону провідності (рисунок 15.2.1, перехід 1). Виникає внутрішній фотоефект. Фотоелектрон вільно блукає всередині

кристала, може зустрітися з іншими іонами активатора, відбувається рекомбінація, тобто електрон із зони провідності переходить на рівень активатора (рисунок 15.2.1, перехід 2). При цьому випускається фотон світла. Процес активації електронів і їх рекомбінації відбувається дуже швидко, тому час післясвітіння менше 10^{-6}с.

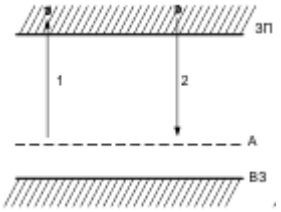


Рисунок 15.2.1. Виникнення внутрішнього фотоефекта

При фосфоресценції в речовині крім рівнів активаторів існують і рівні пасток - центрів захоплення (рисунок 15.2.2). Фосфоресценція зумовлена великою кількістю електронних переходів. При опроміненні тіла фотонами з енергією hν атом активатора поглинає фотон і викидає електрон в зону провідності (рисунок 15.2.2, перехід 1). Виникає внутрішній фотоефект, електрон блукає всередині кристалу. Його може захопити пастка (рисунок 15.2.2, перехід 2), рівень якого знаходиться трохи нижче дна зони провідності. В такому стані електрон не може рекомбінувати з іоном активатора. Його звільнення з пастки можливо при витраті енергії за рахунок тепла або інфрачервоного опромінення. Електрон знову потрапляє в зону провідності (рисунок 15.2.2, перехід 3). Далі електрон може бути знову захоплений пасткою і, врешті-решт, рекомбинувати (рисунок 15.2.2, перехід 4) з випромінюванням фотона. Так як електрон блукає, час світіння більше.

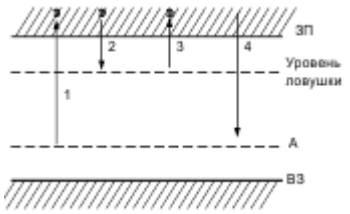


Рисунок 15.2.2. Схема виникнення внутрішнього фотоефекта

Відповідно до закону Стокса довжина хвилі світла, що випускається речовиною, більше довжини хвилі світла, що падає на речовину (рисунок 15.2.3.).

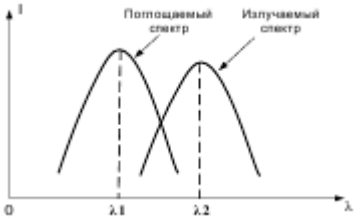


Рисунок 15.2.3. Ілюстрація дії закону Стокса

Це випливає з формул

$$E = h \bullet \nu = h \bullet c/\lambda, \qquad (15.2.1.)$$

$$E_{випр} < E_{погл}. \qquad (15.2.2.)$$

Останній вираз пов'язано з тим, що частина енергії поглинається квантами і переходить в тепло. Квантовий вихід $\eta = E_{випр}/E_{погл} < 1$. Наприклад, у GaS + Bi $\eta = 0{,}97$.

Вводячи в напівпровідник відповідні домішки, можна змінювати спектр світіння. У ZnS + Cu, Mn, Sn, Se спостерігається фосфоресценція, у ZnS + As, Ni, Cu, Cd спостерігається флуоресценція.

Найбільшого поширення набули люмінофори: сульфіди (ZnS, CdS, Ca, SrS, MgS, BaS), оксиди (CaO, SrO, MgO, BaO), вольфрамати ($CaWO_4$, $CdWO_4$, $MgWO_4$), з'єднання $ZnSiO_4$, $CdSiO_3$, CaB_2O_4, ZnB_2O_4, $MgSiO_3$. Активаторами служать метали.

15.3. Рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках

У власному напівпровіднику число дірок дорівнює числу електронів, таким чином $n_i = p_i$, причому n_i і p_i залежать від температури.

У домішковому напівпровіднику, якщо концентрація домішкових атомів перевищує концентрацію власних носіїв заряду при даній температурі, характер електропровідності визначається типом введеної домішки. При донорної домішке провідність електронна, при акцепторной домішке - діркова. Для напівпровідників з електронною провідністю електрони є основними носіями заряду, а дірки - неосновними, для напівпровідника з дірковой провідністю - навпаки. У напівпровіднику даного типу провідності завжди знаходиться певна кількість неосновних носіїв заряду, причому $n_p = n_i \bullet p_i = n_i^2$. Цей вираз називається законом діючих мас. Це є умова рівноваги між процесами генерації і рекомбінації носіїв заряду в домішковому напівпровіднике. Значить, знаючи концентрацію основних носіїв заряду в напівпровіднику і концентрацію власних носіїв заряду, можна визначити концентрацію неосновних носіїв заряду. Концентрації n і p, знайдені з умови рівноваги, називаються рівноважними концентраціями і зазвичай пишуться як n_0 і p_0.

Дія більшості напівпровідникових приладів засноване на введенні в напівпровідник неосновних носіїв заряду. Їх концентрація називається нерівноважною і з плином часу в результаті процесу рекомбінації прагне до рівноважної. Нерівноважні носії заряду можуть вводитися инжекцией, впливом світла і іншими способами.

Відомо три види рекомбінації електронів і дірок:

1) безпосередня рекомбінація;

2) рекомбінація через пастки - центр рекомбінації;

3) поверхнева рекомбінація.

При рекомбінації, як і при генерації носіїв заряду, дотримуються закони збереження енергії.

Безпосередня рекомбінація полягає в переході електронів із зони провідності в валентну зону. Причому можлива радіаційна і безізлучательная рекомбінації. При випромінювальної рекомбінації енергія електрона і дірки

випускається у вигляді світла (фотонів), при безізлучательном - у вигляді тепла (фононів). Імовірність безпосередній рекомбінації дуже мала.

Рекомбінація через пастки в переважній більшості випадків відіграє вирішальну роль. Пастками називаються локальні енергетичні рівні в забороненій зоні напівпровідника. Ці рівні утворюються різними недосконалостями кристалічної структури, тобто атомами домішки, дислокаціями, порожніми вузлами в решітці і так далі. При рекомбінації через пастку електрон із зони провідності спочатку потрапляє на рівень пастки, а потім можливі два випадки:

1) електрон назад викидається в зону провідності;

2) електрон далі звалюється в валентну зону після рекомбінації з діркою; причому спочатку може з'явитися в пастці дірка, а потім електрон або навпаки.

Викид електрона з рівня пастки назад в зону провідності може відбутися за рахунок теплових флуктуацій, якщо рівень пастки лежить ближче до дна зони провідності, ніж до стелі валентної зони. В цьому випадку захоплення пасткою електрона більш імовірний, ніж захоплення дірки і електрон буде або довго чекати свого «партнера», або повернеться в зону провідності. Якщо зворотний викид електрона в зону провідності з рівня пастки більш імовірний, ніж рекомбінація, то такі рівні називаються центрами прилипання, якщо більш імовірна рекомбінація - центрами рекомбінації. Рекомбінація електронів через пастки більш імовірна, ніж безпосередня, з наступних причин: енергія рекомбінації при цьому розбивається на дві частини, кожна з яких менше, ніж при безпосередній рекомбінації.

Концентрація нерівноважних носіїв заряду за рахунок рекомбінації зменшується згідно із законом:

$$n - n_0 = (n_н - n_0)e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (15.3.1.)$$

де $n_н$ - нерівноважна концентрація в момент введення надлишкових носіїв заряду, t - поточний час, τ - час життя, тобто час, протягом якого концентрація нерівноважних носіїв заряду зменшується в е раз.

Час життя залежить від концентрації домішок, температури, структури напівпровідника. Якщо напівпровідник полікристалічний, то межі його мікрокристалів утворюють своєрідні дефекти решітки, що веде до зменшення τ. Для виготовлення транзисторів використовуються монокристали. Зі збільшенням концентрації домішок в напівпровіднику τ зменшується, так як домішкові атоми грають роль пастки, разом з корисною домішкою потрапляють і шкідливі, атоми яких дають пастки.

Таким чином, чим більше γ (більше $N_а$ або $N_д$), тим менше τ (рисунок 15.3.1) .

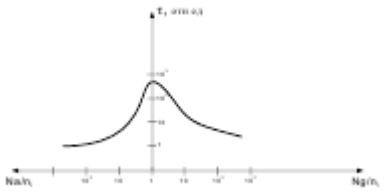


Рисунок 15.3.1. Залежність τ від γ власного напівпровідника

Власний напівпровідник має мінімальну τ. Компенсований напівпровідник ($N_а = N_д$, n = p) має менший τ, ніж власний. При підвищенні температури τ зростає (рисунок 15.3.2.), так як пастки більш інтенсивно заповнюються носіями заряду, які очікували рекомбінації, в зв'язку з чим пастки значну частку часу виявляються зайнятими. Поверхнева рекомбінація відбувається на поверхні зразка, де є велика кількість дефектів решітки, адсорбованих атомів газів, волога, оксиди і так далі. Тому на поверхні напівпровідника створюється велика кількість пасток, що призводять до посиленої рекомбінації. Поверхнева рекомбінація характерезуется швидкістю поверхневої рекомбінації S, вимірюваної в см/с. Вона є складною функцією геометрії зразка, стану його поверхні, рухливості носіїв. Фізично швидкість

поверхневої рекомбінації являє собою середню швидкість носіїв заряду, з якої вони рухаються до поверхні, де рекомбинируют.

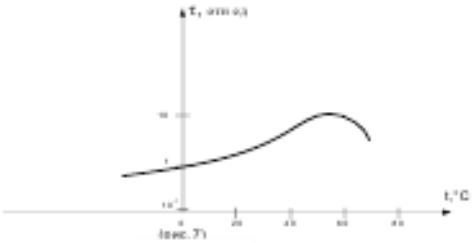


Рисунок 15.3.2. Залежність τ від γ компенсованого напівпровідника

Хімічно оброблені зразки германію та кремнію мають S = (10-100) см/с, при механічній обробці S = (10^4-10^5) см/с.

Щільність струму неосновних носіїв заряду в зразку n-типу, пов'язана з поверхневою рекомбінацією

$$j_p=q\cdot S(p-p_0) \qquad (15.3.2.)$$

Для зразка p-типу

$$j_n=q\cdot S(n-n_0) \qquad (15.3.3.)$$

Якщо поверхнева рекомбінація істотна, то ефективний час життя знаходиться зі співвідношення

$$\frac{1}{\tau_{еф}}=\frac{1}{\tau_V}+\frac{1}{\tau_S} \qquad (15.3.4.)$$

де τ_v - час життя в обсязі напівпровідника; τ_S - час життя поблизу поверхні напівпровідника.

Роль поверхневої рекомбінації зростає зі зменшенням обсягу зразка.

Таким чином, концентрація нерівноважних носіїв заряду зменшується згідно із законом

$$n-n_0=(n_н-n_0)e^{-\frac{t}{\tau_{еф}}} \qquad (15.3.5.)$$

Швидкість убування нерівноважних носіїв заряду

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\tau_{еф} \bullet (n_н - n_0) e^{-\frac{t}{\tau_{еф}}}} = -\frac{n - n_0}{\tau_{еф}} \qquad (15.3.6.)$$

Тут $n/\tau_{еф}$ - швидкість рекомбінації, $n_0/\tau_{еф}$ - швидкість генерації.

15.4. Закони руху носіїв заряду в напівпровіднику

При вивченні властивостей напівпровідникових приладів важливо знати закони розподілу щільності струму в просторі і в часі. Розглянемо найпростіший одномірний випадок, тобто коли носії заряду рухаються уздовж однієї осі (рисунок 15.4.1). У загальному випадку рух носіїв заряду в напівпровіднику обумовлено двома процесами: дифузії під дією градієнта концентрації і дрейфом під дією градієнта потенціалу електричного поля. Повна щільність струму:

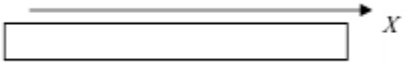


Рисунок 15.4.1. Рух носіїв заряду уздовж однієї осі

$$j = j_{p\ диф} + j_{p\ др} + j_{n\ диф} + j_{n\ др} + j_{зм} \qquad (15.4.1.)$$

Відповідно до закону Фіка дифузійні щільності струму:

$$j_p = -\ qDp\frac{\partial p}{\partial x};\ \text{і}\ \ j_n = +\ qDp\frac{\partial n}{\partial x} \qquad (15.4.2.)$$

Знак «-» в $j_{p\ диф}$ означає, що напрямок струму протилежно градієнту. У $j_{n\ диф}$ стоїть знак «+», так як заряд електронів q від'ємний. Струм зміщення $j_{зм}$ не пов'язаний з рухом носіїв заряду, а тільки з поляризацією матеріалу в електричному полі, $j_{зм} = \varepsilon\frac{\partial E}{\partial t}$ має значення лише на надвисоких частотах, тому їм зазвичай нехтують.

Тут D_n і D_p - коефіцієнти дифузії, що залежать від матеріалу. Коефіцієнти дифузії пов'язані з рухливостями носіїв заряду співвідношенням Ейнштейна:

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p,\ D_n = \frac{kT}{q}\mu_n \qquad (15.4.3.)$$

Ці співвідношення випливають з умови рівності дрейфовий і дифузійних густин струму в p-n-переході.

Коефіцієнти дифузії пов'язані з часом життя носіїв заряду наступними співвідношеннями:

$$D_p = \frac{L_p^2}{\tau_p},\ D_n = \frac{L_n^2}{\tau_n} \qquad (15.4.4.)$$

де L_p і L_n - дифузійні довжини, тобто відстані, які встигають пройти носії, коли за рахунок рекомбінації їх концентрація зменшується в е раз (тобто за час життя).

Дрейфові щільності струму описуються законом Ома в диференціальній формі:

$$j_{p\,др} = \gamma E = qp\mu_p E\ ,\quad j_{n\,др} = qn\mu_n E \qquad (15.4.5.)$$

Тогда

$$j = -\ qDp\frac{\partial p}{\partial x} + qp\mu_p E + qDn\frac{\partial n}{\partial x} + qn\mu_n E \qquad (15.4.6.)$$

Для визначення щільності струму необхідно знати розподіл концентрацій носіїв заряду і напруженості поля, яка, в свою чергу, залежить від розподілу концентрацій.

В одновимірному випадку p і n залежать від двох змінних: координати x і часу t. Функції p (x, t) і n (x, t) є рішеннями рівняння безперервності:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau} - \frac{1}{q}\bullet\frac{\partial j_p}{\partial x},\qquad \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau} + \frac{1}{q}\bullet\frac{\partial j_n}{\partial x}$$

(15.4.7.)

Підставляючи сюди вирази для j_p і j_n, отримаємо:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau} + D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - p\mu_p\frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E\frac{\partial p}{\partial x} \qquad (15.4.8.)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau} + D_n\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - n\mu_n\frac{\partial E}{\partial x} - \mu_n E\frac{\partial n}{\partial x} \qquad (15.4.9.)$$

Вплив зовнішніх факторів в цих висловлюваннях не враховано.

Якщо електричне поле відсутнє, то

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau} + D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \qquad (15.4.10.)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau} + D_n\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \qquad (15.4.11.)$$

Ці рівняння називаються дифузійними рівняннями безперервності. Рівняння безперервності використовуються при аналізі руху неосновних носіїв заряду в напівпровіднику. Якщо рух неосновних носіїв заряду в напівпровіднику відсутня, але в ньому є заряди, що створюють електричну індукцію D, то

$$\mathrm{div}D = Q, \qquad (15.4.12.)$$

де Q - об'ємна щільність зарядів.

Так як $D = \varepsilon_{абс} E$, то

$$divE = \frac{Q}{\varepsilon_{абс}}, \qquad (15.4.13.)$$

$$\varepsilon_{абс} = \varepsilon_{відн} \bullet \varepsilon_0 \qquad (15.4.14.)$$

тут Q = qN, де N - число зарядів в одиниці об'єму,

$$N = (p + N_d - n - N_a) \qquad (15.4.15.)$$

Тогда

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}(p + N_d - n - N_a) \qquad (15.4.16.)$$

Це рівняння називається рівнянням Пуассона. При

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 0 \qquad (15.4.17.)$$

воно переходить в рівняння Лапласа.

Література:

1. Тареев Б. М., Короткова Н. В., Петров В. М., Преображенский А. А.. Электрорадиоматериалы / Под ред. Б. М. Тареева. — М: Высшая школа, 1978. — 336 с.

2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. – М: Высшая школа. - 1980— 406 с.

3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергия. – 1977 - 352 с

4. Харин А.Н., Дьякова А.П. Материалы электронной техники. Таганрог: ТРТУ. – 1977 (№212)

7. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. - М.: Машиностроение, 1982. - 528 с.

8. Никулин Н.В. Электроматериаловедение. – М.: Высшая школа. , 1984 – 175 с.

9. Пасынков В.В., Сорокин О.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа. – 1986 - 366 с.

10. Савровский Д.С., Головня В.Г. Конструкционные материалы и их обработка. М.: Высшая школа. – 1976 - 328 с.

11. Галактионова Н.А., Бойчук И.Ф., Демина Н.И., Иванов В.К., Румянцев А.В. Конструкционные материалы и их обработка. – М.: Металлургия. - 1975. — 394 с.

12. Кнорозов Б.В. и др. Технология металлов. – М.: Металлургия. – 1978-904с.

13. Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы. – М.: Энергия. - 1976 -368с.

14. Курносов А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа. – 1986 – 328 с.

Навчальне видання

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ»

(*для здобувачів вищої освіти спеціальностей 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,171 «Електроніка»,153 «Мікро- та наносистемна техніка»*)

(*електронне видання*)

Укладач:

Ж.Г. САМОЙЛОВА

Оригінал-макет Ж.*Г. Самойлова*

Підписано до друку 10.03.2016.
Формат 60х84 $^{1}/_{16}$. Папір типогр. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. ___. Обл.-вид. арк.___.
Тираж ___ екз. Вид. № ___. Замов. № . Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.
Адреса університета: просп. Центральний, 59-А
м. Сєвєродонецьк, 93400, Україна
e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.