

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерний навчально-науковий інститут**

**А.О. Ніконова, З.А. Ніконова, О.Ю.Небеснюк**

**МАТЕРІАЛИ ТА КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

Методичні рекомендації до лабораторних робіт  
для здобувачів вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка»  
освітньо-професійної програми  
«Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено  
Вченою радою ЗНУ  
Протокол № 11 від 23.06 2021

Запоріжжя

2021

УДК 621.38

НЗ77

Ніконова А.О., Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Матеріали та компоненти електронної техніки: методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»: ЗНУ, 2021. 58с.

Методичні рекомендації до лабораторних робіт розроблено для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка». Запропоновані завдання призначені для освоєння теоретичного матеріалу, опанування навичок розв'язання практичних задач, виконання самостійних завдань.

Рецензент

*В.Л. Коваленко*, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та енергоефективності

Відповідальний за випуск

*Т.В. Критська*, доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем

## Зміст

Вступ	4
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ.....	5
1 Лабораторна робота №1 Дослідження температурної залежності електричного опору провідників .....	18
2 Лабораторна робота №2 Дослідження температурної залежності електричного опору напівпровідників .....	23
3 Лабораторна робота №3 Дослідження діелектричної проникності діелектриків .....	29
4 Лабораторна робота № 4 Дослідження діелектричних втрат діелектриків .....	31
5 Лабораторна робота № 5 Випробування лінійних резисторів .....	34
6 Лабораторна робота № 6 Випробування варістора .....	38
6 Лабораторна робота № 7 Дослідження параметрів сегнетоелектриків .....	43
6 Лабораторна робота № 8 Піроелектрики. Дослідження властивостей.....	58
ЛІТЕРАТУРА.....	34

## ВСТУП

Методичні рекомендації «Матеріали та компоненти електронної техніки» розроблені для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»

**Метою** викладання навчальної дисципліни «Матеріали та компоненти електронної техніки» є надання студентам поглиблених уявлень властивостей матеріалів та компонентів електронної техніки

Основними **завданнями** викладання дисципліни «Матеріали та компоненти електронної техніки» є надання студентам знань фізичних властивостей та експлуатаційних параметрів сучасних матеріалів, що використовуються при виготовленні мікро- та наноелектроніки та компонентів електронних пристроїв

Вивчення навчальної дисципліни забезпечує набуття студентами наступних загальних та спеціальних компетентностей:

- здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, під час професійної діяльності у галузі мікро- та наносистемної техніки, або у процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів автоматизації та електроніки;
- здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.
- здатність розв'язувати інженерні задачі в галузі мікро- та наносистемної техніки з урахуванням всіх аспектів розробки, проектування, виробництва, експлуатації та модернізації.
- здатність розуміти та застосовувати технологічні принципи виробництва, випробування, експлуатації та ремонту мікро- та наносистемної техніки та біомедичного обладнання.
- здатність використовувати знання з оптичної аналогової та цифрової схемотехніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та геліоелектроніки

## 1 Загальні відомості про матеріали електроніки та їх класифікація

### *Види хімічного зв'язку*

Основними елементарними частинками, з яких побудовані всі відомі нам речовини, є протони, нейтрони й електрони. Із протонів і нейтронів складаються атомні ядра; електрони заповнюють оболонки атома, компенсуючи позитивний заряд ядра.

Гази, рідкі й тверді тіла можуть складатися з атомів, молекул або іонів. При зближенні атомів до відстані порядку декількох ангстрем між ними проявляються сили взаємодії. Залежно від характеру руху електронів у сусідніх атомах ці сили можуть бути силами відштовхування або притягання. Електрони внутрішніх повністю заповнених оболонок міцно пов'язані з ядром і не беруть участь в утворенні хімічних зв'язків. Хімічні властивості атомів визначаються будовою зовнішньої, не повністю заповненої електронами, оболонки. Електрони, що перебувають у зовнішній оболонці, називають валентними.

Розрізняють кілька видів хімічного зв'язку.

**Гомеоплярним (ковалентним)** називають зв'язок, що утворюється в речовині шляхом об'єднання атомів у молекулу або кристал за рахунок електронів, які стають загальними для пар атомів.

Гомеоплярні зв'язки певним чином орієнтовані в просторі й утворюються тільки між найближчими сусідніми атомами.

Молекули з гомеоплярним зв'язком, у яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, називають неполярними. Якщо ж у молекулах центри протилежних за знаком зарядів не збігаються й перебувають на деякій відстані один від одного, то такі молекули називають полярними або дипольними (рис. 1.1).

Дипольна молекула характеризується дипольним моментом  $p$ , що визначається добутком заряду  $e$  на відстань між центрами позитивних і негативних зарядів  $l$ :  $p = e \cdot l$ . Заряд електрона  $e \approx 2 \cdot 10^{-19}$  Кл, відстань  $l \sim 10^{-10}$  м. Тому звичайно дипольні моменти молекул  $p = 5 \cdot 10^{-29} \dots 10^{-30}$  Кл·м.

Гомеоплярний зв'язок є типовим для органічних молекул і спостерігається також у твердих речовинах неорганічного походження, якщо

їх кристалічна решітка складається з атомів. Прикладами подібних речовин є алмаз, кремній, германій, карбід кремнію (SiC) та інші.

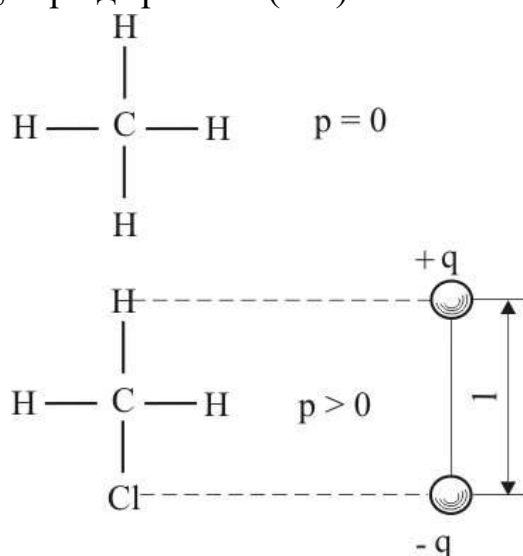


Рисунок 1.1 - Приклади неполярної (симетричної) і полярної (несиметричної) молекул

В структурі алмазу (рис. 1.2) кожний атом утворює по чотири ковалентні зв'язки зі своїми найближчими сусідами.

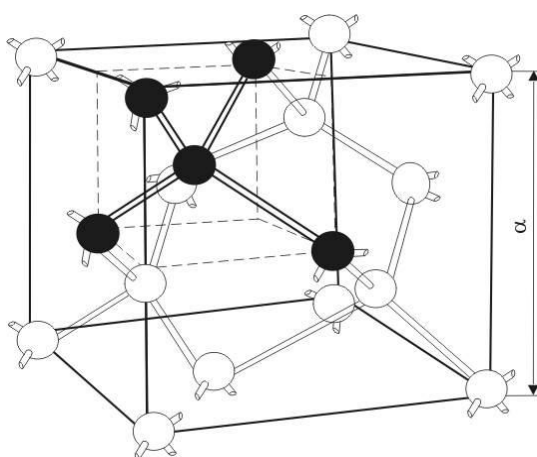
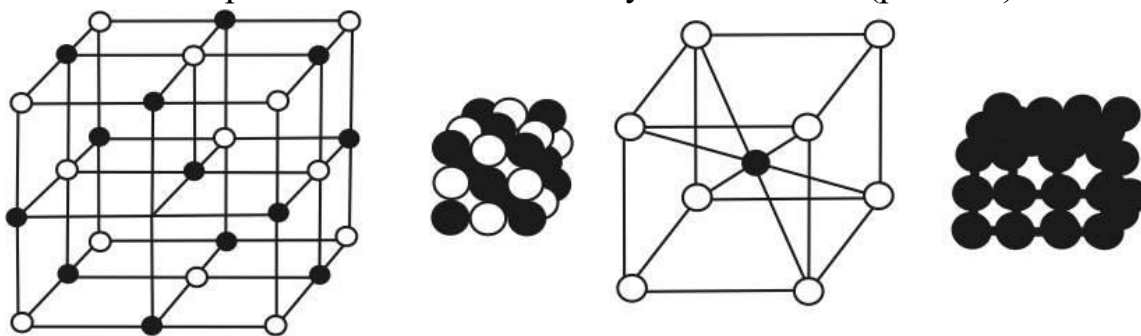


Рисунок 1.2 - Структура алмазу (германію, кремнію)

Ковалентний зв'язок характеризується високою міцністю, внаслідок чого такі речовини як алмаз, кремній та карбід кремнію характеризуються високою твердістю та високою температурою плавлення.

**Гетерополярним (іонним)** називають зв'язок, що виникає внаслідок переходу валентних електронів від металевого атома до металоїдного і електростатичного притягання різнойменно заряджених іонів.

Цей вид хімічного зв'язку реалізується в іонних кристалах. Типовим прикладом іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів (рис. 1.3).



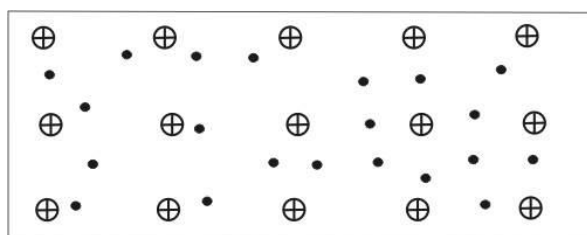
а - хлористий натрій;

б - хлористий цезій

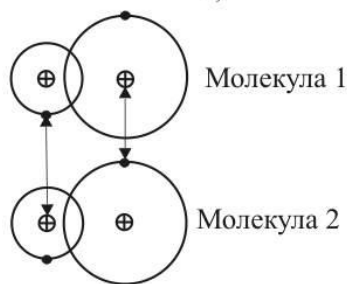
Рисунок 1.3 - Структура іонних кристалів

Іонні решітки характеризуються високим координаційним числом, яке показує кількість найближчих іонів протилежного знака. Наприклад, для кристалів NaCl координаційне число дорівнює 6, а для кристалів CsCl - 8. Весь монокристал іонної сполуки можна вважати однією гігантською молекулою, у якій кожний іон відчуває сильний вплив з боку всіх сусідніх частинок.

**Металевий зв'язок** існує в системах, побудованих як остов з позитивних іонів, що перебувають у середовищі вільних колективізованих електронів (рис. 1.4,а), яке називають електронним газом.



а)



б)

а - схема будови металевого кристалу;

б – схема утворення міжмолекулярного зв'язку Ван-дер-Ваальса

Рисунок 1.4 – Схеми міжатомних зв'язків

Притягання між позитивно зарядженим остовом й електронами обумовлює цілісність металу. В утворенні колективу вільних електронів беруть участь усі атоми кристала, причому електрони не локалізуються поблизу своїх атомів, а вільно переміщуються усередині всього об'єму решітки, утворюючи «електронний газ».

Не маючи локалізованих зв'язків, металеві кристали (на відміну від іонних) не руйнуються при зміні положень атомів, тобто їм властива пластичність (ковкість) при деформаціях. Завдяки наявності вільних електронів метали мають високі електро- і теплопровідність.

**Молекулярний зв'язок, або зв'язок Ван-дер-Ваальса**, спостерігається в речовинах з ковалентним характером внутрішньо-молекулярної взаємодії. Наявність притягання між молекулами в цьому випадку можливо при погодженому русі валентних електронів у сусідніх молекулах (рис. 1.4,б).

Зв'язок Ван-дер-Ваальса є найбільш універсальним, але й найбільш слабким зв'язком, енергія якого приблизно на два порядки нижче енергій іонного або ковалентного зв'язків. Тому молекулярні кристали мають низькі температури плавлення (наприклад, у парафіну  $T_{пл} = 50...52^{\circ}C$ ).

### *Будова твердих тіл*

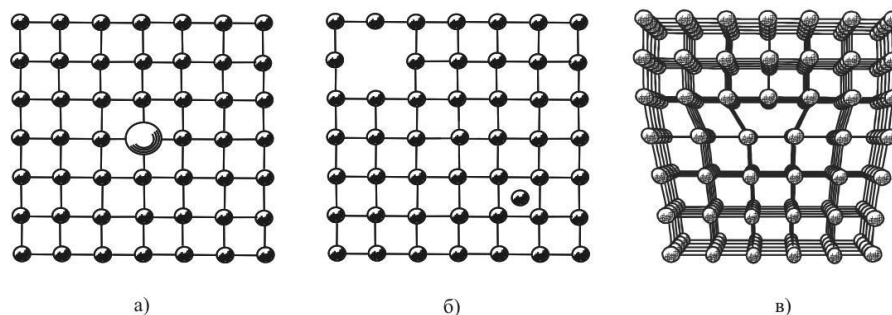
Більшість матеріалів електроніки є твердими тілами.

**Кристали** – це тверді тіла, в яких частинки (атоми, іони або молекули) розподілені в просторі періодично, утворюючи кристалічну решітку. Періодичність структури обумовлює періодичне потенційне поле кристалів.

**Дефекти в будові кристалічних тіл.** Кристалів з ідеально правильною будовою в природі не існує. У реальних умовах завжди спостерігаються ті або інші відхилення від регулярного розташування частинок. Такі відхилення прийнято називати дефектами структури. Їх умовно підрозділяють на динамічні (тимчасові) і статичні (постійні). Динамічні дефекти виникають при механічних, теплових або електромагнітних впливах на кристал, при проходженні через нього потоку частинок високої енергії й т.п. Найпоширенішим видом динамічних дефектів є фонони - тимчасові порушення регулярності решітки, викликані тепловим рухом атомів.

Серед статичних дефектів розрізняють атомні (точкові) і протяжні недосконалості структури. Атомні дефекти можуть проявлятися у вигляді незайнятих вузлів решітки (**вакансій**), у вигляді зміщення атома з вузла в міжвузлове положення (рис. 1.5,б), у вигляді впровадження в решітку чужорідного атома або іона (рис. 1.5,а).





а - сторонній атом у вузлі решітки; б - порожній вузол (вакансія); в - перспективне зображення розташування атомів біля крайової дислокації

Рисунок 1.5 - Дефекти кристалічної решітки

До протяжних дефектів відносяться дислокації, дефекти укладки, границі зерен або двійників, пори, тріщини, мікрովключення іншої фази. Слово «дислокація» у перекладі означає «зміщення». Найпростішими видами дислокацій є крайова (рис. 1.5, в) й гвинтова дислокації. Хоча відносна концентрація атомних дефектів може бути невеликою, але вони можуть призводити до величезних змін фізичних властивостей кристала. Наприклад, тисячні частки атомного відсотка деяких домішок можуть змінювати електричний опір чистих напівпровідникових кристалів в  $10^5 \dots 10^6$  разів. Протяжні дефекти структури впливають на механічні властивості кристалів.

**Поліморфізм.** Деякі тверді речовини здатні утворювати не одну, а дві й більше кристалічних структур, що є стійкими при різних температурах і тисках. Таку властивість матеріалів називають поліморфізмом, а кристалічні структури, що відповідають їм, називають поліморфними формами або алотропними модифікаціями речовини. Поліморфізм широко розповсюджений серед матеріалів і має важливе значення для їхньої обробки й експлуатації.

Практичний інтерес має поліморфізм вуглецю – існування його у вигляді алмазу (див. рис. 1.2), який є напівпровідниковим матеріалом, та графіту, який є провідниковим матеріалом. У звичайних умовах графіт є більш стійкою модифікацією, ніж алмаз. Однак при підвищенні тиску стійкість алмазу зростає, а графіту падає, і при досить високих тисках алмаз стає більше стійким. Якщо при цьому підвищити температуру, щоб збільшити рухливість атомів, то графіт можна перевести в алмаз. На цьому принципі засноване виготовлення штучних алмазів. Синтез проводять під тиском порядку  $10^{10}$  Па при температурі на рівні  $2000^\circ\text{C}$ . Виготовлені в такий спосіб штучні алмази мають більш високу міцність і твердість, ніж природні кристали.

**Скло та аморфні тіла.** Кристалічний стан більшості твердих тіл є природним, тому що вільна енергія при впорядкованому розташуванні атомів

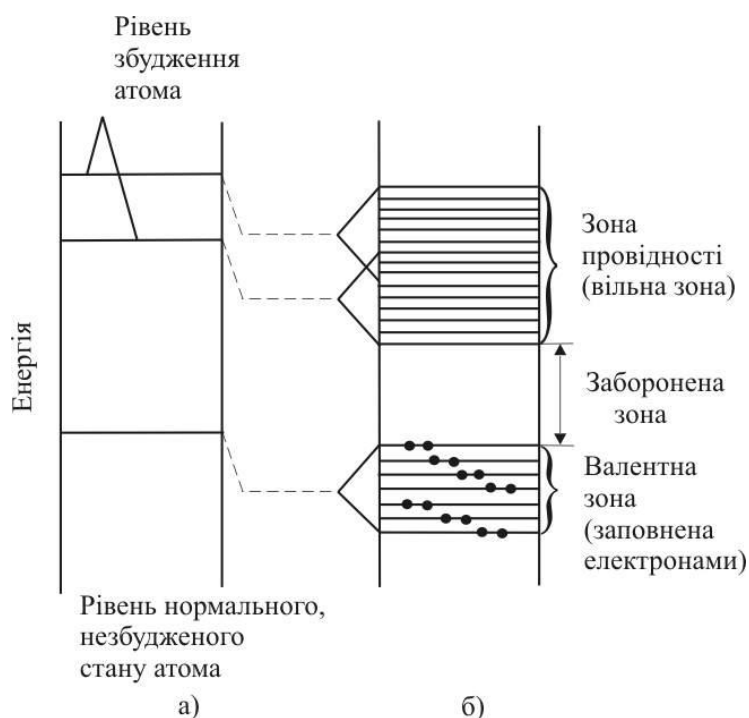
мінімальна. Однак через різке зменшення швидкості дифузії атомів при охолодженні розташовуванню затвердіння в процесі затвердіння можуть утворюватися тіла з випадковим хаотичним розташуванням частинок, які називають аморфними. На відміну від кристалів аморфні тіла ізотропні за властивостями, не мають певної температури плавлення й характеризуються досить широким температурним інтервалом розм'якшення. Прикладом аморфних речовин є скло й різноманітні пластики. Склоподібний стан характеризується дуже високою в'язкістю, що й обмежує дифузійну активність атомів і перешкоджає утворенню кристалічної фази. Однак такий стан є термодинамічно нестійким. Тому при відпалі може відбуватися «розсклювання» матеріалу, тобто перехід у більш стійкий кристалічний стан.

### *Елементи зонної теорії твердого тіла*

Зонна теорія твердого тіла - це теорія валентних електронів, що рухаються в періодичному потенційному полі кристалічної решітки.

Окремі атоми мають дискретний енергетичний спектр, тобто електрони можуть займати лише цілком певні енергетичні рівні. Частина цих рівнів заповнена при нормальному, не збудженому, стані атома. На інших рівнях електрони можуть перебувати тільки тоді, коли на атом діє зовнішній енергетичний вплив, тобто коли він збуджений (рис. 1.6,а).

Якщо атоми знаходяться на достатньо великих відстанях один від одного (наприклад, газоподібна речовина), то взаємодія між атомами практично відсутня і енергетичні рівні електронів залишаються без змін. При утворенні кристалічної решітки всі наявні електронні рівні (як заповнені електронами, так і незаповнені) зміщуються внаслідок взаємодії сусідніх атомів. В результаті дискретні енергетичні рівні ізольованого атома розщеплюються в енергетичні зони (рис. 1.6,б).



а - відокремлений атом; б - неметалічне тверде тіло

Рисунок 1.6 - Енергетичні діаграми при абсолютному нулі температури

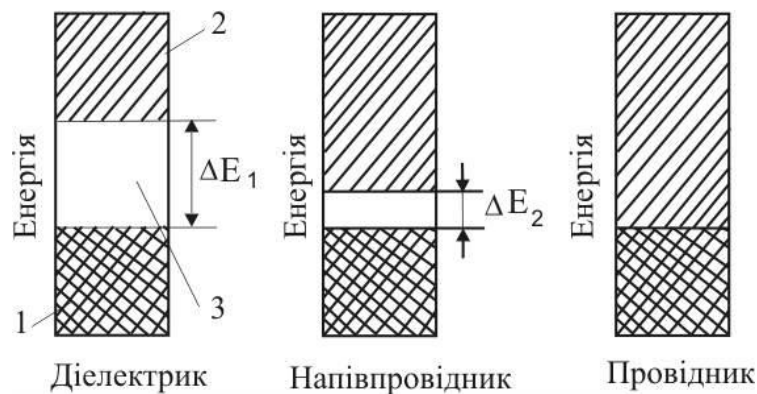
Завдяки обмінній взаємодії електрони можуть без зміни енергії за допомогою обміну переходити від одного атома до іншого, тобто переміщуватися по кристалу.

**Енергетичні зони.** Обмінна взаємодія має чисто квантову природу і є наслідком нерозрізненності електронів. Дозволені енергетичні зони розділені забороненими інтервалами енергії. Ширина дозволених енергетичних зон не залежить від розмірів кристала, а визначається лише природою атомів, що утворюють тверде тіло, і симетрією кристалічної решітки. Кількість енергетичних рівнів в зоні визначається числом атомів, що входять до твердого тіла. А це значить, що в кристалі кінцевих розмірів відстань між рівнями зворотно пропорційна числу атомів. У кристалі об'ємом в  $1 \text{ см}^3$  міститься  $10^{22} \dots 10^{23}$  атомів, а рівні в зоні відстоять один від одного по енергії на  $10^{-22} \dots 10^{-23}$  еВ, тобто енергетична зона характеризується квазібезперервним спектром. Мізерно малого енергетичного впливу досить, щоб викликати перехід електронів з одного рівня на іншій, якщо там є вільні стани.

**Розподіл електронів.** Відповідно до принципу Паулі в кожному атомному стані може перебувати не більше одного електрона. Тому число електронних станів у зоні виявляється кінцевим і дорівнює числу відповідних атомних станів. Кінцевим виявляється й число електронів, що заповнюють дану енергетичну зону. Енергетичні зони можуть бути повністю заповненими, частково заповненими й вільними. Внутрішні оболонки в ізольованих атомах

заповнені, тому відповідні їм зони також виявляються заповненими. Найверхню із заповнених електронами зон називають валентною (див. рис. 1.6,б). Ця зона відповідає енергетичним рівням електронів зовнішньої оболонки в ізольованих атомах. Найближчу до неї вільну, незаповнену електронами, зону називають зоною провідності. Взаємне положення цих двох зон визначає більшість процесів, що відбуваються у твердому тілі.

**Висновки зонної теорії.** Характер енергетичного спектра провідників, напівпровідників і діелектриків істотно різний. У металевих провідниках валентна зона заповнена не повністю або перекривається із зоною провідності (рис. 1.7). У напівпровідниках і діелектриках зона провідності й валентна зона розділені енергетичним зазором, названим забороненою зоною.



1 – заповнена електронами зона; 2 – зона вільних енергетичних рівнів;  
3 – заборонена зона шириною  $\Delta E$

Рисунок 1.7 – Схема енергетичних зон твердих тіл

Електрони валентної зони мають практично однакову свободу руху у всіх твердих тілах незалежно від того, чи є вони металами або діелектриками. Рух здійснюється шляхом тунельного переходу електронів від атома до атома. Зовнішнє електричне поле порушує симетрію в розподілі електронів за швидкостями, прискорюючи електрони, що рухаються в напрямку діючих електричних сил, і сповільнюючи частинки із протилежно спрямованим імпульсом. Однак прискорення або уповільнення пов'язане зі зміною енергії електронів, що повинно супроводжуватися переходом їх у нові квантові стани. Такі переходи можуть здійснюватися лише за умови наявності в енергетичній зоні вільних рівнів. Додаткова енергія, що здобувається електронами на довжині вільного пробігу під дією електричного поля, дорівнює  $10^{-8} \dots 10^{-4}$  eV, тобто набагато перевершує відстань між підрівнями в зоні.

У металах, де зона не повністю укомплектована електронами, навіть слабке поле надає електронам достатній імпульс для їхнього переходу на

прилегли вільні рівні. Тому метали є хорошими провідниками електричного струму при будь-якій температурі.

У напівпровідниках і діелектриках при температурі 0 К всі електрони перебувають у валентній зоні, і вона є повністю заповненою (див. рис. 1.7,б). Електрони зони не можуть приймати участі в створенні електричного струму. Зона провідності абсолютно вільна. Для появи електропровідності необхідно частину електронів перевести з валентної зони в зону провідності. Енергії електричного поля (за винятком дуже сильних полів, коли починається електричний пробій) не достатньо для здійснення такого переходу, потрібно більш сильний енергетичний вплив, наприклад, нагрівання твердого тіла.

Теплова енергія нерівномірно розподіляється між частинками. У кожний момент часу є невелике число атомів, у яких амплітуда й енергія теплових коливань значно перевищують середнє значення. У процесі теплових коливань атоми можуть передати електронам частину теплової енергії. В результаті деякі з електронів можуть перейти з валентної зони в зону провідності. Чим вище температура й вужче заборонена зона, тим вище інтенсивність міжзонних переходів. У діелектриків заборонена зона настільки велика, що електронна електропровідність в них не відіграє визначальної ролі.

При кожному акті переходу електронів у зону провідності з'являються вільні енергетичні рівні валентної зони, називані «дірками». При наявності дірок електрони валентної зони можуть здійснювати естафетні переходи з рівня на рівень. У електричному полі дірка рухається протилежно руху електрона, тобто поводить як деяка квазічастинка з позитивним зарядом. Таким чином, дірки забезпечують участь валентних електронів у процесі електропровідності.

Процес переходу електронів у вільний стан супроводжується й зворотним явищем, тобто поверненням електронів у нормальний стан. У результаті в речовині при будь-якій температурі встановлюється динамічна рівновага, тобто кількість електронів, що переходять у вільну зону, стає рівною кількості електронів, що повертаються назад у валентну зону. З підвищенням температури число вільних електронів у напівпровіднику зростає, а зі зниженням температури до абсолютного нуля - зменшується аж до нуля.

Виходить, речовина, що при одних температурах поводить як ізолятор, при інших, більш високих, здобуває провідність. Розходження між провідностями двох типів матеріалів (металів і неметалів) є найбільш значним при температурах, що наближаються до абсолютного нуля; розходження ж між двома класами неметалів (напівпровідниками й діелектриками) зникає при наближенні температури до абсолютного нуля.

Енергію, необхідну напівпровіднику або діелектрику для переходу електрона у вільний стан чи для утворення дірки, може дати не тільки тепло, але й інші джерела енергії, наприклад, поглинена матеріалом енергія світла, потоку електронів або ядерних частинок, енергія електричних полів, механічна енергія й т.інш. Збільшення ж числа вільних електронів або дірок під впливом якого-небудь виду енергії сприяє підвищенню електропровідності, збільшенню струму, появі електрорушійних сил в напівпровіднику або діелектрику.

Домішки й точкові дефекти, що порушують періодичність структури, створюють особливі енергетичні рівні, які розташовуються в забороненій зоні ідеального кристала. Якщо домішкові атоми або дефекти розташовані досить далеко один від одного, то взаємодія між ними відсутня, а відповідні їм енергетичні рівні є дискретними і локалізованими в певному місці решітки, тобто на дефекті структури. При високій концентрації домішкових атомів відстані між ними стають порівняними з розмірами атомів, електронні оболонки найближчих атомів домішки перекриваються, їх дискретні енергетичні рівні розщеплюються в енергетичну зону домішкових станів, здатну забезпечити провідність, якщо не всі рівні в цій зоні заповнені електронами.

Підбиваючи підсумок, варто підкреслити, що зонна теорія строго застосовна тільки до твердих тіл з ковалентними або металевими зв'язками.

### *Класифікація матеріалів електроніки*

Матеріали, використовувані в електроніці, підрозділяють на електротехнічні, конструкційні й спеціального призначення (рис. 1.8).

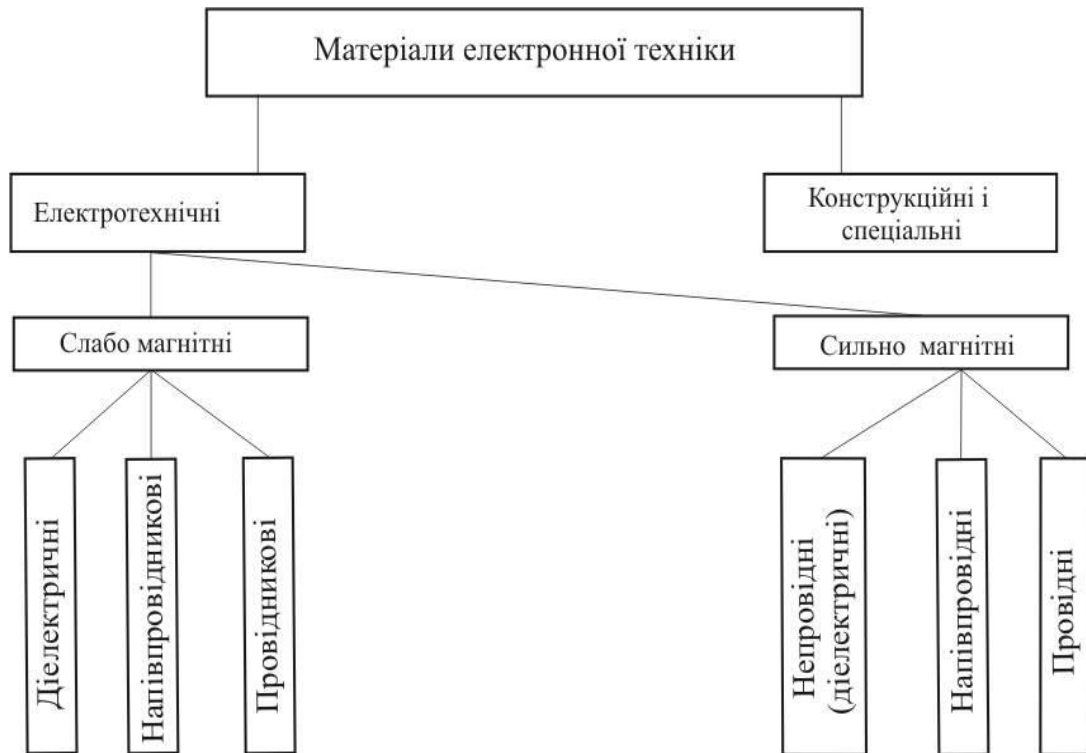


Рисунок 1.8 - Класифікація матеріалів електроніки

Електротехнічними називають матеріали, що мають певні властивості стосовно електромагнітного поля й застосовувані в техніці з урахуванням цих властивостей.

Практично всі матеріали піддаються впливам як окремо електричних або магнітних полів, так і їхньої сукупності. За поведінням в магнітному полі електротехнічні матеріали підрозділяють на сильномагнітні (магнетики) і слабомагнітні. Перші знайшли особливо широке застосування в техніці завдяки їхнім магнітним властивостям. Більшість електротехнічних матеріалів можна віднести до слабомагнітних або практично немагнітних.

За поведінням в електричному полі матеріали підрозділяють на провідникові, напівпровідникові й діелектричні.

**Провідниковими** матеріалами I роду називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є провідність вільних електронів. Їхнє застосування в техніці обумовлено в основному високою питомою електричною провідністю при нормальній температурі.

Умовно до провідників відносять матеріали з питомим електричним опором  $\rho \leq 10^{-5}$  Ом·м. Хорошими провідниками електричного струму є метали. Зі 105 хімічних елементів лише 25 є неметалами.

**Напівпровідниковими** називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є електронно-діркова провідність.

Напівпровідники за величиною питомої провідності є проміжними між провідниковими й діелектричними матеріалами. Питомий опір напівпровідників залежно від будови й хімічного складу матеріалів, а також від умов їхньої експлуатації може змінюватися в межах  $10^{-5} \dots 10^8$  Ом·м, однак питомий опір деяких напівпровідників може бути великим і навіть більшим, ніж у широко застосовуваних діелектриків. Характерною властивістю напівпровідників є сильна залежність питомої провідності від концентрації й виду домішок або різних дефектів, а також у більшості випадків - від зовнішніх енергетичних впливів (температури, освітленості й т.інш.).

**Діелектричними** називають матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є іонна провідність. До діелектриків відносять матеріали, у яких  $\rho > 10^8$  Ом·м.

Чітку границю між значеннями питомого опору різних класів матеріалів провести досить складно. Наприклад, діелектрики при сильному нагріванні можуть проявляти властивості напівпровідників. Однак для металів провідний стан є основним, а для напівпровідників і діелектриків - збудженим.

При застосуванні діелектриків досить чітко визначилася необхідність використання як пасивних, так і активних властивостей цих матеріалів. Електроізоляційними (пасивними) називають діелектрики, які не допускають витоку електричних зарядів, тобто з їхньою допомогою відокремлюють електричні ланцюги один від одного або струмоведучі частини пристроїв, приладів і апаратів від провідних, але не струмоведучих частин (від корпусу, від землі). Активними (керованими) діелектриками є сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики, електролюмінофори, матеріали для випромінювачів і затворів у лазерній техніці, електрети та інші.



## Питання для самоперевірки

1. Які основні види хімічного зв'язку є в матеріалах і чим вони обумовлені?
2. У чому розходження між монокристалами, полікристалічними й аморфними речовинами?
3. Наведіть приклади точкових і протяжних дефектів структури в реальних кристалах.
4. Що таке поліморфізм? Наведіть приклади поліморфних речовин.
5. Чому при утворенні твердого тіла енергетичні рівні атомів розщеплюються в енергетичні зони?
6. Від чого залежить ширина дозволеної зони й число рівнів у ній?
8. Чим розрізняються зонні структури провідника, напівпровідника й діелектрика та в чому розходження механізмів їхньої електропровідності?
9. Які характерні властивості напівпровідників суттєво відрізняють їх від провідників і діелектриків?
10. Наведіть загальну класифікацію матеріалів, використовуваних в електронній техніці.
11. Які матеріали називають електротехнічними?
12. Як підрозділяють матеріали за їх поведінкою в електричному полі?
13. Як підрозділяють матеріали за їх поведінкою в магнітному полі?
14. Які матеріали називають провідниками, а які - напівпровідниками?
15. Які матеріали називають діелектриками?
16. Які матеріали вважають пасивними, а які - активними діелектриками?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### *Дослідження температурної*

### *залежності електричного опору провідників*

Мета роботи - виміряти температурну залежність електричного опору провідника. Визначити температурні коефіцієнти опору та питомого опору провідникового матеріалу.

### 1.1 Короткі теоретичні відомості

До провідників першого роду відносять матеріали, переважаючим механізмом провідності в яких є провідність вільних електронів. Провідниками першого роду є метали, їх сплави та деякі модифікації вуглецю. Відповідно до електронної теорії металів концентрація вільних електронів в однократно іонізованому металі дорівнює концентрації атомів. Середня кінетична енергія електронів лінійно зростає з підвищенням температури. Під дією зовнішнього електричного поля хаотичний рух електронів здобуває спрямованість. У провіднику виникає спрямований рух електронів, тобто виникає електричний струм.

В слабких і середніх електричних полях провідність металів визначається законом Ома, згідно з яким питома провідність ( $\gamma$ )

$$\gamma = 1/\rho = env/E, \quad (1.1)$$

де  $\rho$  - питомий опір, Ом·м;  $e$  - заряд електрона, Кл;  $n$  - концентрація електронів, м<sup>-3</sup>;  $v$  - швидкість дрейфу носіїв заряду, м<sup>2</sup>/В·с;  $E$  - напруженість електричного поля, В/м.

Електрони при спрямованому русі, зіштовхуючись із вузлами кристалічної решітки, втрачають швидкість, і кінетична енергія їх передається решітці. Перенос електричного заряду в металах вільними електронами призводить до вирівнювання їхньої температури. Електронна теплопровідність, завдяки високій концентрації вільних електронів, переважає над іншими механізмами теплопередачі.

Підвищення температури не призводить до істотних змін концентрації електронів, тому провідність визначається в основному середньою довжиною вільного пробігу електрона.

Оцінити зміну електропровідності металів можна за допомогою температурного коефіцієнта питомого опору (ТКО)  $\alpha_R$  – відносною зміною опору  $R$  зразка матеріалу при зміні температури навколишнього середовища  $T$  на 1 °С:

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \cdot \quad (1.2)$$

ТКО може змінюватися в інтервалі температур. В області лінійної залежності електричного опору від температури

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha_p(T - T_0)],$$

де  $\rho_0$  і  $\alpha_p$  - питомий опір і температурний коефіцієнт опору при  $T_0$ , температурний коефіцієнт опору  $\alpha_R$  і температурний коефіцієнт питомого опору

$$\alpha_p = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(T_2 - T_1)} \quad (1.3)$$

пов'язані з температурним коефіцієнтом лінійного розширення матеріалу  $\alpha_l$  співвідношенням

$$\alpha_l = \alpha_p - \alpha_R, \quad (1.4)$$

тому що  $\rho$  залежить від геометричних розмірів зразка (площі перетину  $S$  та довжини  $l$ ) за формулою  $\rho = RS/l$ .

Величину коефіцієнта лінійного розширення деяких металів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Температурний коефіцієнт лінійного розширення металів

Метал	Мідь	Нікель	Константан	Манганін
$\alpha_l \times 10^6, K^{-1}$	16	13	30	30

У зв'язку з тим, що розсіювання електронів у металі відбуваються не тільки на теплових коливаннях вузлів кристалічної решітки, але й на дефектах кристалічної решітки, що порушують періодичність потенційного поля кристала, то у випадку сплавів значення залишкового питомого опору  $\rho_{зал}$  залежить і від складу сплаву.

Для визначення температурного коефіцієнта питомого опору  $\alpha_p$  його представляють так:

$$\alpha_p = \alpha_R + \alpha_l \quad (1.5)$$

де  $\alpha_R$  - температурний коефіцієнт опору зразка матеріалу,  $K^{-1}$ ;

$\alpha_l$  - температурний коефіцієнт розширення матеріалу,  $K^{-1}$ .

## 1.2 Стенд для экспериментального дослідження

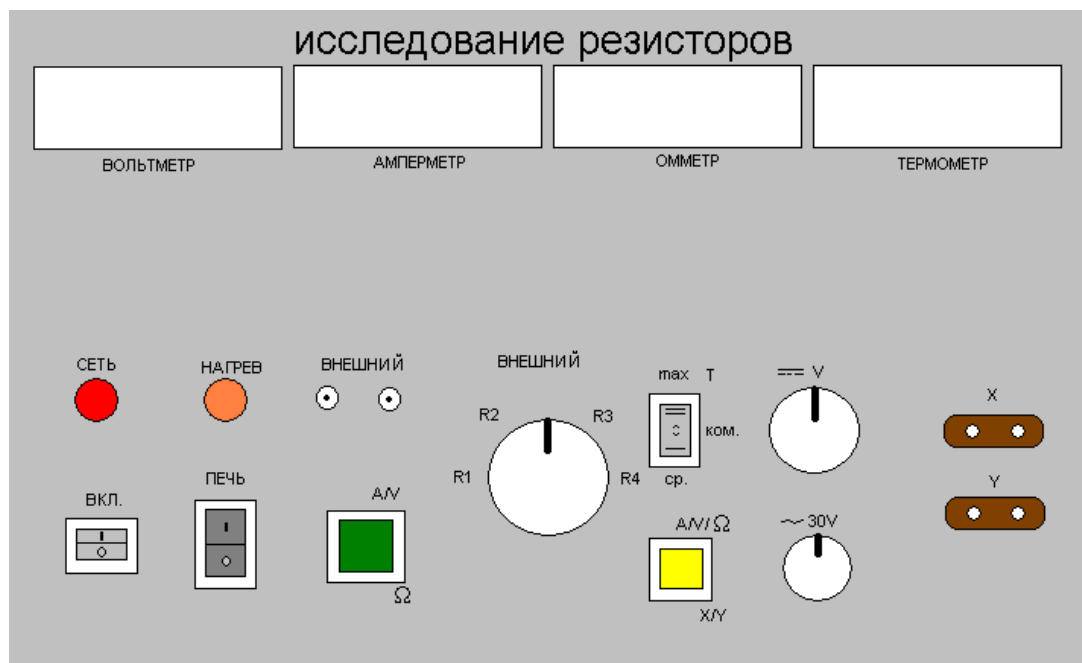


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд експериментального стенду

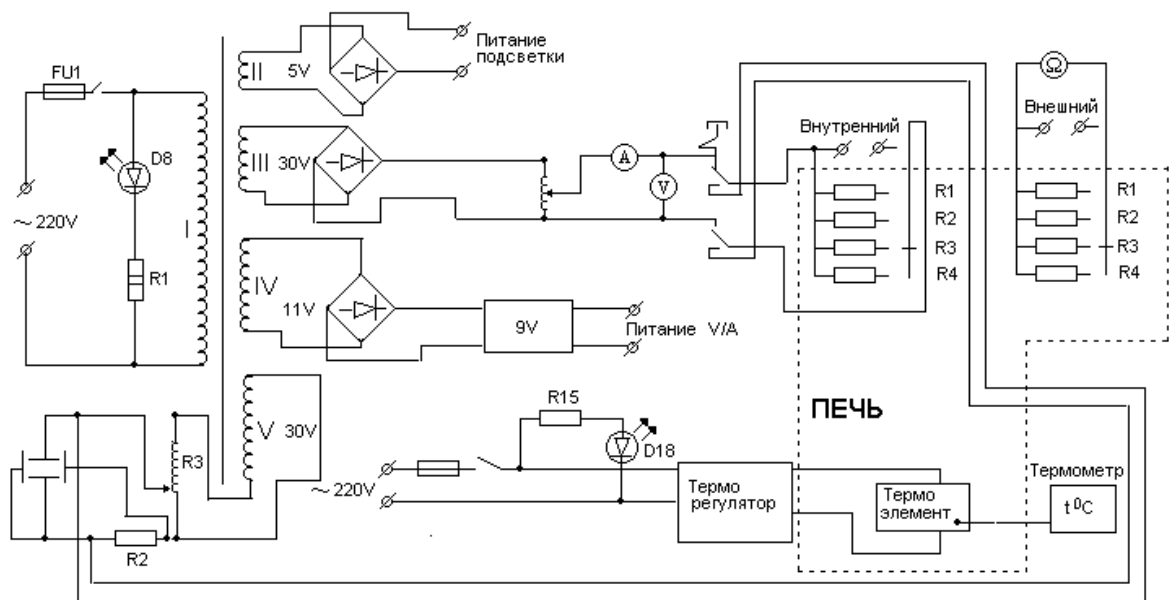


Рисунок 1.2 - Схема електрична принципова стенду для вимірювання опору

Вимірювання опору зразків матеріалів на стенді ИРС - 0002 (рис. 1.1, 1.2) здійснюється за допомогою цифрового автоматичного моста Р 589, який має автоматичний вибір меж вимірювання.

Почергове підключення резисторів до виводів з печі здійснюється за допомогою перемикача, розташованого на пульті. Температура контролюється мідь-константановою термопарою.

### 1.3 Порядок виконання роботи

1. Увімкнути стенд натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ.
2. Перемкнути ручку типу досліджуваного резистора на R1. Це – лінійний резистор марки МЛ-0,125Вт-2кОм-20%, в якому як резистивний матеріал використовується тонка металева стрічка. Ручкою вольтметра встановити напругу 8 В. Перемикач температури встановити в середнє положення, що відповідає кімнатній температурі. Перемикач А/В/Ω - в положення А/В/Ω.
3. Провести вимірювання опору резистора R при кімнатній температурі і записати результати в табл. 1.2.
4. Увімкнути піч. Перемикач температури - в положення max T°. Через кожні 10 градусів до 80 °С записувати показання омметра. Оформити результати вимірювань у вигляді таблиці 1.2.
5. Побудувати графік залежності R(T) і розрахувати  $\alpha_R$  (ТКО) дослідженого резистора та  $\alpha_p$  матеріалу його струмопровідного шару за формулами (1.3, 1.5).

Таблиця 1.2 – Результати вимірювань опору резистора R при зміні температури

t, °C							
R, Ом							
$\alpha_R, K^{-1}$							
$\alpha_\rho, K^{-1}$							

### 1.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Графік залежності опору металевого зразка R від температури в координатах R–T.
3. Розрахунки  $\alpha_R$  (ТКО) металевого зразка та  $\alpha_\rho$  матеріалу резистора за формулами (1.3, 1.5).
4. Висновки про одержані результати на підставі теоретичних відомостей про механізм провідності провідників та про природу матеріалу резистора.

### 1.5 Контрольні питання

1. Чому питомий опір металів збільшується з підвищенням температури?
2. Що називають температурним коефіцієнтом питомого опору? Чи є він константою для даного металу?
3. Як впливають домішки на питомий опір металів?
4. Як змінюється середня довжина вільного пробігу електронів в ідеально чистому металі й у металі з домішками при збільшенні температури (від абсолютного нуля)?
5. Чому металеві сплави типу твердих розчинів мають більш високий питомий опір, ніж чисті компоненти, що утворюють сплав?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### *Дослідження температурної залежності електричного опору напівпровідників*

Мета роботи: виміряти температурну залежність електричного опору напівпровідникового терморезистора, визначити величину його температурного коефіцієнта опору  $\alpha_R$  (ТКО), а також розрахувати ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу терморезистора.

### **2.1 Короткі теоретичні відомості про провідність напівпровідників**

До напівпровідників відносять матеріали, в яких переважаючим механізмом провідності є електронно - діркова провідність.

До напівпровідників належать кристали деяких хімічних елементів (кремнію, германію, вуглецю в модифікації алмазу та інших), деякі хімічні сполуки групи  $A^{III} B^V$ ,  $A^{II} B^{VI}$ ,  $A^{IV} B^{IV}$  та деякі органічні матеріали.

В кристалі атоми перебувають у зв'язаному стані, і на валентні електрони діють поля електронів і ядер сусідніх атомів, в результаті чого кожний окремий дозволений енергетичний рівень атома розщеплюється на ряд нових енергетичних рівнів, енергії яких близькі один до одного. На кожному із цих рівнів можуть перебувати тільки два електрони із різними спінами. Сукупність рівнів, на кожному з яких можуть перебувати електрони, називають дозволеною зоною. Проміжки між дозволеними зонами зветься забороненими зонами. Верхня дозволена зона при абсолютному нулі температури заповнена валентними електронами.

Електричні властивості твердого тіла визначаються характером заповнення валентної зони в його енергетичному спектрі.

У напівпровідників і діелектриків зона валентних електронів поділяється на дві частини. Нижня частина при абсолютному нулі температури повністю заповнена валентними електронами. Тому валентні електрони не можуть одержувати додаткову енергію малими порціями і не мають змоги вільно пересуватися всередині твердого тіла та брати участь в провідності. Саме цю енергетичну зону називають валентною зоною. Тому при температурі 0 К напівпровідники та діелектрики є абсолютними ізоляторами. Верхня частина зони валентних електронів при абсолютному нулі температури повністю порожня. При  $T \neq 0$  К частина електронів під впливом теплових флуктуацій одержує енергію, що достатня для переходу із валентної зони в верхню порожню зону дозволених енергій. Перехід в верхню зону супроводжується

звільненням електронів від своїх атомів. Оскільки в верхній зоні багато вільних рівнів на малій відстані один від одного, то електрони можуть одержувати енергію малими порціями і тому брати участь у провідності. Тому цю зону називають зоною провідності.

Вихід електрона з валентної зони призводить до утворення в ній незаповненого енергетичного рівня. Валентні електрони сусідніх атомів можуть переходити на ці звільнені рівні за допомогою квантово-механічного явища – тунелювання, створюючи звільнені рівні в інших місцях кристалу. Таке переміщення електронів можна розглядати як рух позитивно заряджених квазічастинок – дірок. Під впливом електричного поля дірки рухаються в напрямку, протилежному напрямку руху вільних електронів.

Електропровідність, обумовлену рухом вільних електронів, називають електронною, а електропровідність, обумовлену рухом дірок, – дірковою.

Електричний струм через напівпровідник обумовлений носіями заряду обох типів:

$$I = e (n\mu_n + p\mu_p) E, \quad (2.1)$$

де  $e$  - заряд електрона, Кл;  $n$  - концентрація електронів провідності,  $\text{м}^{-3}$ ;  $p$  - концентрація дірок провідності,  $\text{м}^{-3}$ ;  $\mu_n$  та  $\mu_p$  – рухливість електронів та дірок, відповідно,  $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;  $E$  – напруженість електричного поля  $\text{В}/\text{м}$ .

За законом Ома провідність напівпровідника  $\gamma$

$$\gamma = 1/\rho = e (n\mu_n + p\mu_p) ,$$

де  $\rho$  - питомий опір,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ .

В абсолютно чистому й однорідному напівпровіднику при температурі, відмінній від 0 К, вільні електрони й дірки утворюються попарно, тобто кількість вільних електронів дорівнює кількості дірок. Електропровідність такого напівпровідника, що обумовлена парними носіями теплового походження, називається власною. В бездомішковому (власному) напівпровіднику  $n = p = n_i$ , де  $n_i$  – концентрація власних носіїв заряду,  $\text{м}^{-3}$ :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (2.2)$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3}; \quad N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (2.3)$$



де  $N_v, N_c$  – ефективна густина станів дірок валентної зони і електронів зони провідності, відповідно,  $m^{-3}$ ;  $\Delta E$  – ширина забороненої зони, eВ;  $m_n$  - ефективна маса електрона, г;  $m_p$  - ефективна маса дірки, г;  $k$  - постійна Больцмана, Дж/К;  $h$  - постійна Планка, Дж·с;  $T$  – температура, К.

В напівпровіднику з донорною домішкою переважають негативно заряджені носії заряду – вільні електрони (n-тип провідності), а в напівпровіднику з акцепторною домішкою переважають позитивно заряджені носії заряду (р-тип провідності).

Для будь-якого напівпровідника в стані рівноваги при постійній температурі

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (2.4)$$

В робочому інтервалі температур напівпровідникових приладів і інтегральних схем атоми донорної або акцепторної домішки повністю іонізовані (рис. 2.1, 2 – ділянка виснаження легуючої домішки), тому концентрація основних носіїв заряду співпадає з концентрацією відповідної домішки, а концентрацію неосновних носіїв заряду знаходять із (2.4).

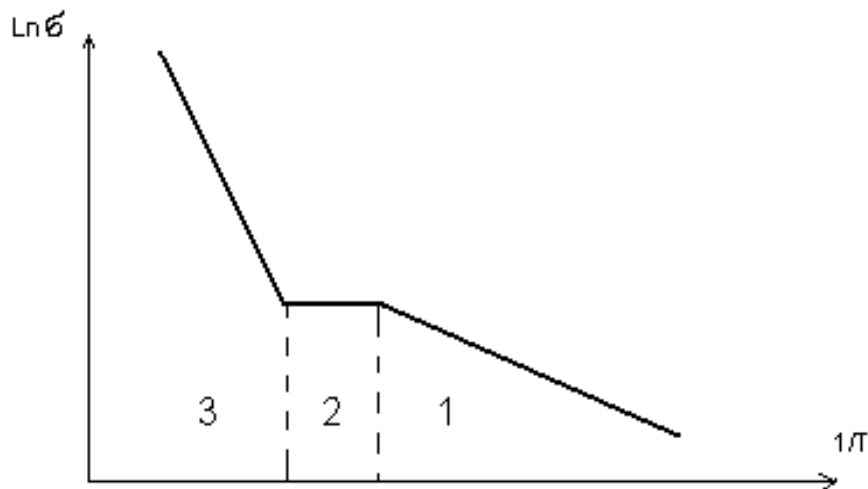
Для напівпровідника n – типу:

$$n_n = N_d, \quad p_n = n_i^2 / N_d, \quad (2.5)$$

для напівпровідника p – типу:

$$p_p = N_a, \quad n_p = n_i^2 / N_a, \quad (2.6)$$

де  $N_d, N_a$  – концентрація донорної й акцепторної домішки, відповідно,  $m^{-3}$ .



1- іонізація домішки; 2- виснаження домішок; 3 – власна провідність

Рисунок 2.1 - Температурна залежність провідності напівпровідника

На ділянці 1 зі зростанням температури провідність збільшується (опір зменшується) за рахунок іонізації домішки і відповідного збільшення концентрації вільних носіїв заряду (дірок або електронів). На ділянці 2

провідність може залишатися постійною за рахунок того, що вся домішка іонізована, а іонізація власних атомів ще занадто мала. На ділянці 3 провідність збільшується за рахунок іонізації власних атомів і утворення вільних дірок і електронів.

Температурна залежність опору напівпровідника:

$$R = R_0 \exp(W_a/2kT), \quad (2.7)$$

де  $R$  - опір при температурі  $T$ , Ом;  $R_0$  – коефіцієнт, постійний у вузькому інтервалі температур, Ом;  $W_a$  – енергія активації процесу електропровідності, Дж, еВ.

В області власної провідності енергія активації дорівнює ширині забороненої зони,  $W_a = \Delta E$ . В області низьких температур, коли концентрацією власних носіїв можна знехтувати, енергія активації дорівнює енергії іонізації донорної або акцепторної домішки  $W_a = E_i$ . Логарифмуючи (2.7), одержимо рівняння

$$\ln R = \ln R_0 + \Delta E/2kT. \quad (2.8)$$

Якщо побудувати залежність (2.7) в вигляді (2.8), тобто за віссю абсцис відкласти  $1/T$ , а за віссю ординат –  $R_T$ , то отримаємо пряму лінію з тангенсом кута нахилу

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta E/2k \quad (2.9)$$

Таким чином, за даними вимірювань температурної залежності опору можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника. Температурний коефіцієнт питомого опору

$$\alpha_p = (1/\rho) (d\rho/dT) = - \Delta E/2kT^2,$$

де  $\Delta E$  - ширина забороненої зони.

В більшості напівпровідників

$$\alpha_R \cong \alpha_p = - \Delta E/2kT^2 \quad (2.10)$$

## 2.2 Стенд для експериментального дослідження.

Для дослідження температурної залежності опору напівпровідникових резисторів використовуємо той самий стенд, що і в лабораторній роботі №1

(див. рис. 1.1 і 1.2). Досліджуємо терморезистор, виготовлений з оксидних напівпровідників  $Mn_3O_4$ ,  $Co_3O_4$ ,  $CoO$ ,  $CuO$ .

### 2.3 Порядок виконання роботи

1. Увімкнути стенд натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ.
2. Перемкнути ручку типу досліджуваного резистора на R2 - терморезистор. Ручку вольтметра вивести в крайнє лівє положення. Перемикач температури встановити в середнє положення, що відповідає кімнатній температурі. Перемикач A/V/ $\Omega$  - в положення A/V/ $\Omega$ .
3. Провести вимірювання.
  - 3.1. Записати результати вимірювань  $T_0$  термопарою.
  - 3.2. Повертаючи ручку вольтметра з крайнього лівого в крайнє праве положення зняти показання вольтметра і амперметра в 10 точках.
  - 3.3. Записати результати вимірювань в таблицю 2.1 і за цими даними побудувати вольт-амперну характеристику терморезистора. По графіку залежності визначити опір терморезистора в двох точках.
  - 3.4. Увімкнути піч. Перемикач температури - в положення  $\max T^\circ C$ .

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань ВАХ терморезистора

U, В										
I, А										

- 3.5. Через кожні 10 градусів до  $80^\circ C$  записувати показання омметра. За даними вимірювань побудувати графіки  $R(t)$  та  $\ln R(1/T)$ . По графіку  $R(t)$  визначити ТКО терморезистора в двох точках., а по графіку  $\ln R(1/T)$  та формулі (2.9) – ширину забороненої зони матеріалу терморезистора. Оформити результати вимірювань і розрахунків у вигляді таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань температурної залежності опору терморезистора

t, $^\circ C$							
R, Ом							
$(1/T) \cdot 10^3 K^{-1}$							
$\ln R$							
$\alpha_R, K^{-1}$							
$\Delta E, eV$							

3.5. За формулою (2.10) також розрахувати ширину забороненої зони матеріалу терморезистора й порівняти значення  $\Delta E$ , отримані обома способами.

## 2.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Графіки залежності опору терморезистора  $R_T$  від температури в координатах  $R-t$  та  $\ln R - 1/T$ .
3. Розрахунки енергії активації провідності  $W_a$  (ширини забороненої зони  $\Delta E$ ) за (2.9).
4. Розрахунки  $\Delta E$  матеріалу резистора за формулою (2.10). Порівняти результати.
5. Висновки про одержані залежності на підставі теоретичних відомостей про механізм провідності напівпровідників.

## 2.5 Контрольні питання

1. Що таке власний напівпровідник? Які властивості він має?
2. Чи може домішковий напівпровідник мати власну електропровідність?
3. Які домішки в ковалентних напівпровідниках є донорами, а які - акцепторами?
4. Яким співвідношенням пов'язані між собою концентрації електронів і дірок у невироджених напівпровідниках при термодинамічній рівновазі?
5. Як залежить від температури питома провідність напівпровідника?
6. Що таке рухливість носіїв заряду в напівпровідниках?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### *Дослідження діелектричної проникності діелектриків*

Мета роботи: виміряти електричну ємність конденсатора з різними діелектричними матеріалами між обкладинками та розрахувати діелектричну проникність цих матеріалів.

### 3.1 Короткі теоретичні відомості

До діелектриків відносять матеріали, переважачим механізмом провідності в яких є іонна провідність. Діелектриками є широке коло неорганічних та органічних матеріалів.

Під дією електричної напруги діелектрик поляризується. Поляризація – це обмежений зсув зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул.

Діелектрик з нанесеними на нього електродами є конденсатором, заряд якого

$$Q = CU, \quad (3.1)$$

де  $C$  – ємність конденсатора з діелектриком між обкладинками, Ф;  $U$  – прикладена напруга, В.

Діелектрична проникність діелектрика:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0U} = \frac{C}{C_0}, \quad (3.2)$$

де  $C_0$  – ємність конденсатора з вакуумом між обкладинками, Ф.

Діелектрична проникність визначає величину ємності конденсатора  $C$  з діелектриком при його заданих розмірах:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}, \quad (3.3)$$

де  $S$  – площа обкладок конденсатора, м<sup>2</sup>;  $h$  – товщина діелектрика, м;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - діелектрична стала, що має зміст діелектричної проникності вакуума.

### 3.2 Обладнання для експериментального дослідження

Для дослідження діелектричної проникності зразок діелектрика розміщується між обкладинками конденсатора, який під'єднується до цифрового мосту ємності.

### 3.3 Порядок виконання роботи

1. Виміряти лінійкою висоту, ширину обкладинок конденсатора та відстань між ними, а також товщину пластин зразків діелектричних матеріалів. Записати результати вимірювань в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань та розрахунків

Матеріал	Довжина, м	Ширина, м	Товщина, м	Ємність, Ф	$\epsilon$
1.Повітря					
2....					

2. Під'єднати обкладинки конденсатора до цифрового мосту ємності.
3. Увімкнути мост натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ. Перемикач виду вимірюваної величини виставити в положення "С".
4. Провести електричні вимірювання.
  - 4.1. Виміряти ємність конденсатора, коли між його обкладинками є лише повітря. Записати результати вимірювань в таблицю 3.1.
  - 4.2. Вставляти між обкладинками по черзі пластини різних діелектричних матеріалів і вимірювати ємність. Записати результати вимірювань і назву матеріалів в таблицю.
5. За даними вимірювань розрахувати діелектричну проникність досліджуваних матеріалів за формулою (3.3).

### 3.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Електрична принципова схема експерименту.
3. Таблиці результатів вимірювання і розрахунків.

### 3.5 Контрольні питання

1. Що називають поляризацією діелектрика?

2. Які види поляризації можна вважати миттєвими, а які є вповільненими?
3. Які види поляризації присутні у досліджених в роботі матеріалах?
4. Що таке абсолютна та відносна діелектрична проникність?
5. У яких одиницях вимірюють діелектричну проникність?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### *Дослідження діелектричних втрат діелектриків*

Мета роботи: виміряти тангенс кута діелектричних втрат діелектричних матеріалів.

#### 4.1 Короткі теоретичні відомості

Діелектричні втрати – це потужність, що розсіюється в діелектрику при дії на нього електричного поля й викликає його нагрівання.

При постійному полі втрати характеризуються об'ємним  $\rho_v$  і поверхневим  $\rho_s$  питомими опорами, а при змінному полі - питомими втратами  $P$ , що дорівнюють розсіюваній в одиниці об'єму діелектрика потужності:

$$P_a = I^2 \cdot r = \frac{U^2}{Z^2} \cdot r = \frac{U^2}{X_c^2 + r^2} \cdot r = \frac{U^2 X_c \operatorname{tg} \delta}{(X_c^2 + X_c^2 \operatorname{tg}^2 \delta)} = U^2 \cdot 2\pi f c \cdot \operatorname{tg} \delta ,$$

або кутом діелектричних втрат  $\delta$ , тобто кутом, що доповнює до  $90^\circ$  кут фазового зсуву  $\varphi$  між струмом та напругою в ланцюгу ємності:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{X_c} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot r$$

Питомі втрати при постійному струмі:

$$P = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2}{R_v \cdot V} = \frac{U^2}{\rho \frac{h}{s} \cdot s \cdot h} = \frac{U^2}{h^2} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{E^2}{\rho} ,$$

де  $V$  - об'єм діелектрика,  $\text{м}^3$ ;  $\rho$  – його питомий опір  $\text{Ом/м}$ ;  
 $E$  – напруженість електричного поля,  $\text{В/м}$ .

Питомі втрати при змінному струмі:

$$P = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \cdot 2\pi f \cdot c \cdot \operatorname{tg} \delta}{S \cdot h} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta}{S \cdot h \cdot h} = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2$$

Зворотна до  $\operatorname{tg} \delta$  величина зветься добротністю:

$$Q = 1 / \operatorname{tg} \delta.$$

#### 4.2 Обладнання для експериментального дослідження.

Для дослідження діелектричних втрат використовується теж саме обладнання, що і в лабораторній роботі № 3.

#### 4.3 Порядок виконання роботи

1. Під'єднати обкладинки конденсатора до цифрового мосту ємності.
2. Увімкнути мост натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ. Перемикач виду вимірюваної величини виставити в положення “ $\operatorname{tg} \delta$ ”.
3. Провести електричні вимірювання.
  - 3.1. Виміряти  $\operatorname{tg} \delta$  повітря між обкладинками конденсатора. Записати результати вимірювань в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

Матеріал	1. Повітря	2...	3...	4...
$\operatorname{tg} \delta$				

3.2. Вставляти між обкладинками по черзі пластини різних діелектричних матеріалів і вимірювати  $\operatorname{tg} \delta$ . Записати результати вимірювань і назву матеріалів в таблицю 4.1 і порівняти з даними довідника.

4. За наведеними нижче експериментальними даними визначити фізичні характеристики діелектриків.

4.1. Тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  неполярного діелектрика на частоті 50 Гц дорівнює  $10^{-3}$ . Обчислити активну потужність розсіювання  $P_a$  у конденсаторі із цього діелектрика на частоті  $f = 1$  кГц при напрузі 1 кВ, якщо ємність конденсатора  $C$  дорівнює 1000 пФ.



4.2. Визначити питомі діелектричні втрати в плоскому конденсаторі, виготовленому із плівки полістиролу товщиною 20 мкм, якщо на конденсатор подано напругу 2 В частотою 2 МГц (для полістиролу  $\varepsilon = 2,5$ ;  $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ ).

#### 4.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Електрична принципова схема експерименту.
3. Таблиці результатів вимірювання.
4. Результати розрахунків п. 4.1, 4.2.

#### 4.5 Контрольні питання

1. Що називають діелектричними втратами?
2. Які механізми діелектричних втрат вам відомі?
3. Якими параметрами характеризують діелектричні втрати?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Випробування лінійних резисторів

Мета роботи: вивчити різні типи резисторів, виміряти вольт-амперну характеристику лінійного резистора, розшифрувати маркування стандартних резисторів.

### 5.1 Короткі теоретичні відомості

В електронній промисловості розроблені і випускаються у великих кількостях найрізноманітніші типи резисторів. Відхилення від номінальних значень (допуск) опорів таких резисторів не повинно перевищувати 0,12...2% в діапазоні опорів 0,1...1000 кОм. Окремі типи резисторів мають допуск 0,005% номіналу зі стабільністю 0,0002...0,0005% номіналу за 300...500 годин роботи в нормальних умовах.

**5.1.1 Основні параметри резисторів.** За виглядом вольт-амперної характеристики розрізняють резистори лінійні і нелінійні (постійного і змінного опору).

**Номінальний опір** резистора - значення опору, який повинен мати резистор відповідно до нормативної документації (ГОСТам, технічним умовам).

**Фактичний опір** кожного екземпляра резистора може відрізнятись від номінального, але не більше ніж на допустиме відхилення.

**Номінальна потужність** резистора - максимально допустима потужність, що розсіюється на резисторі, при якій параметри резистора зберігаються у встановлених межах протягом тривалого часу, так званого терміну служби.

Напруга на резисторі не повинна перевищувати номінальної потужності  $U_{\text{ном}}$ :

$$U_{\text{ном}} = \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R},$$

де  $P_{\text{ном}}$  - номінальна потужність, Вт;  $R$  - опір, Ом.

**Температурний коефіцієнт опору (ТКО)** - відносна зміна опору резистора при зміні температури навколишнього середовища на 1°C. ТКО може змінюватися в інтервалі температур. У деяких резисторів змінюється і знак ТКО. Великим номінальним опорам резистора відповідає більший ТКО.

**Електрична міцність** резистора характеризується граничною напругою, при якій резистор може працювати протягом терміну служби без електричного пробоя.

Гранична робоча напруга резистора залежить від атмосферного тиску, температури і вологості повітря.

**Рівень власних шумів** резисторів визначається випадковими коливаннями різниці потенціалів, що виникають на резистивному елементі внаслідок флуктуацій об'ємної концентрації носіїв заряду і флуктуацій його електричного опору. **ЕРС шумів** дротяних резисторів, а також недротяних, до яких не прикладена напруга, при 20 °С в смузі частот  $\Delta f$  визначається за формулою

$$E_{\text{ш}} \approx 0,125\sqrt{\Delta f \cdot R},$$

де  $E_{\text{ш}}$  - ЕРС (електрорушійна сила) шумів, мкВ;  $\Delta f$  - смуга частот, кГц.

**Частотні властивості** резисторів визначаються номінальним опором і розподіленими реактивними (паразитними) параметрами (індуктивністю і ємністю). Активний опір резистора на змінному струмі залежить як від його номінального опору, так і від його ємності і індуктивності. В свою чергу, власна розподілена ємність і індуктивність резистора залежать від його форми і числа витків спіральної нарізки резистивного елементу. У високоомних резисторів активний опір зменшується з підвищенням частоти. Повний опір низькоомних резисторів, які не мають нарізки резистивного елементу, із зростанням частоти зростає, і на частоті резонансу досягає максимального значення.

**5.1.2. Маркування резисторів.** На кожному недротяному резисторі вказуються номінальний опір, допустимі відхилення опору від номінального і тип резистора. Якщо рівень шумів резистора менше 1 мкВ/В, на ньому ставиться буква А. Резистори постійного опору позначаються буквою С, змінного - буквами СП. Цифра, що стоїть після букв, позначає: 1 - вуглецевий, 2 - металоплівковий або металоокисний, 3 - плівковий композиційний, 4 - об'ємний композиційний, 5 - дротяний. Після дефіса позначається номер розробки резистора.

Кодовані позначення номінального опору резисторів складаються з цифр, що позначають номінальний опір, і букви, що позначає одиницю вимірювання опору. Опори до 100 Ом виражаються в омах і позначаються буквою Е, опори від 100 Ом до 100 кОм - в кілоомах і позначаються буквою К, а опори від 100 кОм до 100 МОм - в мегаомах і позначаються буквою М. Ці букви стоять на місці коми десяткового дробу, який виражає значення опору. Якщо значення номінального опору виражається цілим числом, то буква, що позначає одиницю вимірювання, ставиться після нього. Якщо значення номінального

опору виражається десятковим дробом, меншим одиниці, то нуль цілих і кома з маркування виключаються і буква, що позначає одиниці вимірювання, стоїть перед числом.

**Кольорове маркування резисторів.** Опір резистора відповідно до ДСТ 175-72 і вимог Міжнародної Електротехнічної Комісії указують трьома, чотирма (рис. 5.1), п'ятьма чи шістьма смугами.

Як правило, перша смуга розташована ближче до одного з виводів резистора, іноді вона ширше за інші, що на практиці спостерігається не завжди.

Якщо на корпус резистора нанесено **чотири смуги**, то колір перших двох смуг відповідає першим цифрам опору. Третя смуга позначає ступінь десяти, тобто множник, на який треба помножити число, позначене першими двома смугами, щоб одержати опір резистора в омах, інакше кажучи, число нулів після перших двох цифр.

	1 цифра	2 цифра	множник	похибка
чорний	0	0	x 1	сріблястий 10%
коричневий	1	1	x 10	золотистий 5%
червоний	2	2	x 100	червоний 2%
оранжевий	3	3	x 1.000	коричневий 1%
жовтий	4	4	x 10.000	зелений 0,5%
зелений	5	5	x 100.000	фіолетовий 0,1%
синій	6	6	x 1.000.000	
фіолетовий	7	7	золотий x 0,1	
сірий	8	8		
білий	9	9		

Рисунок 5.1 - Кольорове маркування резисторів

У випадку **п'ятисмугового** позначення три перші смуги відповідають опору, четверта - множник, а п'ята - допуск. Коли на резисторі лише **три**

**смуги**, його допуск - 20 %, а всі смуги означають тільки опір. **Шоста смужка**, якщо вона є, указує температурний коефіцієнт опору (ТКО). Деякі фірми застосовують нестандартне (внутрішньофірмове) маркування.

## 5.2 Опис експериментальної установки

Для вимірювання ВАХ резистора використовується стенд ИРС – 0002 (дивись лабораторну роботу № 1, рисунки 1.1 і 1.2).

## 5.3 Порядок виконання роботи

1. Увімкнути стенд натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ.
2. Перемкнути ручку типу досліджуваного резистора на R1. Це – лінійний резистор марки МЛ-0,125Вт-2кОм-20%, в якому як резистивний матеріал використовується тонка металева стрічка. Перемикач температури встановити в середнє положення, що відповідає кімнатній температурі. Перемикач  $A/V/\Omega$  - в положення  $A/V/\Omega$ .
3. Ручку вольтметра вивести в крайнє лівє положення. Повертаючи ручку вольтметра з крайнього лівого в крайнє праве положення, зняти показання вольтметра і амперметра в 10 точках. Записати результати вимірювань в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати вимірювань вольт-амперної характеристики резистора

U, В	0	...							
I, А	0	...							

За даними таблиці 5.1 побудувати вольт-амперну характеристику резистора. За графіком залежності визначити опір резистора. Зробити висновок про тип резистора на підставі виміряної ВАХ.

3. Отримати від викладача зразки резисторів з кольоровим маркуванням. За даними рисунку 5.1 визначити їх параметри.
4. Зробити висновки про типи резисторів на підставі їхнього маркування.

## 5.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Графік ВАХ.
3. Розрахунок опору резистора.

4. Висновки про типи досліджених резисторів на підставі їх маркування.

### 5.5 Контрольні питання

1. Класифікація резисторів.
2. Характеристики і параметри резисторів.
3. Маркування резисторів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### *Випробування варістора*

Мета роботи - вивчити властивості, ознайомитися з параметрами і технічним застосуванням варісторів та практично виконати випробування варістора.

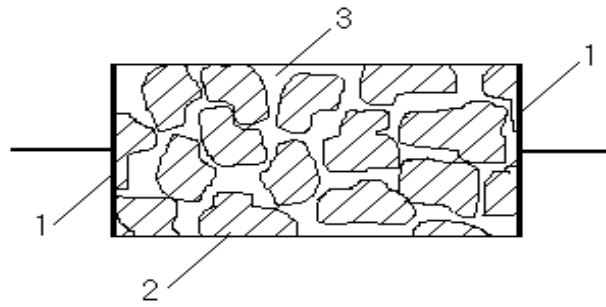
### 6.1 Короткі теоретичні відомості

#### **Основні відомості про варістори та їх технічне застосування.**

Варістор - це нелінійний напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.

Залежність опору від напруги спостерігається у деяких оксидів і сульфідів металів, діборита титану, карбїду кремнію і у багатьох матеріалів складного хімічного складу. Для виготовлення варісторів найчастіше використовують технічний карбїд кремнію (SiC) різних алотропічних модифікацій у вигляді порошку, змішаного із спеціальною пов'язуючою діелектричною речовиною (зв'язкою). Як зв'язку застосовують кераміку, рідке скло, кремнійорганічні лаки і інші матеріали. Виготовляють варістори за керамічною технологією.

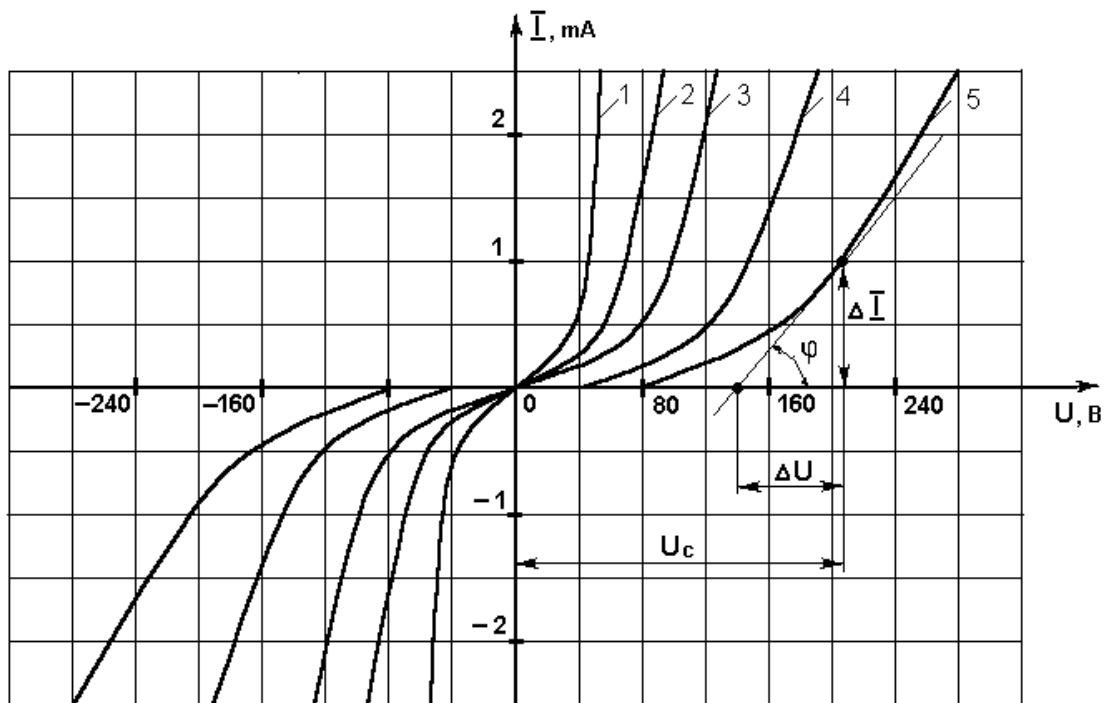
Робоча область варістора (рис. 6.1) складається з полікристалів карбїду кремнію або іншого напівпровідника, розділених діелектричною зв'язкою.



1-електроди; 2-зерна карбїду кремнію, 3-пов'язуючий матеріал

Рисунок 6.1 - Структура робочого тіла варістора

Під дією прикладеної напруги в локальних місцях зіткнення окремих зерен карбїду кремнію або в оксидних плівках на поверхні зерен розвиваються теплові ефекти або ефекти сильного поля (лавинний або тунельний пробїй). При збільшенні густини струму і потужності, що виділяється, можливий перехід ефектів сильного поля в теплові ефекти. Із-за нерегулярності площ і опорів контактів зерен, варістор має нелінійну практично симетричну ВАХ (рис. 6.2).



1 - СН1-2-1-56 $\pm$ 20%; 2 - СН1-2-1-82 $\pm$ 20%; 3 - СН1-2-1-120 $\pm$ 10 %;

4 - СН1-2-1-180 $\pm$ 10%; 5 - СН1-2-1-270 $\pm$ 10 %

Рисунок 6.2 - Вольт - амперні характеристики варісторів

Наприклад: СН1-1-1-820-10 %. Розшифровка: резистор нелінійний з карбїду кремнію стрижньового типу першої розробки, розрахований на роботу при класифікаційній напрузі 820 В з розкидом 10 %.

Основне призначення варісторів - захист елементів електричних ланцюгів постійного, змінного і імпульсного струмів від перенапружень; захист контактів реле від руйнування і обмоток від пробою. Варістори застосовують також для регулювання і стабілізації різних ланцюгів і блоків РЕА, для поліпшення їх перешкодостійкості та інших важливих функцій.

**Параметри і характеристики варісторів.**

**Статичний і динамічний опір.** На лінійній ділянці ВАХ або в заданій робочій точці (див. рис. 6.2) опір варістора визначається як статичний:

$$R_c = \frac{U}{I} \quad (6.1)$$

На нелінійній ділянці опір змінюється при різних напругах і визначається як динамічний (диференціальний):

$$R_d = r = \frac{dU}{dI}$$

Практично при відомій ВАХ величина  $R_d$  визначається по куту  $\varphi$  дотичної, проведеної через відповідну точку:

$$R_d = k \cdot ctg \varphi \quad (6.2)$$

де  $k$  - масштабний коефіцієнт перерахунку одиниць вимірювань, В/А.

**Коефіцієнт нелінійності ВАХ.** Нелінійність ВАХ в заданій точці (рис. 6.2) визначається відношенням статичного і динамічного опорів:

$$\beta = \frac{R_c}{R_d} = \frac{U \cdot dI}{I \cdot dU} \quad (6.3)$$

$$\beta = \frac{U_c}{\Delta U} \quad (6.3)$$

**Температурний коефіцієнт струму** - це відношення:

$$TKI = \frac{I_2 - I_1}{I_1(T_2 - T_1)} \quad (6.5)$$



при постійній прикладеній напрузі. Тут:  $I_1$  - струм при температурі  $T_1 = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;  $I_2$  - при  $T_2 = 100 \pm 2^\circ\text{C}$ . Разом з ТКІ користуються також температурним коефіцієнтом напруги і статичного опору. Чим більш нелінійна ВАХ, тим більші температурні коефіцієнти.

**Номінальна потужність розсіяння  $P_{\text{роз}}$**  - це найбільша допустима потужність, яку варистор може розсіювати при безперервному навантаженні, заданій температурі і нормальному атмосферному тиску за умови, що напруга на варисторі не перевищує допустиму.

**Власна ємність варистора  $C_0$**  - це найбільша початкова його ємність. Вона визначає частотні властивості варистора.

## 6.2 Опис експериментальної установки

Для вимірювання ВАХ резистора використовується стенд ИРС – 0002 (дивись лабораторну роботу № 1, рисунки 1.1 і 1.2).

## 6.3 Порядок виконання роботи

1. Увімкнути стенд натисненням перемикача живлення в положення ВКЛ.
2. Перемкнути ручку типу досліджуваного резистора на R4. Це – варистор. Ручку регулювання температури встановити в середнє положення, що відповідає кімнатній температурі. Перемикач  $A/V/\Omega$  - в положення  $A/V/\Omega$ .
3. Зняти вольтамперну характеристику варистора в заданих діапазонах напруги при кімнатній температурі.
4. Увімкнути електропіч ЕП і повторити вимірювальні операції при значенні температури  $100^\circ\text{C}$ . Вимірювання потрібно проводити швидко, виключаючи, по можливості, систематичні похибки.
5. Обробка і аналіз результатів. По отриманих в процесі вимірювань результатах побудувати на міліметрівці ВАХ варистора при двох температурах і розрахувати наступні параметри:
  - статичний опір за формулою (6.1);
  - динамічний опір визначити на нелінійній ділянці ВАХ по куту нахилу дотичної (див. рис. 6.2) за формулою (6.2);
  - коефіцієнт нелінійності ВАХ визначити графічно (див. рис 6.2) за формулою (6.3);
  - температурний коефіцієнт струму при напрузі 30 В розрахувати за формулою (6.5).

### 6.4 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Параметри і характеристики варісторів.
3. Формули для розрахунків.
4. Результати вимірювання і обчислень у вигляді таблиці:

$t, ^\circ\text{C}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$R_c, \text{Ом}$	$R_d, \text{Ом}$	$\beta$	$\text{TKI}, 1/^\circ\text{C}$

### 6.5 Контрольні питання

1. Особливості структури варісторів.
2. Фізика роботи варісторів.
3. Привести приклади дешифровки маркування різних типів варісторів.
4. Основні параметри і характеристики варісторів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### *Дослідження параметрів сегнетоелектриків*

Сегнетоелектриками називають речовини, що мають **спонтанну поляризацію**, напрямок якої може бути змінений за допомогою зовнішнього електричного поля. При відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики, як правило, мають доменну структуру (рис. 7.1).

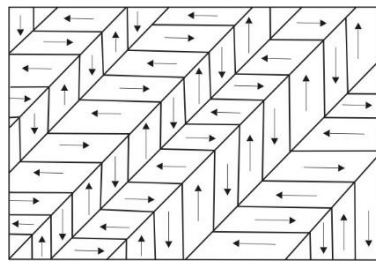


Рисунок 7.11 - Схема розташування доменів у кристалі титанату барію тетрагональної модифікації

Домени є макроскопічними областями, що мають спонтанну поляризацію, яка виникає під впливом внутрішніх процесів у діелектрику. Напрямок електричних моментів у різних доменах різних. Тому сумарна поляризованість зразка в цілому може дорівнювати нулю.

Кристал, що має малі розміри, може складатися лише з одного домена. Однак великі зразки завжди розбиваються на безліч доменів, оскільки однодомений стан енергетично не вигідний. Розбивка на домени зменшує електростатичну енергію сегнетоелектрика. Встановлено, що лінійні розміри доменів  $10^{-4} \dots 10^{-1}$  см.

Зовнішнє електричне поле змінює напрямки електричних моментів доменів, що створює ефект дуже сильної поляризації. Цим пояснюються властиві сегнетоелектрикам надвисокі значення діелектричної проникності (до сотень тисяч). Процес зсуву доменних границь викликає переорієнтацію вектора спонтанної поляризованості в напрямку зовнішнього електричного поля. Наслідком є нелінійна залежність вектора електричної індукції  $\bar{D}$  від напруженості електричного поля  $\bar{E}$  (рис. 7.2).

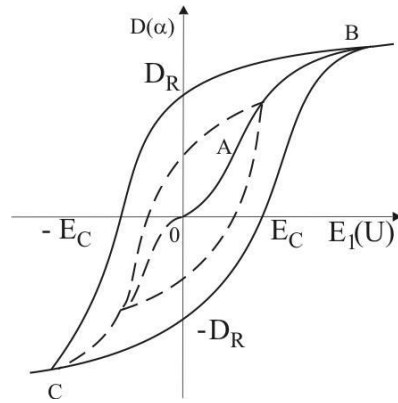


Рисунок 7.2 - Основна крива поляризації сегнетоелектрика й петля діелектричного гістерезису

При впливі слабого електричного поля переважають процеси оборотного зсуву (флуктуації) доменних границь, зв'язок між  $\bar{D}$  і  $\bar{E}$  має приблизно лінійний характер (ділянка ОА). В області більш сильних полів (ділянка АВ) зсув доменних границь має необоротний характер. При напруженості поля, що відповідає точці В, всі домени виявляються орієнтованими по полю - стан технічного насичення. В монокристалах такий стан відповідає однодоменній структурі. Подальше деяке зростання індукції в сегнетоелектрику обумовлено процесами індукованої (тобто електронної й іонної) поляризації.

Криву ОАВ називають основною кривою поляризації сегнетоелектрика. Якщо в поляризованому до насичення зразку зменшити напруженість поля до нуля, то індукція в нуль не повернеться, а прийме деяке залишкове значення  $D_r$ . При впливі полем протилежної полярності індукція швидко зменшується й при деякій напруженості поля змінює свій напрямок. Подальше збільшення напруженості поля знову переводить зразок у стан технічного насичення (точка С). Таким чином, переполіаризація сегнетоелектрика в змінних полях супроводжується **діелектричним гістерезисом**. Напруженість поля  $E_c$ , при якій індукція проходить через нуль, називається **коерцитивною силою**.

Діелектричний гістерезис обумовлений необоротним зсувом доменних границь під дією поля. Площа гістерезисної петлі пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Внаслідок втрат на гістерезис сегнетоелектрики характеризуються досить великими діелектричними втратами, у типових випадках  $\text{tg } \delta \approx 0,1$ .

**Статична діелектрична проникність**  $\epsilon_{ст}$  визначається по основній кривій поляризації сегнетоелектрика:

$$\epsilon_{cm} = \frac{D}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \approx \frac{P}{\epsilon_0 E}.$$

**Реверсивна діелектрична проникність**  $\epsilon_p$  характеризує зміну поляризації сегнетоелектрика в змінному електричному полі при одночасному впливі постійного поля.

**Ефективну діелектричну проникність**  $\epsilon_{ef}$ , як і ефективну ємність конденсатора, визначають за діючим значенням струму  $I$  (несинусоїдального), що проходить у ланцюзі з нелінійним елементом при заданій діючій напрузі  $U$

$$\text{з кутовою частотою } \omega: \epsilon_{ef} = \frac{I}{\omega U}.$$

Діелектричну проникність, вимірювану в дуже слабких електричних полях, називають **початковою**.

Специфічні властивості сегнетоелектриків проявляються лише в певному діапазоні температур. У процесі нагрівання вище деякої температури відбувається розпад доменної структури й сегнетоелектрик переходить у параелектричний стан. Температуру  $T_k$  такого фазового переходу називають **сегнетоелектричною точкою Кюрі**. У точці Кюрі спонтанна поляризованість зникає, а діелектрична проникність досягає свого максимального значення. Перехід сегнетоелектрика в параелектричний стан супроводжується різким зменшенням  $\text{tg}\delta$ , оскільки зникають втрати на гістерезис.

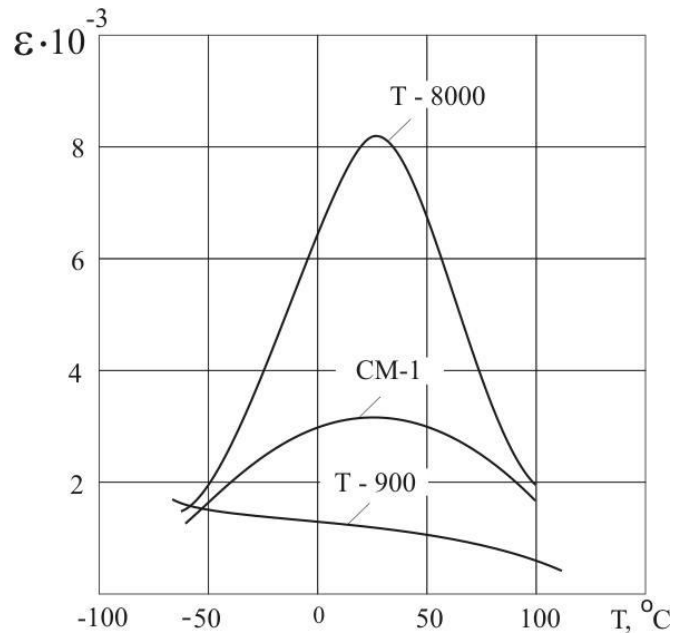
В деяких кристалах електричні моменти сусідніх елементарних комірок орієнтовані у взаємно протилежних напрямках. Такі речовини з антипаралельними електричними моментами називають **антисегнетоелектриками**. Вони також мають доменну будову, однак спонтанна поляризованість кожного домена дорівнює нулю. У параелектричному стані (тобто вище температури Кюрі) антисегнетоелектрики можуть мати високу діелектричну проникність. Прикладами антисегнетоелектриків є цирконат свинцю ( $\text{PbZrO}_3$ ), ніобат натрію  $\text{NaNbO}_3$ , дигідрофосфат амонію ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ).

Основні напрямки технічного застосування сегнетоелектриків:

- 1) виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю;
- 2) використання матеріалів з великою нелінійністю поляризації для діелектричних підсилювачів, модуляторів і інших керованих пристроїв;
- 3) використання сегнетоелементів у лічильно-обчислювальній техніці як комірки пам'яті;
- 4) використання кристалів сегнето- і антисегнетоелектриків для модуляції й перетворення лазерного випромінювання;
- 5) виготовлення п'єзоелектричних і піроелектричних перетворювачів.

**Конденсаторна сегнетокераміка** повинна мати найбільшу величину діелектричної проникності з малою залежністю від температури, незначні втрати, найменшу залежність  $\epsilon$  і  $\text{tg}\delta$  від напруженості електричного поля, високі значення питомого об'ємного й поверхневого опорів і електричної міцності.

Приклади найбільш використовуваних видів конденсаторної сегнетокераміки наведені на рис.4.15.



T-900 - матеріал зі слабо вираженою залежністю  $\epsilon(T)$ ; CM-1 - матеріал зі згладженою залежністю  $\epsilon(T)$ ; T-8000 - матеріал з максимальним значенням  $\epsilon$

Рисунок 7.3 - Залежність діелектричної проникності  $\epsilon$  конденсаторних сегнетокерамічних матеріалів від температури

**Матеріали для варікондів** мають різко виражені нелінійні властивості; застосовуються для виготовлення нелінійних конденсаторів – варікондів. Основною кристалічною фазою в таких матеріалах є тверді розчини системи  $\text{Ba}(\text{Ti},\text{Sn})\text{O}_3$  або  $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr},\text{Sn})\text{O}_3$ .

**Сегнетоелектрики із ППГ.** Для запам'ятовувальних пристроїв необхідний матеріал з можливо більш прямокутною петлею гістерезису (ППГ), що характерно для монокристалів (наприклад, **тригліцинсульфату**). За відсутністю зовнішнього поля сегнетоелектрик із ППГ має два стійких стани, що відповідають різним напрямкам залишкової електричної індукції. Один із

цих станів у запам'ятовувальній комірці означає зберігання одиниці, а інший - зберігання нуля. Подаючи зовнішню напругу різної полярності, сегнетоелектрик можна переводити з одного стану в інший. На цьому засновані запис, зчитування й стирання інформації. Зчитування інформації можна здійснити без її руйнування, наприклад, оптичним методом або виміром опору тонкої напівпровідникової плівки, нанесеної на поверхні сегнетоелектрика.

**Електрооптичні кристали.** Кристали деяких сегнето- і антисегнетоелектриків мають сильно виражений електрооптичний ефект, під яким розуміють зміну показника переломлення світла в середовищі, викликану зовнішнім статичним електричним полем.

Електрооптичні властивості сегнетоелектричних кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання. Дія такого модулятора ґрунтується на залежності площини поляризації світлового променя, що проходить через кристал, від напруженості електричного поля, прикладеного до кристала.

Різноманітні конструкції електрооптичних модуляторів світла створені на базі кристалів **ніобату літію** ( $\text{LiNbO}_3$ ), **дігидрофосфату калію** ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) і його дейтерієвого аналога  $\text{KD}_2\text{PO}_4$  (дідейтерофосфат калію). Досить перспективне застосування в якості електрооптичного матеріалу прозорої сегнетокераміки системи ЦТСЛ - тверді розчини цирконату-титанату свинцю з окисом лантану.

У сегнетоелектриках електрооптичний ефект підсилюється з наближенням до точки фазового переходу (точки Кюрі). Це дає можливість досягнення ефективної модуляції світла невеликими напругами, якщо підтримувати температуру кристала поблизу точки Кюрі.

**Матеріали нелінійної оптики.** При впливі потужних світлових пучків, створюваних за допомогою лазерів, у багатьох сегнето- і антисегнетоелектриках проявляється нелінійна поляризація середовища, тобто залежність показника переломлення від напруженості поля самої світлової хвилі. Нелінійність оптичних властивостей дозволяє здійснити генерацію гармонік лазерного випромінювання, змішування й перетворення частот оптичних сигналів, перетворення інфрачервоного випромінювання лазерів (звичайно з  $\lambda=1,06$  мкм) у видиме світло. Високу ефективність такого перетворення забезпечують кристали  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiIO}_3$  (йодат літію),  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  і ін.

**Завдання:**

1. Нормально вектору напруженості однорідного електричного поля  $E_0 = 100$  В/м розташована пластина ізотропного діелектрика з діелектричною проникністю  $\epsilon = 2$ . Визначити: а) напруженість поля  $E$  и електричний зсув (електричну індукцію)  $D$  всередині пластини; б) поляризованість діелектрика  $P$  й поверхневу густину зв'язаних зарядів  $\sigma$ .

Розв'язання

а) Середнє макроскопічне електричне поле  $E$  в діелектрику в  $\epsilon$  раз менше зовнішнього:  $E = 100/2 = 50$  В/м. Для більшості діелектриків поляризованість пропорційна напруженості поля:

$$P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E = 8,85 \cdot 10^{-12}(2-1) \cdot 50 = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

В ізотропних діелектриках вектори напруженості електричного поля й поляризованості збігаються за напрямком, а електричний зсув

$$D = \epsilon_0 \epsilon E + P = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 50 + 4,42 \cdot 10^{-10} = 8,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

б) Поляризованість однорідного плоского діелектрика в рівномірному електричному полі дорівнює поверхневій густині зв'язаних зарядів:

$$\sigma = P = 4,42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

2. При зміні температури від 60 до 127 °С питомий опір радіофарфору зменшується від  $\rho_1 = 10^{13}$  Ом·м до  $\rho_2 = 10^{11}$  Ом·м. Визначити температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_p$ , вважаючи його постійним у розглянутому діапазоні температур і питомий опір матеріалу при кімнатній температурі.

Розв'язання

Постійність температурного коефіцієнта питомого опору означає експоненційну залежність

$$\rho(T): \rho = a^\alpha \rho / T.$$

$$\alpha_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{127 - 60} \ln \frac{10^{11}}{10^{13}} = -0,0687 \text{ К}^{-1};$$

$$\rho_2 = \rho_1 / e^{\alpha_p \Delta T} = 10^{13} / e^{-0,0687(60-20)} = 1,56 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

3. У дисковому керамічному конденсаторі ємністю  $C = 100$  пФ, включеному на змінну напругу  $U = 100$  В частотою  $f = 1$  МГц, розсіюється потужність  $P_a = 10^{-3}$  Вт. Визначити реактивну потужність, тангенс кута діелектричних втрат і добротність конденсатора.



4. За тих самих умов, що й у попереднім завданні, визначити питомі втрати в діелектрику, якщо його діелектрична проникність  $\varepsilon = 150$ , електрична міцність  $E_{пр} = 10$  МВ/м і запас по електричній міцності  $K = 10$ .

Розв'язання

Питомі втрати:  $p = P_a/(Sh)$ , де  $S$  і  $h$  - площа обкладок і товщина діелектрика, відповідно. Товщину діелектрика знаходимо з умови забезпечення електричної міцності:

$$h = U \sqrt{2} K/E_{пр} = 100 \sqrt{2} \cdot 10 / (10 \cdot 10^6) = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Площа обкладок:

$$S = \frac{Ch}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}}{8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot 150 = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2,$$

$$p = 10^{-3} / (1,07 \cdot 10^{-5} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}) = 6,58 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3.$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### *Піроелектрики. Дослідження властивостей*

Піроелектричним ефектом називають зміну спонтанної поляризованості діелектриків при зміні температури.

Рівняння піроелектричного ефекту записують у вигляді  $-d\bar{P}_{cn} = \bar{p} \cdot dT$ , де  $\bar{P}_{cn}$  – вектор спонтанної поляризованості діелектрика, Кл/м<sup>2</sup>;  $\bar{p}$  – вектор піроелектричного коефіцієнта, Кл/(м<sup>2</sup>·К).

При незмінній температурі спонтанний електричний момент діелектрика скомпенсований вільними зарядами протилежного знака за рахунок процесів електропровідності або адсорбції заряджених частинок з навколишньої атмосфери. Зміна спонтанної поляризованості супроводжується звільненням деякого заряду на поверхні діелектрика, завдяки чому в замкнутому ланцюзі виникає електричний струм.

Якість піроелектричного матеріалу характеризують параметром  $R_v = p/(\varepsilon C)$ , де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність;  $C$  - питома об'ємна теплоємність, Дж/(К·м<sup>3</sup>). Чим більше значення  $R_v$ , тим більшу різницю потенціалів можна одержати на зразку при одній і тій самій потужності, що поглинається.

Піроелектричні властивості мають деякі лінійні діелектрики (наприклад, **турмалін, сульфат літію**) і всі сегнетоелектричні матеріали. Особливість лінійних піроелектриків полягає в тому, що в них, на відміну від сегнетоелектриків, напрямок спонтанної поляризованості не може змінюватися за допомогою зовнішнього електричного поля.

Сегнетоелектрики проявляють піроелектричні властивості тільки в монодоменованому стані, тобто при однаковій орієнтації спонтанної поляризованості всіх доменів. У полідоменовому зразку сумарна поляризованість дорівнює нулю, і тому піроефект відсутній. Монодоменовація сегнетоелектрика здійснюється шляхом витримки його в постійному електричному полі при температурі трохи нижче точки Кюрі.

Значний піроефект у сегнетоелектриках використовується для створення теплових датчиків і приймачів променистої енергії, призначених, зокрема, для реєстрації інфрачервоного й НВЧ випромінювання. Специфічною властивістю таких теплових фотоприймачів є відсутність вибіркості по спектрі випромінювання. Істотна перевага їх полягає в тому, що вони не вимагають охолодження при детектуванні випромінювання навіть у далекій інфрачервоній області спектра. Поряд із цим вони мають досить високу швидкість (здатні працювати в частотному інтервалі до 10 МГц), однак за чутливістю уступають напівпровідниковим фотоприймачам.

Максимальні значення піроелектричних коефіцієнтів мають сегнетоелектрики із точкою Кюрі, близькою до кімнатної температури: кристали **ніобату барію-стронцію** ( $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ), у яких  $p = (4 \dots 28) \cdot 10^{-4}$  Кл/(м<sup>2</sup>·К). Однак через їхню високу діелектричну проникність чутливість по напрузі  $R_v$  виявляється незначною.

Найбільш високі значення  $R_v$  ( $8,5 \cdot 10^{-12}$  м/В) мають кристали **тригліцинсульфату** (ТГС). Цей матеріал широко використовується в низькочастотних детекторах випромінювання. Недоліком ТГС є його гігроскопічність, що обумовлює необхідність його спеціальної герметизації в практичних пристроях.

Підвищеною чутливістю на високих частотах характеризуються кристали  $\text{LiNbO}_3$  і  $\text{LiTaO}_3$ , що відрізняються стабільністю піроелектричних властивостей. Завдяки високій температурі Кюрі вони не вимагають спеціальних прийомів закріплення монодоменованого стану й можуть стійко працювати до температур порядку 500 °С.

Піроелектричний ефект проявляється й у поляризованій сегнетокераміці, хоча її піроелектричні властивості помітно гірші, ніж у монокристалів. Для виготовлення фотоприймачів можна використовувати всі

види п'езокераміки, однак найбільш придатним матеріалом для цих цілей є кераміка ЦТСЛ.

Піро- і п'езоелектричні властивості виявлені в деяких полімерів, зокрема, у поляризованих плівок **полівінілденфториду** й **полівінілденхлориду**. Вони характеризуються простотою технології, невисокою вартістю, малою інерційністю піроефекта на високих частотах.

### *Електрети*

**Електретом** називають тіло з діелектрика, що довгостроково зберігає поляризацію й електричне поле, яке воно створює в навколишньому просторі, тобто електрет є формальним електричним аналогом постійного магніту.

Електрети, що виготовляють з охолодженого в сильному електричному полі розплаву полярних діелектриків (наприклад, пальмового воску й каніфолі) називають **термоелектретами**. Термоелектрети здатні створювати електричне поле в навколишньому просторі протягом багатьох місяців і навіть років.

**Фотоелектрети** виготовляються з матеріалів, що мають фотоелектропровідність (сірка, сульфід кадмію й ін.), при одночасному впливі світла й електричного поля. Фотоелектрети можуть довгостроково зберігати заряди в темряві й швидко розряджаються на світлі.

**Електроелектрети** утворюються при впливі на діелектрик тільки електричного поля без нагрівання або опромінення. Поверхнева густина зарядів може становити  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>, а час життя - десятки років.

Найбільше практичне застосування знаходять електрети на основі полімерних плівок (політетрафторетилен, полікарбонат і ін.). В умовах підвищеної вологості найбільш стабільними є електрети з політетрафторетилену. У перетворювачах звичайно застосовують полімерні плівки товщиною 3...20 мкм, металізовані з однієї сторони.

Електрети можуть бути використані для виготовлення мікрофонів і телефонів, виміру механічних вібрацій, як пиловловлювачі, для дозиметрів радіації, вимірників атмосферного тиску й вологості, електрометрів, у клавішних обчислювальних машинах, в електрофотографії, в медичних сенсорах і т. д.

### *Рідкі кристали*

Рідкими кристалами називають такі речовини, які перебувають у проміжному (мезоморфному) стані між ізотропною рідиною й твердим кристалічним тілом. З одного боку, вони мають плинність, здатність перебувати в краплевидному стані, а з іншого боку - для них характерна анізотропія властивостей, насамперед, оптична анізотропія. Сильна залежність властивостей рідких кристалів від зовнішніх факторів (температури, тиску, електричного поля й ін.) використовується при розробці індикаторних пристроїв.

Рідиннокристалічний стан утворюють в основному органічні сполуки, наприклад, сполуки ароматичного ряду, молекули яких містять бензольні кільця.

Якщо плоский шар рідкого кристала освітлювати білим світлом, то у відбитому світлі він буде здаватися забарвленим, причому колір може змінюватися залежно від кута спостереження.

При зміні температури змінюється відстань між молекулярними шарами рідкого кристала, відповідно змінюється довжина хвилі  $\lambda_0$  максимального розсіювання при заданому куті спостереження. В результаті виходить кольорний термометр, що знайшов різні застосування. Зміну кольорів текстури при зміні температури називають **термохромним ефектом**.

За допомогою деяких рідиннокристалічних індикаторів можна зареєструвати зміни температури в тисячні частки градуса. Колірні термоіндикатори з успіхом застосовуються для цілей технічної й медичної діагностики. Вони дозволяють дуже просто відтворити картину теплового поля у вигляді кольорової діаграми. Цей же принцип використовується для візуалізації інфрачервоного випромінювання й полів НВЧ.

Для управління світловим променем і для візуального відображення інформації використовують електрооптичні ефекти в деяких рідких кристалах. Як і в сегнетоелектриках, весь об'єм такого рідкого кристала розбивається на невеликі домени, що розрізняються напрямком переважної орієнтації, внаслідок чого виникає оптична неоднорідність середовища й спостерігається сильне розсіювання світла. Такий рідкий кристал у відбитому й проходячому світлі виглядає мутним.

За електричними властивостями багато з рідких кристалів є полярними діелектриками з невисоким питомим опором ( $\rho = 10^6 \dots 10^{10}$  Ом·м), значення якого можна легко регулювати розчиненням дисоціюючих іонних сполук.

Властивості рідких кристалів використовуються в електрооптичних комірках для управління світловим потоком, для створення пристроїв відображення інформації

Для створення кольорових зображень у рідкі кристали вводять молекули барвника, спектр поглинання яких є функцією їхньої орієнтації щодо напрямку поляризації падаючого світла. Зовнішнє поле змінює статичну орієнтацію молекул, відповідно змінюється спектр поглинання лінійно поляризованого світла й обумовлений їм колірний контраст електрооптичної комірки.

Індикаторні пристрої на рідких кристалах - це дисплеї, крупноформатні табло, цифрові індикатори для мікрокомп'ютерів, циферблати електронних годинників і цифрових вимірювальних приладів. Основними перевагами таких індикаторів є: а) хороший контраст при яскравому освітленні; б) низька споживана потужність; в) сумісність із інтегральними схемами за робочими параметрами і конструктивному виконанню; г) порівняльна простота виготовлення й низька вартість.

Перевагою рідких кристалів є те, що для індикації використовується навколишнє світло, завдяки чому їхня споживана потужність значно менше, ніж в інших індикаторних пристроях і становить  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>. Це на кілька порядків нижче, ніж у світлодіодах, порошкових і плівкових електролюмінофорах, а також у газорозрядних індикаторах. Принциповими недоліками пристроїв на рідких кристалах є невисока швидкодія, а також схильність до процесів електро- і фотохімічного старіння.

### *Матеріали для твердотільних лазерів*

Лазер (Light amplification by stimulated emission of radiation – laser) є джерелом оптичного когерентного випромінювання, що характеризується високою спрямованістю й великою густиною енергії.

В основі принципу дії лазерів лежить відкрите А. Ейнштейном явище змушеного (стимульованого) випромінювання. Воно полягає в практично одночасному випусненні погоджених за частотою й напрямком електромагнітних хвиль (фотонів) величезною кількістю атомів (або молекул) під дією зовнішнього електромагнітного поля.

Основними елементами лазерів на твердих діелектриках є активне середовище (робоче тіло), оптичний резонатор і система оптичного накачування. Активним середовищем служить кристалічна або скловидна матриця, у якій рівномірно розподілені активні іони (активатори люмінесценції).

Всі процеси поглинання й випромінювання світла пов'язані з переходами електронів між рівнями активного іона; при цьому матриця відіграє пасивну роль. Спектр випромінювання лазера в основному

визначається типом активного іона - найчастіше тривалентними іонами  $\text{Nd}^{3+}$  (табл. 4.3).

Таблиця 8.1 – Властивості матеріалів для твердотільних лазерів

Активний матеріал	Матриця	Активатор	Концентрація активатора, мол. %	$\lambda$ генерації, мкм	Показник переломлення світла	К.к.д., %
Рубін	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}^{3+}$	0,03...0,05	0,694	1,76	1
Ітрій-алюмінієвий гранат з неодимом	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$\text{Nd}^{3+}$	1...3	1,06	1,83	5...7
Алюмінат ітрію з неодимом	$\text{YAlO}_3$	$\text{Nd}^{3+}$	3	1,06	1,95	1
Натрій-лантан-молібдат з неодимом	$\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$	$\text{Nd}^{3+}$	2	1,06	1,82	2,5
Флюорит з діспрозієм	$\text{CaF}_2$	$\text{Dy}^{2+}$	0,02	2,36	1,42	2
Шеєліт з неодимом	$\text{CaWO}_4$	$\text{Nd}^{3+}$	2	1,06	1,92	1,7
Скло з неодимом	скло	$\text{Nd}^{3+}$	2...6	1,06	1,55	5...6

Незважаючи на те, що матриця не бере участь у процесах генерації коливань, багато фізичних властивостей активного середовища визначаються саме матрицею.

Одним з найбільш освоєних матеріалів лазерної техніки є **рубін** (табл. 8.1). Саме на рубіні в 1960 р. був створений перший твердотільний лазер.

**Рубінами** називають кристали  $\alpha$ -корунду ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), у яких частина іонів алюмінію замінена іонами хрому - зі вмістом  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \approx 0,05$  мас. % (концентрація іонів хрому  $1,6 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ , рожеві рубіни), та більше 0,5 мас. % (червоний рубін). Чисті монокристали  $\alpha$ -корунду оптично прозорі в діапазоні 0,17...6,5 мкм. Кристал рубіна має оптичну анізотропію, симетрія кристала -

ромбобрична. Перевагами рубіна є високі механічна міцність і теплопровідність.

Штучні кристали рубіна звичайно вирощують у печах за методом Вернейля. Високоякісні кристали рубіна можуть бути виготовлені за методом витягування з розплаву або за гідротермальним методом.

Поряд з рубіном найважливішим матеріалом лазерної техніки є **ітрій-алюмінієвий гранат** (табл. 4.3), у кристалічній решітці якого частина іонів ітрію заміщена іонами неодиму (скорочений запис ІАГ: Nd<sup>3+</sup>). Низька гранична енергія збудження при кімнатній температурі, висока механічна міцність і висока теплопровідність дають можливість застосовувати цей матеріал у лазерах, що працюють у безперервному й високочастотному режимах. Досить важливі високі експлуатаційні характеристики ІАГ:Nd-лазерів - температурна й радіаційна стійкість. Кристали ІАГ оптично ізотропні й прозорі в спектральному діапазоні 0,2...4 мкм.

Основні переваги **стекла** (табл. 4.3), використовуваних у лазерах, перед монокристалами полягають у їхній високій технологічності, оптичній однорідності, ізотропності властивостей. Зі скла порівняно легко виготовити однорідні стрижні великого розміру, що необхідно для досягнення високої вихідної потужності лазерного випромінювання. Однак стекла в порівнянні з монокристалами мають невисоку теплопровідність, що створює додаткові труднощі для здійснення безперервного режиму генерації. Тому лазери на склі краще підходять для генерації імпульсів з високою енергією випромінювання.

Подвійне перетворення енергії (електрика - світло - когерентне випромінювання) практично виключає досягнення високого коефіцієнта корисної дії твердотільних лазерів, тим більше, що джерела накачування мають розмитий спектр і збудження активних іонів відбувається лише в невеликій частині цього спектра.

Лазери знаходять застосування в системах оптичної локації, у телебаченні, голографії, інформаційно-вимірвальній техніці, у медицині. З їхньою допомогою здійснюється далекий космічний зв'язок. Широко поширена лазерна обробка оптично непрозорих матеріалів: імпульсне зварювання, плавлення, паяння, відпал, свердлення отворів, різання й ін.

### **Питання для самоперевірки**

6. Що називають поляризацією діелектрика? Які види поляризації можна вважати миттєвими, а які є вповільненими?

7. У чому полягає розходження між іонною й іонно-релаксаційною поляризаціями? Що розуміють під лінійними й нелінійними, полярними й

неполярними діелектриками?

8. У яких одиницях вимірюють питомий об'ємний й питомий поверхневий опори діелектриків? Дайте визначення цим фізичним величинам.

5. Який механізм електропровідності твердих діелектриків? Як впливає температура на їхню питому провідність?

6. Що називають діелектричними втратами? Які механізми діелектричних втрат вам відомі?

7. У яких діелектриках і при яких умовах важливу роль відіграють втрати на іонізацію?

8. Чому ударна іонізація молекул газу в сильному електричному полі визначається головним чином електронами, а не іонами?

9. Які механізми пробоя твердих діелектриків вам відомі? Які умови прояву кожного з них?

10. Яким чином можна класифікувати діелектрики за властивостями і технічному призначенню?

11. Чим розрізняються властивості лінійних і просторових полімерів?

12. Які полімери використовуються на високих частотах й чому?

13. Як і для яких цілей роблять вироби з композиційних пластмас?

14. Які види стекел знайшли найбільш широке застосування в електронній техніці й для яких цілей?

15. У чому подібність і розходження між ситалом і склом, для яких цілей ситали застосовуються?

16. Наведіть приклади установочних і конденсаторних керамічних діелектриків. Назвіть найбільш характерні області їхнього застосування.

17. Які діелектрики називають активними? У чому розходження вимог до активних і пасивних діелектриків?

18. Яка електрична впорядкованість властива сегнетоелектрикам?

19. Як пояснити діелектричний гістерезис і нелінійність залежності заряду від напруги в сегнетоелектриків?

20. Що називають сегнетоелектричною точкою Кюрі?

21. Назвіть найбільш важливі застосування сегнетоелектриків.

22. Що таке прямий і зворотний п'єзо ефект? У яких діелектриках можна спостерігати ці явища?

23. У чому переваги п'єзокераміки перед монокристалічними п'єзоелектриками?

24. Що таке піроелектричний ефект? Як застосовуються піроелектрики?

25. Що таке електрети? Як вони використовуються?

26. В чому розходження між рідкою речовиною й «рідким кристалом»?

27. Для яких цілей застосовуються рідкі кристали в електронній техніці?



28. Які основні вимоги ставлять до діелектрика як лазерного матеріала?  
 29. Які переваги та недоліки мають твердотільні лазери порівняно з напівпровідниковими?

### Задачі

1. Тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  неполярного діелектрика на частоті 50 Гц дорівнює  $10^{-3}$ . Обчислити активну потужність розсіювання  $P_a$  у конденсаторі із цього діелектрика на частоті  $f = 1$  кГц при напрузі 1 кВ, якщо ємність конденсатора  $C$  дорівнює 1000 пФ.

2. Визначити питомі діелектричні втрати в плоскому конденсаторі, виготовленому із плівки полістиролу товщиною 20 мкм, якщо на конденсатор подана напруга 2 В частотою 2 МГц (для полістиролу  $\varepsilon = 2,5$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ ).

3. Плівка полівінілхлориду при електричному пробі руйнується при напрузі 1,5 кВ. Визначити товщину плівки, якщо її електрична міцність дорівнює 50 МВ/м.

4. Як і чому зміниться пробивна напруга повітря при нормальному атмосферному тиску, якщо температуру підвищити від 20 до 100 °С?

Розв'язання

Відомо, що пробивна напруга повітря поблизу нормального атмосферного тиску ( $p_0 = 0,1$  МПа)  $U_{пр} = U_{пр0} \cdot \delta$ , де  $U_{пр0}$  - пробивна напруга в нормальних умовах ( $p = 0,1$  МПа;  $T_0 = 293$  К).

З іншого боку, з рівняння Менделєєва - Клапейрона випливає:

$$p = \frac{m}{M}, \text{ звідки } \frac{m}{V} = d = \frac{pM}{RT}, \text{ де } m - \text{ маса; } M - \text{ молярна маса; } R$$

- універсальна газова константа.

Зміна відносної густини газу  $\delta = d_1/d_0 = T_0/T_1 = 293/373 = 0,785$ , тобто якщо підвищити температуру від 293 до 373К, то при нормальному атмосферному тиску пробивна напруга повітря зменшиться в 1,27 рази.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Попик Ю.В. Фізика напівпровідників : підруч. для студ. вищ. навч. закл. затв. МОНУ. Ужгород : ТОВ "ІВА", 2014., 820с., 1 прим.
2. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство : [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с. Савчин В.П., Шувар Р.Я. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах : навч. посіб. рек. МОНУ. Львів : ЛНУ ім. І.Франка, 2008, 1 прим.
3. Прохоров Е.Д. Твердотіла електроніка : навч. посіб. Харків : ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2007, 1 прим.
4. Попик Т.Ю., Хархаліс Л.Ю., Попик Ю.В. Фізика напівпровідників : лабораторний практикум (навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.) Ужгород : ІВА, 2015, 1 прим.
5. Шека Д. Д. Основи магнетизму: Методичний посібник для магістрів природничих спеціальностей університету — К.: КНУ, 2012.-74 с.
6. Журавльова Л.В., Бондар В.М. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: Грамота, 2006. –312 с.
7. Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики: навчальний посібник. Ч.1 : Електромагнітні елементи аналогових пристроїв / А. С. Васюра. – Вінниця: ВДТУ, 2000. – 146 с.