

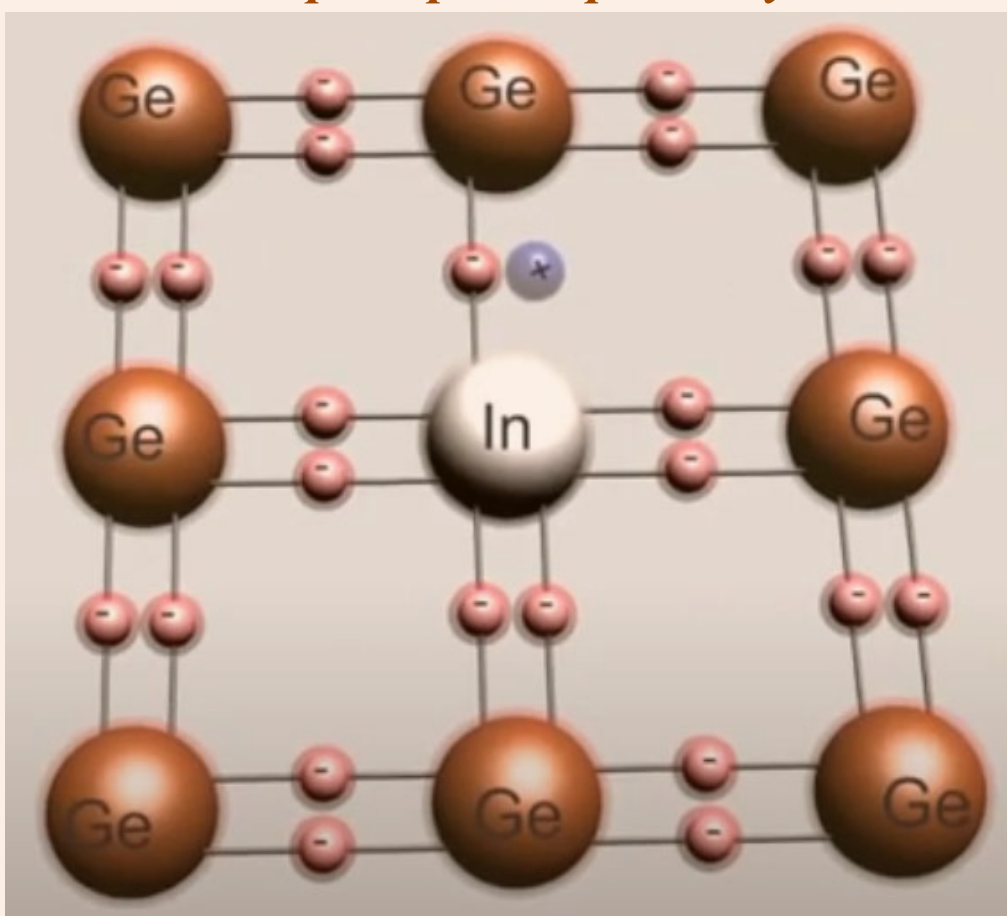
Волинський національний університет імені Лесі Українки

Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

Новосад О. В.

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНИКИ

Лабораторний практикум



Луцьк
2024

УДК 621.3

Н-72

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки.

(протокол № 2 від 16 жовтня 2024 р.)

Рецензент:

Трохимчук П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки

Н-72 Новосад О. В. **Елементна база напівпровідникової електроніки:** лабораторний практикум. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2024. 84 с.

У навчально-методичному виданні «Елементна база напівпровідникової електроніки: лабораторний практикум» поданий теоретичний матеріал для підготовки до лабораторних робіт з освітнього компонента «Елементна база напівпровідникової електроніки». Інструкції до лабораторних робіт та їх кількість були підготовлені згідно з силабусом освітнього компонента «Елементна база напівпровідникової електроніки» для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти технічних та природничих спеціальностей, які вивчають електроніку, елементну базу напівпровідникової електроніки.

УДК 621.3

© Новосад О. В.

© Волинський національний
університет імені Лесі Українки

Зміст

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Дослідження ВАХ та ВФХ діода	8
Лабораторна робота № 2. Дослідження фотодіодів та світлодіодів	14
Лабораторна робота № 3. Дослідження стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги.....	21
Лабораторна робота № 4. Дослідження біполярного транзистора	26
Лабораторна робота № 5. Дослідження статичних характеристик польових транзисторів	32
Лабораторна робота № 6. Дослідження варикапів	44
Лабораторна робота № 7. Дослідження тиристорів.....	50
Лабораторна робота № 8. Дослідження еквівалентів напівпровідникових елементів приладів з від’ємним диференціальним опором	57
Лабораторна робота № 9. Тунельний діод і резонансний генератор на його основі	63
Лабораторна робота № 10. Дослідження мікросхем для керування напівпровідниковим цифро-буквеним індикатором.....	72
Рекомендована література та інтернет ресурси	82

Вступ

Лабораторний практикум з освітнього компонента «Елементна база напівпровідникової електроніки» для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня освіти спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» передбачає виконання лабораторних робіт, описаних у даному навчально-методичному виданні. Теоретичні відомості до кожної лабораторної роботи дають мінімальні відомості про досліджуваний елемент напівпровідникової електроніки, електронне явище, фізичний об'єкт, електронну систему, яких достатньо для підготовки та проведення відповідного експериментального дослідження. Переважна частина запропонованих лабораторних робіт передбачена також для здобувачів освіти природничих та технічних спеціальностей університету, які можуть використовувати описи та завдання, корегуючи умови їхнього виконання у відповідності до вказівок викладача.

В інструкціях до лабораторних робіт висвітлюється мета досліджень, що здійснюються у даній роботі, поданий детальний опис приладів та обладнання, описаний порядок виконання роботи, наведено зразки таблиць для запису результатів вимірювань і розрахунків, а також контрольні запитання. В окремих роботах подано перелік необхідних дій. Щоб підготуватися до виконання лабораторної роботи і знайти відповіді на контрольні запитання, які можуть бути поставлені викладачем під час допуску до виконання роботи або зарахування результатів дослідження, необхідно ґрунтовно опрацювати теоретичні відомості до лабораторної роботи та лекційний матеріал. За потреби для глибшого вивчення відповідного явища можна використати інформаційні джерела, список яких подано в кінці навчального посібника.

Основна спрямованість навчально-методичного видання - дати можливість студентам за допомогою досліду вивчити фізичні явища та процеси в електронних приладах та ситемах. Представлені інструкції до лабораторних робіт не претендують на те, щоб створити у здобувачів освіти повне уявлення про системи та процеси, які вивчаються. Таке уявлення у здобувачів освіти може сформуватись лише після опрацювання лекційного матеріалу та додаткових

літературних та інтернет-джерел. Для успішного виконання лабораторної роботи необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Перед заняттям здобувач освіти повинен підготувати протокол лабораторної роботи та вивчити відповідні теоретичні відомості.

Під час безпосереднього виконання роботи здобувачі освіти отримують допуск до лабораторної роботи, проводять необхідні дослідження та вимірювання, виконують розрахунки, роблять висновки.

Результати досліджень обговорюються з викладачем та затверджуються ним. Звіт до лабораторної роботи повинен містити титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і матеріалів, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірювань та розрахунки, висновки. Графіки потрібно виконувати на міліметровому папері, при оформленні звіту дозволяється використовувати прикладні програми для розрахунку та побудови графіків (Excel, Origin і т.д.).

Інструкція з охорони праці

1. Інструкція з охорони поширюється на всіх учасників навчально-виховного процесу під час проведення занять (демонстраційних дослідів, лабораторних і практичних робіт).

2. Відповідно до Правил безпеки під час проведення навчально-виховного процесу в лабораторіях студенти проходять інструктаж із безпеки праці та навчання, надання першої (долікарської) допомоги при характерних ушкодженнях, який проводить викладач фізики перед початком занять у лабораторії і який реєструється в журналі.

3. До роботи в лабораторії допускаються лише особи, обізнані з інструкцією і правилами з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

4. Вивчивши зміст інструкції, студент розписується в журналі з охорони праці та безпеки життєдіяльності і несе відповідальність за її виконання.

5. Під час роботи в лабораторії будьте обережними, дотримуйтеся порядку і чистоти на робочому місці, виконуйте правила техніки безпеки. Безладність,

поспішність, недбалість у роботі й порушення правил охорони праці та безпеки життєдіяльності можуть призвести до нещасних випадків.

6. Перед початком роботи переконайтеся в наявності та робочому стані всіх частин досліджуваних установок.

7. Лабораторну роботу категорично забороняється виконувати без дозволу викладача.

8. Забороняється виконання лабораторних робіт у випадку відсутності викладача або лаборанта, який відповідає за лабораторію.

9. Не можна торкатися до неізольованих частин електричних установок, оголених провідників, які перебувають під напругою.

10. Не слід самостійно робити будь-які сполучення на головному розподільному щиті.

11. Ставити і замінити плавкі запобіжники в установках і приладах можна лише з дозволу керівника при вимкнутій напрузі.

12. Складати коло за схемою можна тільки при вимкнутій напрузі.

13. Вмикати напругу в колі за складеною схемою можна лише з дозволу викладача.

14. Здійснюйте надійне кріплення електричних провідників лабораторних установок.

15. Чітко виконуйте правила охорони праці та безпеки життєдіяльності, вказані в інструкціях до лабораторних робіт і приладів.

16. Не відволікайтесь самі і не відволікайте інших від роботи сторонніми розмовами.

17. Виконувати роботи, не пов'язані із завданням і не доручені викладачем, забороняється.

18. Не переставляйте і не переносьте прилади і матеріали з одного робочого місця на інше.

19. Під час заняття забороняється ходити по лабораторії.

20. Якщо під час роботи установка чи прилад вийшли з ладу, відбулась поломка чи розбиття приладу, про це негайно треба повідомити керівника

заняття.

21. У випадку ураження струмом потрібно негайно вимкнути вимикач на головному розподільному щиті, щоб звільнити потерпілого від електричного струму, повідомити керівника та організувати першу допомогу, одночасно викликавши швидку медичну допомогу. (Тел. 103.)

Правила безпеки при роботі з електричними колами

У лабораторії необхідно строго дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з електричними приладами та колами.

1. Під час лабораторної роботи потрібно бути уважним при використанні приладів. Перш ніж користуватися приладом, необхідно вивчити його будову і правила роботи з ним. Про несправність приладів необхідно повідомити викладача або лаборанта.

2. Зібрану електричну схему можна підключати до джерела струму тільки після її перевірки викладачем або лаборантом.

3. Не робити перемикань в схемі, яка знаходиться під напругою.

4. Не залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.

5. Не торкатися до неізольованих частин схеми.

6. При виявленні нагріву окремих частин електричної схеми, а тим більше при появі запаху гару, джерело струму слід негайно відключити і повідомити викладача.

7. Після закінчення вимірювань треба відключити джерело струму.

8. Після закінчення розрахунків та перегляду отриманих результатів викладачем електричне коло розібрати, робоче місце привести в порядок.

Лабораторна робота № 1. **Дослідження ВАХ та ВФХ діода**

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії напівпровідникового діода та дослідити його вольт-амперні та вольт-фарадні характеристики.

Прилади і матеріали: установка для вивчення *p-n*-переходу ФПК-06, діоди.

Теоретичні відомості

До напівпровідників належать речовини, які по електропровідності знаходяться між діелектриками (ізоляторами) і провідниками. Концентрація вільних носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах лежить в межах $10^{12} \leq n \leq 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Питома електропровідність напівпровідників менша від електропровідності металів ($10^8 - 10^6 \text{ См/м}$) і більша від електропровідності діелектриків ($10^{-9} - 10^{-22} \text{ См/м}$). Напівпровідники за своїми властивостями більш подібні до діелектриків, але й проявляють відмінні від металів властивості.

Особливістю напівпровідникових матеріалів є залежність їх питомого опору від величини електричного поля, від рівня опромінення світлом або іонізованими частинками, а також при внесенні у напівпровідник домішок або внаслідок його нагрівання, зміни тиску і т.д. При підвищенні температури питомий опір провідників зростає, а напівпровідників та діелектриків зменшується. Це вказує про різний механізм провідності в металах та напівпровідниках. Фізичні властивості напівпровідникових матеріалів залежать від зовнішніх факторів (температура, тиск, освітлення і т.д.).

Однорідні напівпровідники найчастіше використовують у напівпровідникових резисторах. Решта напівпровідникових приладів та елементів електронної техніки створено з неоднорідних структур. Основними серед таких неоднорідних структур є контакт двох напівпровідників різного типу провідності та контакт металу з напівпровідником.

Границю між двома напівпровідниками різного типу провідності називають *n-p*-переходом або електронно-дірковим переходом. Такий контакт різних матеріалів неможливо утворити простим дотиком пластин різного типу провідності, оскільки він буде забруднений водою, повітрям, різними оксидами і т. д. Найчастіше електронно-діркові переходи одержують дифузією або вплавленням відповідних домішок у монокристалічний напівпровідниковий зразок, вирощуванням електронно-діркового переходу з розплаву напівпровідника та іншими методами.

Фізичні властивості *n-p*-переходу залежать від його методу одержання, співвідношення концентрації донорних та акцепторних домішок, конструктивних особливостей.

Розглянемо *n-p*-перехід з однаковими концентраціями донорних та акцепторних домішок (рис. 1.1).

У напівпровідниках *n*-типу провідності вільними носіями заряду є електрони, а у напівпровідниках *p*-типу провідності вільними носіями електричного заряду є дірки. Вільні носії заряду, що знаходяться біля *n-p*-переходу, дифундують через *n-p*-перехід та взаємно рекомбінують. У результаті рекомбінації вільних носіїв заряду утворюється збіднений вільними носіями шар просторових зарядів. У реальних *n-p*-переходах товщина цього шару становить десяті частки мікрометра. У напівпровідниках *p*-типу провідності він утворюється негативно зарядженими іонами акцепторних домішок, а в напівпровідникових матеріалах *n*-типу провідності - додатньо зарядженими іонами донорних домішок. Електричне поле, утворене просторовими зарядами, перешкоджає дальшій дифузії вільних носіїв, оскільки в *n-p*-переході виникає потенціальний бар'єр φ_x величиною у кілька десятих вольт.

Напруженість електричного поля просторових зарядів напрямлене від позитивно заряджених іонів-донорів до негативно заряджених іонів-акцепторів, саме тому це електричне поле прискорює рух неосновних носіїв заряду та гальмує рух основних носіїв заряду. Тому електрони, що перейшли в напівпровідник *p*-типу з напівпровідника *n*-типу провідності, потрапляють в

електричне поле, яке намагається повернути їх в напівпровідник n -типу. Аналогічним чином дірки відштовхуються полем у напівпровідник p -типу. Саме завдяки наявності збідненого вільними носіями заряду шару товщиною L , електропровідність n - p -переходу зменшується відносно до електропровідності решти напівпровідникової структури. Наявність просторового заряду та електричного поля, яке обумовлюється цим зарядом, робить електропровідність n - p -переходу залежною від напрямку вектора напруженості електричного поля.

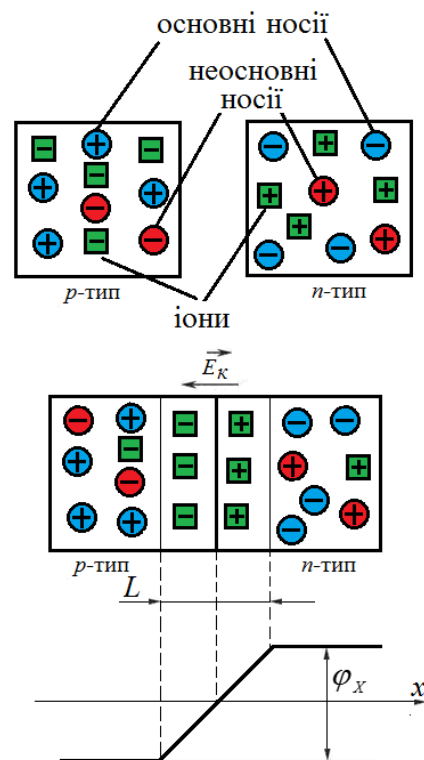


Рис. 1.1. Потенціальний бар'єр в n - p -переході

Слід враховувати, що у напівпровідникових матеріалах неперервно утворюються та рекомбінують «теплі» електронно-діркові пари. Ці електронно-діркові пари постійно створюють певну кількість неосновних носіїв заряду. Перед тим, як рекомбінувати з основними носіями заряду, неосновні носії заряду, які знаходяться поблизу n - p -переходу, можуть потрапити в електричне поле потенціального бар'єру та обумовити дрейфовий струм. За відсутності зовнішніх впливів дрейфовий струм буде компенсуватися дифузійним струмом основних носіїв заряду. Тобто через деякий час встановиться динамічна рівновага n - p -переходу.

Якщо до n - p -переходу прикласти зовнішнє електричне поле, то через n - p -перехід буде проходити електричний струм, величина сили струму залежить від напрямку прикладеного електричного поля (рис. 1.2).

Під дією зовнішнього електричного поля напруженістю E , яке напрямлене проти електричного поля потенціального бар'єра (рис. 1.2, а), висота потенціального бар'єру буде поступово зменшуватись, в результаті чого потенціальний бар'єр зникне взагалі. Основні носії будуть рухатися до p - n -переходу, товщина p - n -переходу та опір зменшиться. Носії заряду, які подолали p - n -перехід, стають неосновними та рекомбінують з основними носіями заряду напівпровідника, до якого вони дифундували. Поповнення основними носіями заряду, які рекомбінували, здійснюється із зовнішнього кола: через n - p -перехід проходить прямий дифузійний струм. Збільшення зовнішньої напруги обумовлює експоненційне зростання прямого струму зі зростанням напруги, (рис. 1.2, в крива 1). Таке ввімкнення n - p -переходу (рис. 1.2, а) називається прямим.

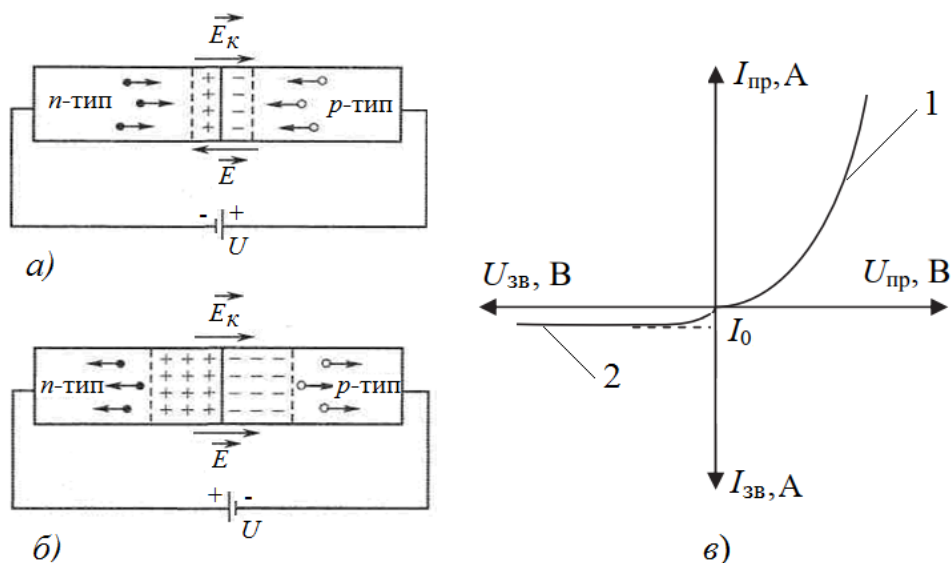


Рис. 1.2. Пряме (а) та зворотнє (б) підключення n - p -переходу до зовнішнього джерела живлення та його ВАХ (в).

У випадку, коли зовнішнє електричне поле за напрямком співпадає з напрямком електричного поля потенціального бар'єру (рис. 1.2, б), то із зростанням його напруженості висота потенціального бар'єру також буде

збільшуватись. У результаті буде збільшуватись товщина зони (L), збідненої вільними носіями, що, в свою чергу, обумовить зростання електричного опору p - n -переходу. Кількість основних носіїв зряду, які зможуть подолати дію такого електричного поля, буде зменшуватися, відповідно буде зменшуватися і дифузійний струм основних носіїв заряду. Основні носії під дією зовнішнього поля відтягуються від приконтактних шарів у глибину кристалу. Неосновні носії заряду будуть втягуватися полем в n - p -перехід, оскільки для них потенціальний бар'єр в n - p -переході відсутній. Таке вмикання p - n -переходу називають зворотним. Під час зворотного вмикання p - n -переходу основний дрейфовий струм, що утворюється неосновними носіями заряду, має мале значення, яке майже не залежить від зовнішньої напруги крива 2 (рис. 1.2, в), але сильно залежить від температури.

Отже, основною властивістю n - p -переходу є нелінійність його ВАХ та однобічна провідність (рис. 1.2, в).

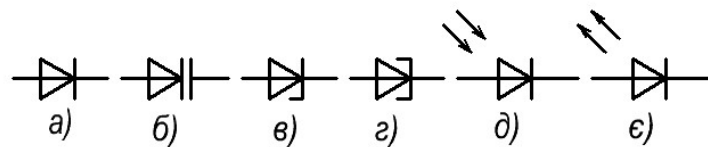


Рис. 1.3. Умовні позначення діодів: a – випрямний; b – варикап; v – стабілітрон; z – тунельний діод; d – фотодіод, e – світлодіод.

Напівпровідникові діоди - це прилади з двома виводами, які мають один електронно-дірковий перехід. Різні види діодів відрізняються матеріалом, з якого їх виготовлено, технологією виготовлення та конструкцією, що обумовлює різноманітність їхніх фізичних властивостей та параметрів, а також галузей застосування (рис. 1.3).

За основним матеріалом, з якого виготовлені діоди, найпоширенішими є германієві та кремнієві діоди; за конструкцією діоди поділяють на площинні та точкові; за технологією виробництва - сплавні, зварні, дифузійні; за умовами застосування - універсальні, високочастотні, імпульсні, випрямні. Крім того,

використовують спеціальні напівпровідникові діоди, в основі принципу дії яких лежить явище електричного пробою, тунельний ефект, тощо.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з паспортом до установки для вивчення $p-n$ -переходу ФПК-06 та порядком роботи за установкою.
2. Під'єднати панель із запропонованими діодами до установки ФПК-06.
3. Зняти ВАХ та ВФХ діодів згідно з п. 7. «Порядок роботи» паспорта установки для вивчення $p-n$ -переходу ФПК-06.
4. За результатами досліджень побудувати ВАХ та ВФХ.
5. Використовуючи табл. 1.1, ознайомитись з електричними параметрами напівпровідникових діодів.
6. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Таблиця 1.1. Електричні параметри напівпровідникових діодів

Тип діода	Граничний струм $I_{пр. max}, A$	Прямий спад напруги $U_{пр}, A$	Максимальна зворотна напруга $U_{зв. max}, B$	Зворотний струм $I_{зв}, mA$	Гранична частота, кГц
КД103А ... КД105В	0,1...0,3	1...1,2	30...600	0,05...0,3	1
Д226	0,3	1	400	0,3	50
Д202 ... Д205	0,4	1	100...400	0,5	50
КД202	1...5	0,8	50...600	0,9	5
Д242 ... Д284Б	5...10	1...1,5	100...600	3	1,2
Д9А ... Д9М	0,015...0,04	1	10...100	0,06...1	40 000
Д223 ... Д233Б	0,02...0,05	1	50...150	0,0005... 0,001	30 000
ГД402А ... ГД402Б	0,025	15	15	0,1	10 000

Контрольні запитання

1. Які речовини називаються напівпровідниками?
2. У чому відмінність між напівпровідниками n -типу та p -типу провідності?
3. Які домішки називають донорними та акцепторними?

4. Опишіть механізм утворення p - n -переходу.
5. Поясніть особливості ВАХ діода.
6. Які ви знаєте основні типи діодів?
7. Як на схемах електричних кіл позначають різні типи діодів?
8. Де використовують діоди?

Лабораторна робота № 2.

Дослідження фотодіодів та світлодіодів

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії фотодіодів, світлодіодів та оптопар. Дослідити їх основні властивості та параметри.

Прилади і матеріали: установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05, осцилограф, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Фотодіоди. Напівпровідниковий фотодіод - це діод, обернений струм якого залежить від рівня освітленості. Фотодіодом може бути напівпровідниковий діод з p - n -переходом, який включений у зворотному напрямку.

При поглинанні речовиною квантів світла в p - n -переході або в прилеглих до нього областях утворюються додаткові вільні носії заряду. Неосновні носії заряду, що генерувались в областях біля p - n -переходу на відстанях, що не перевищують дифузійної довжини, дифундують у p - n -перехід і проходять через нього під дією електричного поля. Внаслідок цього зростає зворотний струм при освітленні. Поглинання квантів світла в p - n переході обумовлює аналогічний результат. Величину, на яку збільшився зворотний струм, називають фотострумом.

На рис. 2.1 показано включення фотодіода. З рис. 2.1 видно, що напруга джерела живлення прикладена до фотодіода в зворотному напрямку. Коли на

фотодіод не потрапляє світло, то в колі проходить невеликий зворотній струм ($10 \cdot 10^{-6} - 20 \cdot 10^{-6}$ А для германієвих діодів і $1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6}$ А для кремнієвих діодів). Цей струм називають темновим струмом.

Фотодіоди можна включати в електричні кола як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода, коли він включений в електричне коло із зовнішнім джерелом живлення, називають фотодіодним, якщо джерело відсутнє, то режим роботи називають фотовентильним або генераторним.

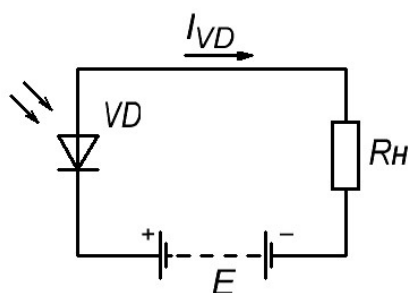


Рис. 2.1. Схема ввімнення фотодіода.

У фотовентильному режимі роботи у фотодіоді під дією світлового потоку виникає електрорушійна сила, тому він не потребує джерела живлення.

До основних характеристик фотодіода можна віднести:

1. Вольт-амперна характеристика ($I_d = f(U_d)$ при $\Phi = const$) - залежність струму фотодіода від напруги, прикладеної до нього при сталому значенні світлового потоку (рис. 2.2, а). За відсутності світлового потоку ($\Phi = 0$) через фотодіод проходить темновий струм. Зі зростанням світлового потоку I_d також зростатиме. Особливістю робочої ділянки ВАХ є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної до нього напруги. Такий режим настає при зворотних напругах на фотодіоді приблизно в 1 В. Оскільки темновий струм невисокий, то відношення сили струму при освітленні до темнового значення сили струму велике, що важливо при індикації рівня освітленості. Якщо зворотна напруга перевищить деяке допустиме значення, то в *p-n*-переході виникає

електричний пробій. Суть цього ефекту полягає в лавиноподібному утворенні носіїв заряду, що часто призводить до виходу фотодіода з ладу.

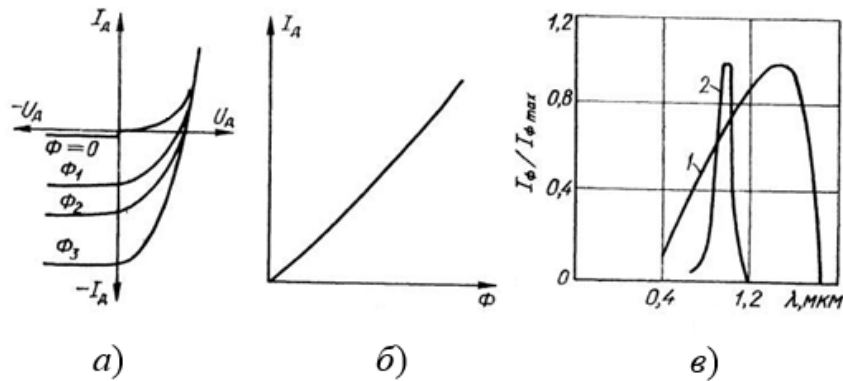


Рис. 2.2. Характеристики фотодіода: а) ВАХ при різних значеннях світлового потоку; б) світлова характеристика; в) спектральна характеристика (1 – германієвий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод).

2. Світлова характеристика фотодіода - залежність фотоструму в діоді від рівня освітленості. У значному діапазоні зміни світлового потоку світлова характеристика є лінійною (рис. 2.2, б). Цей ефект обумовлюється тим, що товщина бази фотодіода менша за дифузійну довжину неосновних носіїв заряду, відповідно майже всі неосновні носії заряду, що виникли в базі, будуть брати участь в утворенні фотоструму.

3. Спектральна характеристика фотодіода (рис. 2.2, в) - залежність величини фотоструму від довжини хвилі світла, яке опромінює фотодіод.

4. Стала часу фотодіода - час, протягом якого фотострум змінюється після освітлення або після затемнення фотодіода в e разів по відношенню до сталого значення.

5. Темновий опір – це електричний опір фотодіода при відсутності освітлення.

6. Інтегральна чутливість

$$K = I_{\phi} / \Phi,$$

де I_{ϕ} – фотострум, Φ – освітленість.

Світлодіоди. Світлодіод - напівпровідниковий діод, який випромінює некогерентне світло при проходженні через нього електричного струму (електролюмінесценція). Світло, яке випромінюється звичайними світлодіодами, лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу напівпровідникових матеріалів, з яких виготовлений світлодіод. Сучасні світлодіоди випромінюють світлові кванти в межах від інфрачервоної ділянки електромагнітного спектру до ультрафіолетової. Слід відмітити, що існують методи розширення смуги випромінювання та створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарення, які випромінюють світло широкого спектру рівномірно у всіх напрямках, звичайні світлодіоди випромінюють світлові кванти певної довжини хвилі та в певному напрямі.

Звичайні світлодіоди були вдосконалені до лазерних діодів принцип, дії яких такий самий як і фотодіода, але такі лазери можуть напрямлено випромінювати когерентне світло.

Як і у будь-якому діоді, у світлодіоді є також *p-n*-перехід. При проходженні електричного струму в прямому напрямку носії заряду рекомбінують, в результаті чого випромінюються кванти світла.

Слід відмітити, що не всі напівпровідникові кристали ефективно випромінюють світло під час рекомбінації носіїв заряду. Хорошими випромінювачами квантів світла є прямозонні напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад, InP або GaAs) і $A^{II}B^{VI}$ (наприклад, CdTe або ZnSe). Змінюючи компонентний склад напівпровідникових матеріалів, можна створювати світлодіоди, які випромінюють світло різних довжин хвиль, від ультрафіолетового (GaN) до середнього інфрачервоного (PbS).

Діоди виготовлені з непрямозонних напівпровідників (наприклад, Si, Ge, а також сплави SiGe, SiC та ін), світло майже не випромінюють. Варто відмітити, що, у зв'язку з добре розвинутою кремнієвої технологією, роботи зі створення світлодіодів на основі кремнію ведуться досить активно.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження світлодіодів.

1. Згідно з п. 6. паспорта до установки ФДСВ - 05, підготуйте лабораторне обладнання до досліджень.

2. Встановіть напругу живлення світлодіодів переведенням перемикача (поз. 5 рис. 2.3) в положення «-», регулятор «РІВЕНЬ» (поз. 4) переведіть за годинниковою стрілкою в крайнє положення.

3. За допомогою перемикача послідовно підключіть світлодіоди, розташовані на стенді (поз. 2, рис. 2.3).

4. Обертанням регулятора «РІВЕНЬ» проведіть дослідження залежності сили світла від прямого струму через світлодіод.

Завдання 2. Дослідження ВАХ світлодіодів.

1. Переведенням перемикача (поз. 5 рис. 2.3) у положення «ВАХ» встановіть двополярну лінійно наростаючу напругу живлення світлодіодів.

2. Під'єднати осцилограф. Використати «Y» вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки ФДСВ – 05. Осцилограф підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 3 рис. 2.3).

3. За допомогою перемикача (поз. 2 рис. 2.3) вибрати потрібний світлодіод.

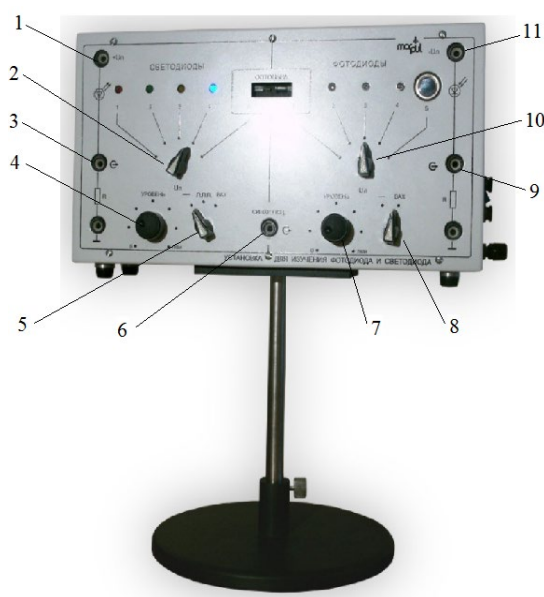


Рис. 2.3. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.

4. На осцилографі отримайте ВАХ вибраного світлодіода у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана та масштабом по горизонтальній осі 0,5 В/под.

Завдання 3. Дослідження фотодіодів.

1. Переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «-» регулятор «РІВЕНЬ» (поз. 7) переводиться в середнє положення.

2. Під'єднати осцилограф. Використати «У» вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки ФДСВ – 05. Осцилограф підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 3 рис. 2.3).

3. За допомогою перемикача (поз. 10 рис. 2.3) послідовно вибираються фотодіоди, розташовані на стенді.

4. Якщо фотодіод закритий непрозорим предметом, то осцилограф показує відсутність струму або деякий початковий зворотній струм через опір навантаження у колі фотодіода.

5. Освітїть досліджуваний фотодіод зовнішнім джерелом світла. При цьому осцилограф покаже збільшення зворотного струму. Наближенням джерела світлового випромінювання до фотодіода дослідити збільшення зворотного струму зі збільшенням рівня освітлення.

6. Переконайтеся, що при однаковому рівні освітлення різні фотодіоди пропускають різні струми через опір навантаження, тобто фотодіоди мають різну струмову інтегральну чутливість.

Завдання 4. Дослідження ВАХ фотодіодів.

1. Переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «ВАХ» встановіть двохполярну лінійно наростаючу напругу живлення фотодіодів.

2. Під'єднати осцилограф. Використати «У» вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки ФДСВ – 05. Осцилограф підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 3 рис. 2.3).

3. На осцилографі отримати ВАХ у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана. Масштаб по горизонталі вибрати 0,5 В/под.

4. За допомогою перемикача (поз. 10 рис. 2.3) вибрати потрібний фотодіод.

5. Наближаючи джерело світла до фотодіода, дослідити зміну зворотної вітки ВАХ.

Завдання 5. Дослідження оптрона.

1. Встановіть напругу живлення світлодіодів періодичними прямокутними імпульсами. Для цього переведіть перемикач (поз. 5 рис. 2.3) у положення «_ _ _ _». Регулятор «РІВЕНЬ» світлодіодів переведіть у крайнє положення за годинниковою стрілкою. Перемикачем (поз. 2 рис. 2.3) напруга живлення подається на інфрачервоний світлодіод оптрона.

2. Переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «-», встановіть постійну напругу живлення фотодіодів, регулятор «РІВЕНЬ» (поз. 7 рис. 2.3) переводиться в середнє положення.

3. На фотодіод оптопари подати напругу живлення, для цього використовується перемикач (поз. 10 рис. 2.3).

4. Використовуючи осцилограф, який підключається, як і в пп. 3 та 4, потрібно дослідити приймання фотодіодом прямокутного сигналу, який випромінюється світлодіодом. Поворотом регулятора «РІВЕНЬ» (поз. 4 рис. 2.3) потрібно дослідити залежність амплітуди імпульсів від величини прямого струму через світлодіод.

Контрольні питання

1. Поясніть принцип дії фотодіода?
2. Поясніть принцип дії світлодіода?
3. Назвіть основні характеристики фотодіодів.
4. Де використовуються світлодіоди та фотодіоди?
5. У чому відмінність світлодіода та лазера?
6. З яких елементів складається оптрон?
7. Зобразіть схеми вмикання в електричне коло фотодіода та світлодіода?
8. З яких матеріалів виготовляють світлодіоди та фотодіоди?

Лабораторна робота № 3.

Дослідження стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги

Мета роботи: отримати ВАХ стабілітрона осцилографічним методом. Ознайомитись з принципом дії параметричних та компенсаційних стабілізаторів напруги. За результатами експериментальних досліджень знайти коефіцієнт стабілізації компенсаційного стабілізатора напруги.

Прилади і матеріали: генератор електричних сигналів, панель із закріпленими на ній стабілітронами та резисторами, змонтований на панелі компенсаційній стабілізатор напруги, осцилограф, блок живлення, вольтметр, мультиметр, з'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Обернене вмикання *n-p*-переходу використовується в стабілітронах. Принцип дії стабілітрона ґрунтується на стабілізуючих властивостях явища електричного пробію. Для виготовлення стабілітронів часто використовують кремній, оскільки він має вищу температурну стабільність, ніж германій.

Завдяки внутрішній електростатичній емісії під дією великого електростатичного поля, яке створене зворотною напругою, виникає електричний пробій напівпровідника. У результаті електричного пробію виникає зворотний струм, який практично не залежить від подальшої зміни напруги. Такий пробій оборотний, тобто він не обумовлює руйнування *n-p*-переходу.

Електричний пробій полягає в тому, що, рухаючись з великою швидкістю, носії заряду при зіткненні з атомами в зоні *n-p*-переходу іонізують їх. У результаті створюються нові вільні носії заряду (електрони та дірки). Цей процес має наростати лавиноподібно, що обумовлює різке та значне зростання струму. Електричний пробій у стабілітронах відбувається при не дуже високих зворотних напругах, тому потужність, яка виділяється в *n-p*-переході, недостатня для теплового пробію. ВАХ та схему вмикання стабілітрона представлено на рис. 3.1.

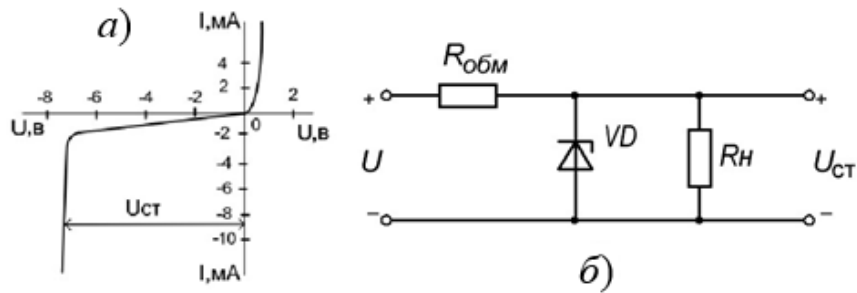


Рис. 3.1. ВАХ (а) та схема вмикання стабілітрона (б).

Основними параметрами стабілітрона є:

1. Напруга стабілізації ($U_{ст}$) – це спад напруги на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні сили струму. За величиною цієї напруги здійснюють відбір стабілітронів для роботи.

2. Мінімальний струм стабілізації ($I_{ст.мін}$) – це зворотний струм який забезпечує його стійкий пробій.

3. Номінальний струм стабілізації - значення зворотного струму, при якому вимірюється напруга стабілізації. Величина цього струму підтримується за допомогою резистора, який вмикається послідовно зі стабілітроном.

Для дослідження ВАХ стабілітрона за осцилографічним методом використовують установку, схема якої зображена на рис. 3.2. Через досліджуваний стабілітрон і послідовно з'єднаний з ним резистор проходить змінний електричний струм. На горизонтально відхиляючі пластини осцилографа подається напруга із стабілітрона, а на вертикально відхиляючі пластини подається напруга з резистора R , яка пропорційна струму, що протікає через стабілітрон. Прокалібрувавши осцилограф, можна експериментально визначити напругу стабілізації.

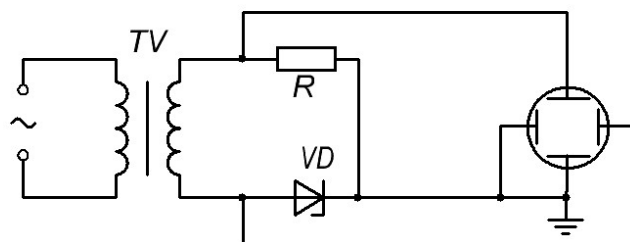


Рис. 3.2. Схема дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа.

У багатьох електронних приладах напруга, що подається на трансформатор, ніколи не залишається сталою, часто вона може змінюватися в широких межах. Така зміна напруги відображається на роботоздатності апаратури. Тому застосовуються електронні стабілізатори напруги (рис. 3.3), які можуть конструктивно складатися з транзисторів, стабілітронів або ІМС. Призначення стабілізаторів напруги полягає у підтримці стабільною вихідну напругу.

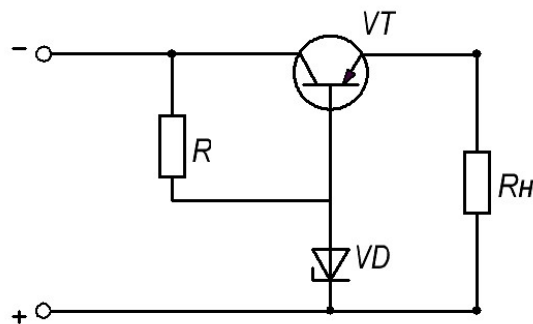


Рис. 3.3. Схема електронного стабілізатора напруги.

Якісні показники стабілізаторів напруги характеризуються коефіцієнтом стабілізації, який визначається формулою:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}}. \quad (3.1)$$

Значення коефіцієнта стабілізації напруги різних типів стабілізаторів змінюється в широких межах - від декількох одиниць до декількох тисяч одиниць.

Стабілізатори напруги поділяють на параметричні та компенсаційні.

Параметричними називають стабілізатори напруги, у яких для стабілізації напруги використовують характерні залежності параметрів нелінійних електронних елементів (ВАХ стабілітрона). На рис. 3.1 зображена схема найпростішого параметричного стабілізатора напруги.

Представлена схема з певним наближенням є подільником напруги, який

складається з обмежуючого резистора $R_{обм}$ та стабілітрона VD , паралельно до якого підключений резистор R_n .

При зміні вхідної напруги $U_{вх}$ буде змінюватись струм, який проходить через обмежуючий резистор. Якби в схемі був відсутній стабілітрон, то зміна струму обумовила б зміну напруги на опорі R_n . При наявності в схемі стабілітрона змінюється струм, який через нього проходить, а напруга на ньому, завдяки особливостям ВАХ, залишається практично сталою. Сталою залишається напруга і на резисторі R_n , оскільки він увімкнений паралельно стабілітроні.

Розглянемо інший випадок, коли вхідна напруга залишається сталою, а змінюється електричний опір резистора навантаження. У такому випадку струм, який проходить через стабілітрон, буде також змінюватись. Причому зі зменшенням R_n (зі збільшенням струму навантаження) струм через стабілітрон зменшиться, а напруга не зміниться. До основних недоліків параметричних стабілізаторів можна віднести невисоку ефективність, невеликі робочі струми, невисокий коефіцієнт стабілізації.

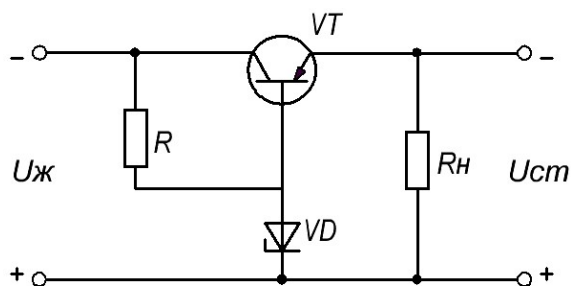


Рис. 3.4. Схема компенсаційного стабілізатора напруги.

Вказаних вище недоліків позбавлений компенсаційний стабілізатор напруги. Найпростіша схема такого стабілізатора напруги зображено на рис. 3.4. У наведеній на рис 3.4 схемі резистор R і стабілітрон VD утворюють параметричний стабілізатор напруги, який підтримує на базі біполярного транзистора VT (регулюючого) постійну напругу. Напруга на виході даного стабілізатора, а значить, і на опорі R_n , рівна $U_{RH}=U_{VD}-U_{BE}$. Припустимо, що напруга на вході стабілізатора збільшилась. У такому випадку буде зростати

струм I_e , а значить, і напруга U_{RH} на навантаженні R_H . Однак при збільшенні напруги U_{RH} зменшиться пряма напруга (U_{BE}) між базою та емітером. Зменшення U_{BE} обумовить часткове закриття транзистора. При цьому спад напруги на ділянці емітер-колектор біполярного транзистора зростає на величину, достатню для компенсації зміни вхідної напруги.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 3.2.
2. Отримати на осцилографі ВАХ стабілітронів КС168Д та КС133А (Табл. 3.1.).

Таблиця 3.1. Параметри досліджуваних стабілітронів

Тип стабілітрона	$U_{ст.}, В$	$I_{ст. min}, мА$	$I_{ст. max}, мА$	Диференціальний опір, Ом	$P_{max}, Вт$
КС168Д	6,12...7,48	3	50	30	0,3
КС133А	2,97...3,63	3	50	65	0,3

3. Скласти електричне коло для дослідження компенсаційного стабілізатора напруги. Схема електричного кола зображена на (рис. 3.4).

4. Змінюючи напругу на вході компенсаційного стабілізатора, виміряти напругу на його виході. Результати вимірювань занести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Залежність вихідної напруги стабілізатора від вхідної

№	1	2	3	...	22
$U_{вх}, В$	1	2	3	...	22
$U_{вих}, В$					

6. За даними таблиці 3.2 побудувати навантажувальну характеристику стабілізатора напруги (графік залежності вихідної напруги від вхідної).

5. Використовуючи формулу 3.1, визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги.

Контрольні запитання

1. У чому полягають особливості напівпровідникових діодів, які використовують при побудові стабілізаторів напруги?
2. Назвіть основні параметри стабілітронів.
3. Поясніть принцип дії параметричного стабілізатора напруги?
4. Для чого призначені стабілізатори напруги?
5. Перерахуйте основні недоліки параметричних стабілізаторів напруги?
6. Які вам відомі схеми стабілізаторів напруги?
7. Що таке коефіцієнт пульсації стабілізатора?
8. Запишіть формулу для розрахунку коефіцієнта стабілізації стабілізатора?

Лабораторна робота № 4.

Дослідження біполярного транзистора

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії біполярного транзистора. Дослідити ВАХ біполярного транзистора ввімкнутого за схемою зі спільним емітером.

Прилади і матеріали: панель з досліджуваним транзистором, блок живлення 0-12 В, блок живлення 0-20 В, мікроампервольтметр (М 109/1), вольтметр (В7-21А), реостат (28 Ом), вольтметр (М2042), міліамперметр (МВА-47/5), з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Біполярний транзистор - це напівпровідниковий електронний елемент, який має не менше двох *p-n*-переходів та три і більше виводи. Транзистори призначені для підсилення електричних сигналів, генерування електричних сигналів, а також комутації електричних кіл.

Транзистори одні із найбільш поширених приладів сучасної напівпровідникової електроніки. За тривалий період свого розвитку транзистори істотно й неодноразово видозмінювалися за електричними параметрами, електронними властивостями, конструкцією, технологією виготовлення. Проте основні фізичні процеси, які відбуваються в транзисторах, залишаються незмінними.

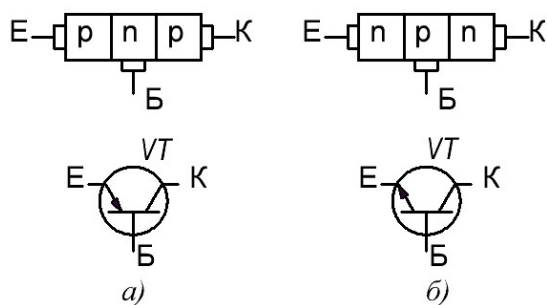


Рис. 4.1. Будова та умовне схематичне позначення біполярних транзисторів структури $p-n-p$ (а) та $n-p-n$ (б)

Конструктивно біполярний транзистор складається з трьох напівпровідникових структур, дві з яких мають однаковий тип провідності і розділені між собою структурою іншого типу провідності. У результаті такої будови утворюються транзисторні $p-n-p$ або $n-p-n$ структури з двома $p-n$ -переходами (рис. 4.1). Середня область транзистора називається базою (Б), а дві крайні - колектором (К) та емітером (Е). Транзистори структури $p-n-p$ називають транзисторами прямої провідності (рис. 4.1. а.), а транзистори структури $n-p-n$ транзисторами зворотної провідності (рис. 4.1. б.).

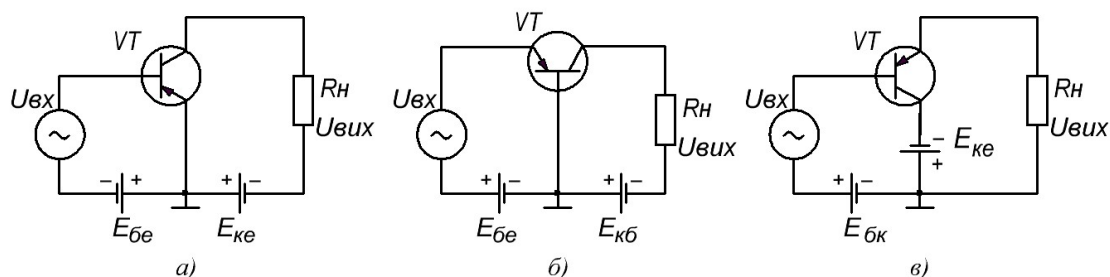


Рис. 4.2. Схеми вмикання транзистора: а) зі спільним емітером; б) зі спільною базою; в) зі спільним колектором.

На практиці використовуються три основні схеми вмикання біполярного транзистора: із спільним емітером, із спільною базою та із спільним колектором (рис. 4.2).

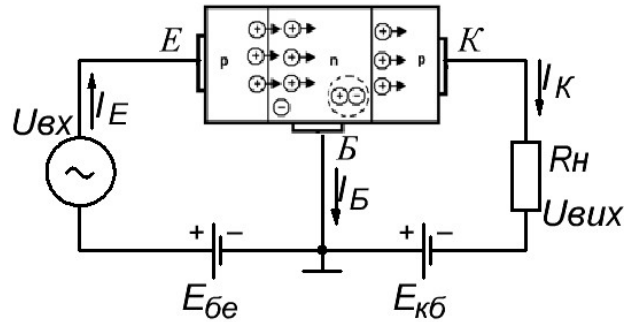


Рис. 4.3. Принцип дії біполярного транзистора.

В основі принципу дії біполярного транзистора лежить взаємодія двох $p-n$ переходів (рис. 4.3). Одна зі структур біполярного транзистора з'єднується через свій електрод з джерелом сталої напруги, причому структура p -типу використовується при роботі біполярного транзистора як основне джерело носіїв заряду (емітер). Через середній шар n -типу (базу) носії заряду проходять у другу напівпровідникову структуру p -типу провідності (колектор). Колектор в даному випадку є збирачем носіїв заряду, які інжектвані емітером, і які пройшли крізь базу. За допомогою струму в емітерному колі у біполярному транзисторі здійснюється керування струмом в колекторному колі. Обидва кола мають джерела електричної енергії.

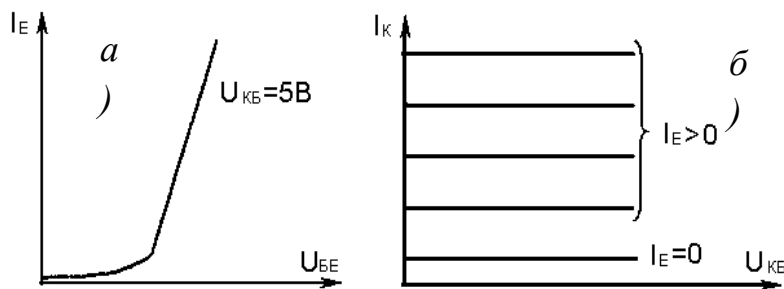


Рис. 4.4. ВАХ транзистора, увімкненого за схемою із спільною базою: а) входні характеристики; б) вихідні характеристики.

Залежність між струмом та напругою у вхідному і вихідному колах транзистора визначається його вольт-амперними характеристиками. Сім'ї таких вольт-амперних характеристик транзистора при його вмиканні із спільною базою показано на рис. 4.4.

Залежно від полярності напруг, прикладених до виводів транзистора, розрізняють такі режими його роботи:

1) активний режим роботи; у такому режимі роботи емітерний $p-n$ перехід зміщено в прямому напрямку, а колекторний $p-n$ перехід зміщено у зворотному напрямку;

2) режим відсікання струму; при такому режимі роботи на обидва $p-n$ переходи подані обернені напруги. У такому випадку обидва $p-n$ переходи будуть закриті, через них будуть проходити незначні зворотні струми. Можна вважати, що ці струми дорівнюють нулю, а між виводами транзистора є розрив;

3) режим насичення; при такому режимі роботи на обидва $p-n$ переходи подані прямі напруги. Обидва $p-n$ переходи зміщено у прямому напрямку і транзистор повністю відкритий. У цьому режимі і емітер, і колектор інжектують електрони в базу. У базі протікають два зустрічних наскрізних потоки електронів. Ці потоки називають нормальним та інверсним. Внаслідок подвійної інжекції база біполярного транзистора сильно насичується надлишковими електронами. Через це насичення підсилюється рекомбінація електронів з дірками, і рекомбінаційний струм бази буде значно вищим, ніж в активному режимі. Через насичення бази транзистора і його переходів надлишковими носіями заряду, їхні опори різко зменшуються. Відповідно, при великому струмі колектора у транзисторі розсіюється мала потужність через малий опір відкритого колекторного $p-n$ переходу. Цей режим роботи транзистора використовують при побудові перемикальних схем.

Конструктивно біполярні транзистори виготовляють в металевих, пластмасових та керамічних корпусах.

Як і для усіх елементів напівпровідникової електроніки, існує буквено-цифрове позначення транзисторів.

Перший елемент в маркуванні означає напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений транзистор (буква або цифра): 1 або Г - германій; 2 або К - кремній; 3 або А - арсенід галію.

Другий елемент (найчастіше буква) вказує клас приладів: Г – біполярний транзистор; П – польовий транзистор.

На третьому місці ставиться цифра, яка визначає якісні та частотні показники транзисторів:

- транзистори малої потужності: низькочастотні (до 3 МГц) - 1, середньочастотні (3...30 МГц) - 2, високочастотні (понад 30 МГц) - 3;

- транзистори середньої потужності: низькочастотні (до 3 МГц) - 4, середньочастотні (3...30 МГц) - 5, високочастотні (понад 30 МГц) - 6;

- транзистори великої потужності: низькочастотні (до 3 МГц) - 7, середньочастотні (3...30 МГц) - 8, високочастотні (понад 30 МГц) - 9.

Четвертий та п'ятий елементи (цифра від 01 до 99) вказують на порядковий номер розробки.

Шостий елемент (буква) вказує на поділ транзисторів на групи за класифікаційними параметрами.

Приклади маркувань транзисторів:

КТ820Б – транзистор виготовлений з кремнію, великої потужності, середньочастотний, номер розробки 20, група Б;

КТ360В - транзистор виготовлений з кремнію, малопотужний високочастотний, номер розробки 60, група В;

ГТ115А - транзистор виготовлений з германію, малопотужний низькочастотний, номер розробки 15, група А.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло для дослідження транзистора, ввімкненого за схемою із спільним емітером. Схема електричного кола зображена на рис. 4.5.

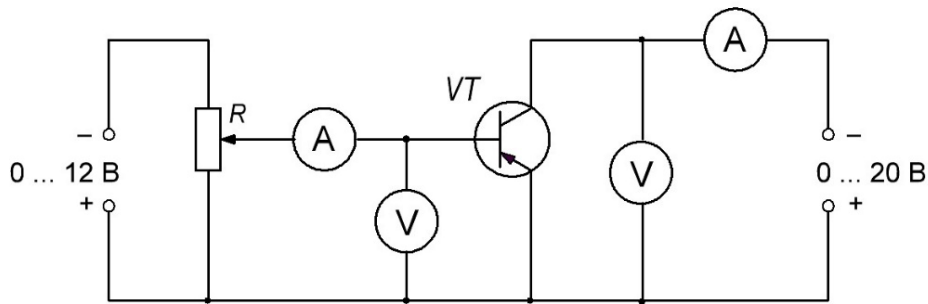


Рис. 4.5. Схема електричного кола для дослідження біполярного транзистора.

2. Встановити напругу на колекторі біполярного транзистора $U_{KE}=0$.

3. Для того, щоб зняти сім'ю вхідних статичних характеристик транзистора $I_B=f(U_{BE})$, при $U_{KE}=0; 1; 2; 3$ В, потрібно змінювати напругу U_{BE} в межах, вказаних викладачем, за допомогою резистора R.

4. За результатами проведених досліджень графічно побудувати сім'ю вхідних статичних характеристик транзистора.

5. Для того, щоб зняти сім'ю вихідних статичних характеристик транзистора $I_K=f(U_{KE})$, при $I_B=0; 40; 80$ мкА, потрібно змінювати напругу на колекторі в межах, запропонованих викладачем.

6. За результатами проведених досліджень графічно побудувати сім'ю вихідних статичних характеристик транзистора.

8. Користуючись сім'єю вихідних статичних характеристик біполярного транзистора, визначити коефіцієнт підсилення за струмом транзистора:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B},$$

при $U_{KE}=\text{const}$.

9. Користуючись сім'єю вхідних статичних характеристик біполярного транзистора, визначити вхідний опір транзистора:

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B},$$

при $U_{KE}=\text{const}$.

Контрольні запитання

1. З чого конструктивно складається біполярний транзистор?
2. Де використовуються біполярні транзистори?
3. Як на електронних схемах позначаються біполярні транзистори.
4. Поясніть принцип дії біполярного транзистора?
5. Назвіть основні режими роботи транзисторів?
6. Як маркуються біполярні транзистори?
7. Які існують схеми вмикання біполярних транзисторів?
8. Зобразіть та поясніть вхідні та вихідні ВАХ транзистора.

Лабораторна робота № 5.

Дослідження статичних характеристик польових транзисторів

Мета роботи: вивчити принцип дії польового транзистора та дослідити статичні вольт-амперні характеристики польового транзистора. Дослідити залежність електричного опору каналу транзистора від напруги на затворі.

Прилади і матеріали: польовий транзистор КП 301Б, закріплений на панелі, джерело живлення на 10 В, джерело живлення на 25 В, два вольтметри, амперметр, мікроамперметр.

Теоретичні відомості

Польовим транзистором називають напівпровідниковий електронний елемент, в основі принципу дії якого лежить зміна провідності каналу, по якому проходить електричний струм, поперечним електричним полем. Часто польові транзистори називають уніполярними, це обумовлено тим, що в утворенні електричного струму, який проходить через канал, беруть участь носії одного типу (електрони або дірки). Польові транзистори за способом утворення провідного каналу поділяють на транзистори з керуючим *p-n*-переходом та

МДН-транзистори (транзистори структури метал-діелектрик-напівпровідник) з вбудованим каналом та МДН-транзистори з індукованим каналом.

Польові транзистори з керуючим p - n -переходом. Принцип дії польового транзистора з керуючим p - n -переходом розглянемо на основі моделі, зображеної на рис. 5.1, а. Згідно з цією моделлю, каналом для проходження струму через транзистор є шар напівпровідника електронного типу провідності, який знаходиться між двома p - n -переходами. Від каналу виведені два електроди (контакти). Електрод, від якого вільні носії заряду починають рух (в розглянутому випадку електрони), називають витокком (В), а електрод, до якого рухаються носії заряду, називається стоком (С). Напівпровідникові області p -типу провідності, які утворюють з каналом два p - n -переходи, мають більш високу концентрацію домішок, ніж в каналі. Обидва області p -типу провідності між собою електрично зв'язані і мають спільний зовнішній електрод, який називається затвором (З). Польові транзистори з каналом p -типу провідності мають аналогічну конструкцію. Умовні схематичні позначення польових транзисторів з індукованими каналами n -типу та p -типу зображено на рис. 5.1. б, в.

Полярність напруг, які прикладаються до польового транзистора, показана на рис. 5.1., а. Керуюча напруга (U_{CB}) прикладається між витокком та затвором. Напруга $U_{ЗВ}$ зворотна для обох p - n -переходів. Напруга U_{CB} прикладається позитивним полюсом до стоку.

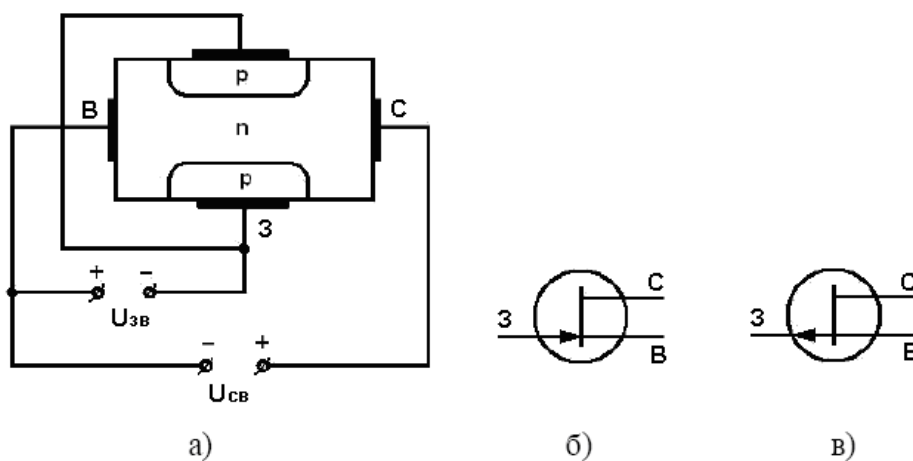


Рис. 5.1. а) будова польового транзистора з керуючим p - n -переходом;

- б) позначення транзистора з індукованим каналом n -типу провідності
- в) позначення транзистора з індукованим каналом p -типу провідності.

Керуючі властивості польового транзистора пояснюються тим, що при зміні $U_{зв}$ змінюється ширина обох p - n -переходів, які є ділянками напівпровідника, збідненого вільними носіями заряду. Враховуючи, що p -область має вищу концентрацію домішок, ніж n -область, то зміна ширини обох переходів p - n -переходів буде здебільшого відбуватись за рахунок каналу. З підвищенням напруги $U_{зв}$ геометричні розміри обох p - n -переходів збільшуються, і область, збіднена вільними носіями заряду, буде зміщуватись в бік каналу, що обумовлює зменшення площі поперечного перерізу струмопровідного каналу та збільшення його опору.

Важливою особливістю польового транзистора є те, що на електропровідність каналу впливає як напруга $U_{зв}$, так і напруга $U_{св}$. Вплив поданих напруг на величину області просторового заряду, відповідно, і на провідність каналу, показано на рис. 5.2.

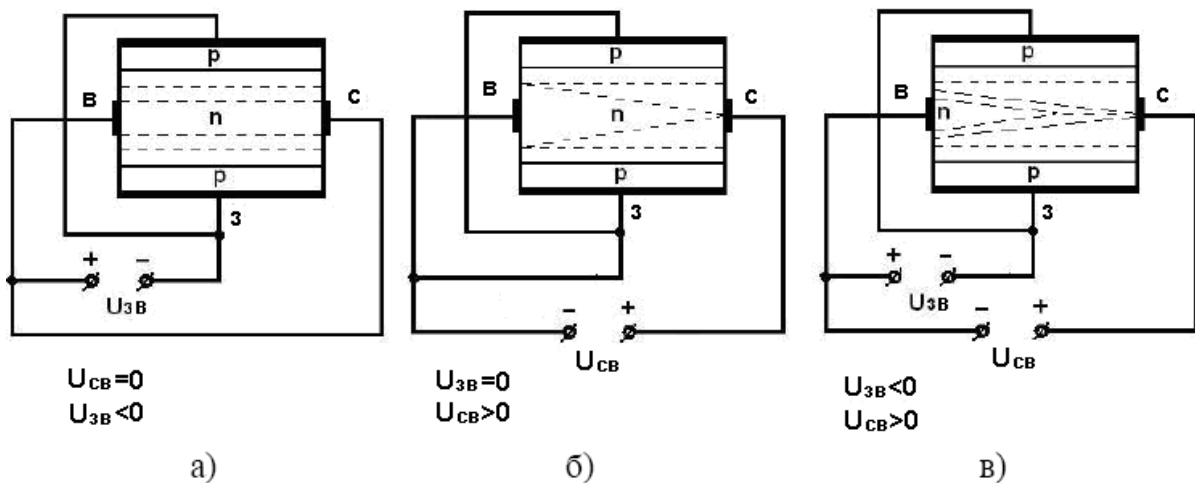


Рис. 5.2. Вплив напруг $U_{зв}$ та $U_{св}$ на електропровідність каналу

На рис. 5.2. а зовнішня напруга прикладена лише до вхідного кола польового транзистора. Зміна напруги $U_{зв}$ обумовлює зміну електропровідності каналу за рахунок зміни на однакову величину об'ємного заряду, і, відповідно, його площу поперечного перерізу по всій довжині каналу. Вихідний струм стоку

рівний нулю $I_c=0$, оскільки $U_{cb}=0$. На рис. 5.2. б показано зміну перерізу каналу транзистора при дії лише напруги U_{cb} ($U_{zb}=0$). При напрузі U_{cb} , відмінній від нуля, через канал проходить струм I_c , у результаті створюється спад напруги, що збільшується в напрямку стоку. Сумарний спад напруги на ділянці витік-стік рівний U_{cb} . Тому потенціали точок каналу n -типу провідності будуть неоднаковими вздовж його довжини і будуть зростати в напрямку стоку, приймаючи значення від нуля до U_{cb} . Електричні потенціали точок p -області відносно витіку визначаються потенціалами затвора відносно витіку і в розглянутому випадку рівні нулю. Враховуючи це, зворотна напруга, прикладена до p - n -переходів, збільшується в напрямку від джерела до стоку, і p - n -переходи збільшують площу поперечного перерізу в напрямку стоку. Це призводить до зменшення площі поперечного перерізу каналу в напрямку від витіку до стоку (рис. 5.2. б). Збільшення напруги U_{cb} викликає зростання спаду напруги в каналі і зменшення його площі поперечного перерізу, що призводить до зниження електропровідності каналу. При деякій напрузі U_{cb} відбувається звуження перерізу каналу, при якому межі обох p - n -переходів перетинаються (рис. 5.2. в), відповідно, електричний опір каналу стає високим. Результат впливу на канал напруг U_{zb} і U_{cb} відображено на рис. 5.2.

Вихідні (стокові) ВАХ транзистора з керуючим p - n -переходом та каналом n -типу провідності зображено на рис. 5.3, а. Вихідні ВАХ польового транзистора відображають залежність сили струму стоку від прикладеної напруги стік-витік при сталій напрузі затвор-витік. Набір таких ВАХ зображується у вигляді сім'ї кривих. На кожній ВАХ можна виділити три ділянки: 1 - ділянка сильної залежності струму стоку від прикладеної напруги U_{cb} (початкова ділянка), 2 - слабка залежність струму стоку від прикладеної напруги U_{cb} (режим насичення струму стоку), 3 - ділянка пробою p - n -переходу.

На ділянці ВАХ, яка відповідає невисоким напругам U_{cb} (ділянка 0-а на рис. 5.3, а), вплив напруги на електропровідність каналу незначний, оскільки просторовий заряд p - n -переходів незначний і тому на цій ділянці спостерігається майже лінійна залежність струму I_c від U_{cb} . При зростанні напруги (ділянка а-б)

зменшення перерізу каналу за рахунок збільшення об'ємного заряду обумовлює все більший вплив на його електропровідність, що призводить до зменшення нахилу ВАХ.

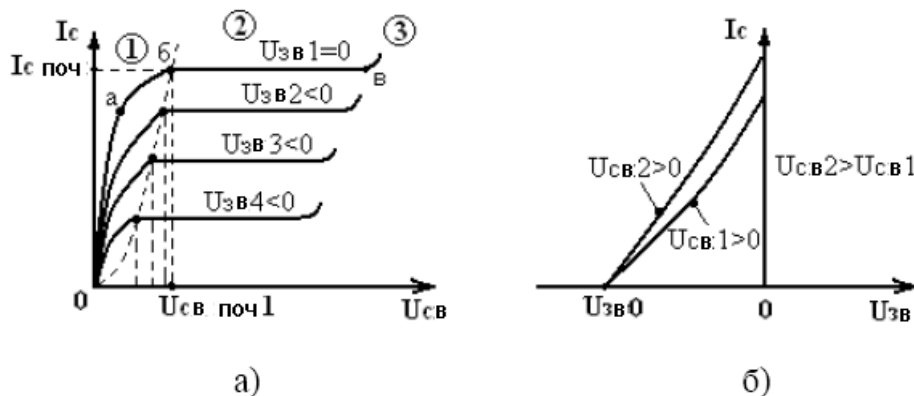


Рис. 5.3. а) стокові ВАХ польового транзистора. б) стік-затворні ВАХ польового транзистора.

Із наближенням до межі з ділянкою 2 (точка б) площа перерізу каналу зменшується біля стоку до мінімуму в результаті перетину об'ємних зарядів обох переходів. Напругою насичення ($U_{св.нас}$) називається напруга, при якій починається режим насичення струму стоку. Подальше зростання напруги незначно змінює значення сили струму, оскільки одночасно зі збільшенням напруги буде зростати електричний опір каналу, оскільки збіднена носіями заряду область об'ємного заряду продовжує зростати, поступово заповнюючи канал від стоку до витоків. Збільшення струму стоку на ділянці б-в можна пояснити наявністю різних «витікань» та впливом високого електричного поля в $p-n$ -переходах, прилеглих до каналу. Ділянка 3 обумовлюється лавинним пробоем $p-n$ -переходів біля стоку в колі стік-затвор, та різким зростанням струму стоку. Напруга початку електричного пробую відповідає точці в (рис. 5.3. а).

Зворотна напруга на затворі викликає звуження каналу, оскільки збільшується об'ємний заряд переходів, та відбувається зниження його провідності. Це обумовлює те, що початкові ділянки кривих, які відповідають великим напругам на затворі, мають менший нахил наростання струму. Враховуючи наявність напруги $U_{зв}$, перекриття каналу просторовим зарядом p -

n -переходів відбувається при меншій напрузі, і межі ділянок 1 та 2 будуть відповідати меншій напрузі насичення ($U_{\text{св.нас}}$). Напрузі перекриття каналу відповідають абсциси точок перетину стокових характеристик з кривою зображеною пунктиром (рис. 5.3. а). Важливим електричним параметром транзистора є напруга на затворі, при якій струм стоку приблизно рівний нулю. Ця напруга називається напругою відсікання $U_{\text{зв}(0)}$. Значення напруги відсікання дорівнює напрузі $U_{\text{св}}$ в точці b ВАХ при $U_{\text{зв}}=0$. Оскільки керування вихідним струмом польових транзисторів реалізується напругою вхідного кола, то важливою, для польових транзисторів, є стік-затворна ВАХ. Ця характеристика є залежністю струму стоку від напруги затвор-витік при сталому значенні напруги стік-витік.

Стік-затворна характеристика польового транзистора зображена на рис. 5.3.б. Вона пов'язана з вихідними характеристиками транзистора і може бути побудована на їх основі.

При роботі польового транзистора в пологій ділянці стокової ВАХ при заданій напрузі $U_{\text{зв}}$ струм стоку визначають з виразу:

$$I_c = I_{\text{с.п.}} \left(1 - \frac{U_{\text{зв}}}{U_{\text{зв}(0)}} \right)^2, \quad (5.1)$$

де $I_{\text{с.п.}}$ - початковий струм насичення стоку (струм при $U_{\text{зв}}=0$ та напрузі на стоці, що перевищує напругу насичення $U_{\text{св.нас}}$).

Для кількісної оцінки керуючої дії затвору зручно використовувати крутизну стік-затворної характеристики, яка визначається формулою (5.2) при сталій напрузі $U_{\text{св}}$

$$S = \frac{dI_c}{dU_{\text{зв}}}. \quad (5.2)$$

З (5.2) слідує, що крутизна стік-затворної характеристики приймає максимальне значення при $U_{\text{зв}}=0$. Для визначення значення S при довільному значенні напруги $U_{\text{зв}}$ продиференціюємо вираз (5.1):

$$\frac{dI_c}{dU_{\text{зв}}} = \left(\frac{2I_{\text{с.п.}}}{U_{\text{зв}(0)}} \right) \left(1 - \frac{U_{\text{зв}}}{U_{\text{зв}(0)}} \right). \quad (5.3)$$

При $U_{зв}=0$ формула (5.3) набуде вигляду:

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = S_{II} = \left(\frac{2I_{с.п.}}{U_{зв}(0)} \right). \quad (5.4)$$

Підставивши вираз (5.4) у (5.3), отримаємо:

$$S = S_{II} \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right). \quad (5.5)$$

Основними електричними параметрами польового транзистора є $I_{с.макс}$ - максимально допустимий струм стоку, R_i - диференціальний внутрішній опір, $U_{св.макс}$ - максимальна напруга стоку, $R_{вх}$ - вхідний опір, $U_{зв}(0)$ - напруга відсікання, S - крутизна, $C_{зв}$ - міжелектродна ємність затвор-витік, $C_{зс}$ - міжелектродна ємність затвор-стік, і $C_{св}$ - міжелектродна ємність стік-витік.

Максимальний струм стоку $I_{с.макс}$ відповідає значенню струму в точці (φ) на вихідних характеристиках, при $U_{зв}=0$. Максимальне значення напруги $U_{св.макс}$ вибирають приблизно в 1,5 рази меншою від напруги електричного пробоя ділянки стік-затвор при $U_{зв}=0$. Диференційний внутрішній опір, який визначається формулою $R_i=dU_{св}/dI_c$ (при $U_{зв}=\text{const}$), характеризує нахил ВАХ на ділянці 2 (рис. 5.3, а). Крутизна, яка визначається формулою $S=dI_c/dU_{зв}$ (при $U_{св}=\text{const}$), відображає вплив $U_{зв}$ на вихідний струм польового транзистора. Крутизну розраховують по стік-затворній ВАХ (рис. 5.3, б). Вхідний опір ($R_{вх}=dU_{зв}/dI_3$) польового транзистора визначається опором p - n -переходів, включених у зворотному напрямку.

МНД-транзистори. Польові транзистори структури метал-діелектрик-напівпровідник. МНД-транзистори бувають двох типів: транзистори з індукованим каналом (канал створюється напругою, яка прикладається до керуючих електродів) та транзистори із вбудованим каналом (канал створюється при виготовленні транзистора). На відміну від польових транзисторів з керуючим p - n -переходом, у яких затвор має електричний контакт з прилеглою областю каналу, в МНД-транзисторах затвор електроізолюваний від зазначеної області шаром діелектричного матеріалу. Тому МНД-транзистори належать до класу польових транзисторів з ізолюваним затвором.

Найчастіше МНД-транзистори виготовляють з кремнію. У таких транзисторах діелектриком є оксид кремнію. Тому ці транзистори інколи називають МОН-транзисторами (М-метал, О-оксид, Н-напівпровідник). Наявність у структурі діелектрика забезпечує високий вхідний електричний опір цих транзисторів. Числові значення опору лежать в межах 10^{12} - 10^{14} Ом. Цей опір значно вищий, ніж у польових транзисторів з керуючим *p-n*-переходом 10^8 - 10^9 Ом.

В основі принципу дії МНД-транзисторів лежить ефект зміни електропровідності приповерхневого шару напівпровідникового кристалу на межі з діелектричним під впливом поперечного електричного поля. Приповерхнева область напівпровідника виконує функції струмопровідного каналу цих транзисторів.

МНД-транзистор в загальному випадку має чотири електричні виводи (електроди). Четвертим електродом є вивід від підложки основної напівпровідникової пластини. МНД-транзистори бувають з каналом *n*-типу або з каналом *p*-типу. Схематичні позначення МНД-транзисторів представлені на рис. 5.5.

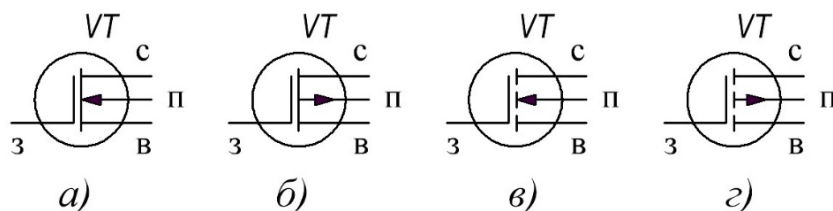


Рис. 5.5. Позначення МНД-транзисторів. а) транзистор з вбудованим каналом *n*-типу; б) транзистор з вбудованим каналом *p*-типу; в) транзистор з індукованим каналом *n*-типу; г) транзистор з індукованим каналом *p*-типу.

Розглянемо конструктивні особливості та принцип дії МНД-транзистора з вбудованим каналом. Будова такого транзистора з каналом *n*-типу провідності зображена на рис. 5.6, а. У напівпровідниковій пластині кремнію *p*-типу провідності за допомогою дифузійної технології створені області витоку, стоку та каналу *n*-типу провідності. Прошарок оксиду кремнію захищає поверхню,

прилеглу до витоку і стоку, а також утворює шар ізоляції затвора від каналу. Електричний контакт від підкладки, якщо він не використовується як додатковий електрод, приєднують до витоку. Стокові (вихідні) ВАХ польового транзистора з вбудованим каналом n -типу провідності зображені на рис. 5.6, б. Представлені на рис. 5.6, б ВАХ близькі до ВАХ польового транзистора з керуючим p - n -переходом. Розглянемо ВАХ транзистора при напрузі $U_{зв}=0$, що відповідає електричному сполученню затвора з витокком. Напруга $U_{вс}$ прикладена до ділянки витік-стік додатнім полюсом до стоку, це відповідає зворотному включенню p - n -переходу.

Оскільки $U_{зв}=0$, то через польовий транзистор проходить струм, який залежить від вихідної провідності каналу. На початковій ділянці ВАХ (0-а) залежність струму стоку від напруги $U_{св}$ близька до лінійної. Це можна пояснити тим, що об'ємний заряд зворотно включеного p - n -переходу ще малий і майже не впливає на електричний опір каналу. Наближаючись до точки (б), відбувається помітне збільшення просторового заряду в стоці, оскільки тут обернена напруга на p - n -переході має найбільше значення. У результаті площа поперечного перерізу каналу зменшується і його електричний опір суттєво зростає, що зменшує швидкість збільшення струму на відрізок (а-б). У точці (б) канал в біля стоку звужується до мінімуму, з подальшим зростанням напруги $U_{св}$ просторовий заряд продовжує заповнювати канал у бік витоку. Відповідно, опір каналу збільшується майже пропорційно до збільшення напруги. Це обумовлює обмеження зростання струму і, відповідно, появи на ВАХ пологої ділянки.

Розглянемо вплив напруги $U_{зв}$ на стокові ВАХ. У випадку, коли до затвору прикладена напруга $U_{зв}<0$, електричне поле затвора буде відштовхувати електрони, які є вільними носіями заряду в каналі. Це призведе до зменшення концентрації електронів в каналі і збільшення електричного опору каналу. У результаті стокові ВАХ при напругах на затворі $U_{зв}<0$ будуть розміщені нижче кривої, що відповідає напрузі $U_{зв}=0$. Режим роботи польового транзистора, при якому зменшується концентрація заряду в каналі, називається режимом збіднення.

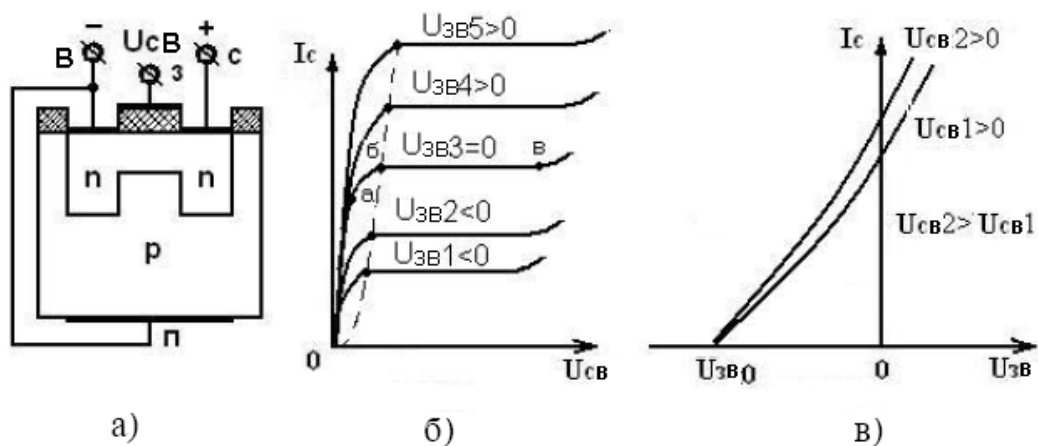


Рис. 5.6. а) будова МНД-транзистора з вбудованим каналом *n*-типу; б) стокові (вихідні) ВАХ польового транзистора з вбудованим каналом *n*-типу; в) стік-затворні ВАХ польового транзистора з вбудованим каналом.

При подачі на затвор напруги $U_{зв} > 0$ електричне поле затвора притягує електрони з *p*-шару напівпровідникової пластини в канал. Концентрація вільних носіїв заряду в каналі зростає, що обумовлює зменшення його електричного опору та зростання струму стоку. Тому стокові ВАХ при напругах $U_{зв} > 0$ розміщені вище кривої, яка відповідає напрузі $U_{зв} = 0$. Режим роботи польового транзистора, під час якого відбувається зростання концентрації носіїв заряду в каналі, називають режимом збагачення.

Для транзистора є межа зростання напруги $U_{сз}$ через настання пробією ділянки стік-затвор. На стокових ВАХ електричний пробій відповідає певній величині напруги $U_{св.пр}$ (ділянка 3). Якщо напруга $U_{зв} < 0$, то напруга $U_{сз}$ зростає, відповідно, електричний пробій починається при меншій напрузі $U_{св}$.

Стік-затворна ВАХ польового транзистора з вбудованим каналом представлена на рис. 5.6. Її відмінність від стік-затворної ВАХ транзистора з керуючим *p-n*-переходом обумовлена можливістю роботи польового транзистора як в режимі збіднення, так і в режимі збагачення.

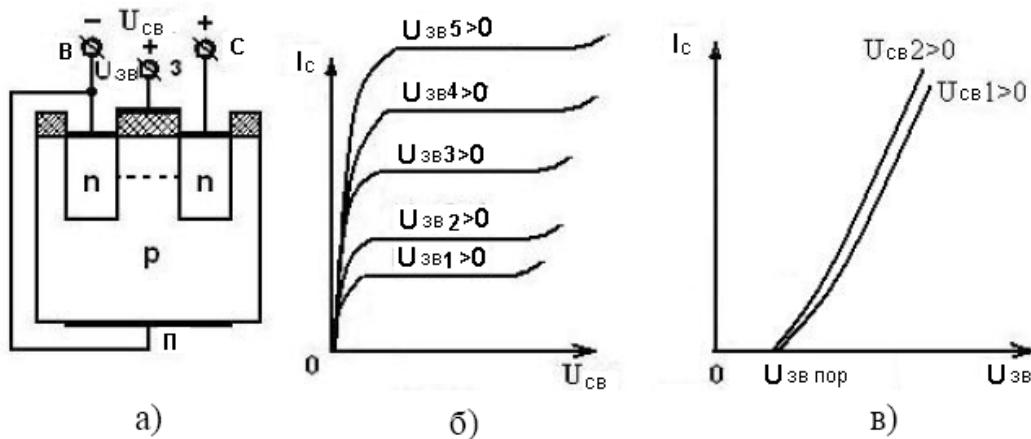


Рис. 5.7. а) будова МНД-транзистора з індукованим каналом n -типу провідності; б) стокові ВАХ польового транзистора з індукованим каналом n -типу; в) стік-затворні ВАХ транзистора з індукованим каналом.

Будова МНД-транзистора з індукованим каналом n -типу провідності зображена на рис. 5.7, а. Канал провідності тут спеціально не створюється, а індукується завдяки припливу електронів з напівпровідникової пластини. Це можна реалізувати, якщо прикласти до затвору напругу позитивної полярності по відношенню до витіку. Через приплив електронів в приповерхневій області відбувається зміна провідності напівпровідникового матеріалу, тобто буде індукуватися струмопровідний канал n -типу. Цей канал буде з'єднувати стік і витік. Напругу, прикладену до затвору, при якій індукується провідний канал, називають пороговою напругою $U_{зв.пор}$.

Електрична провідність каналу зростає із збільшенням прикладеної до затвору напруги додатної полярності. Таким чином, польовий транзистор з індукованим каналом працює лише в режимі збагачення.

Стокові характеристики транзистора з індукованим каналом n -типу зображено на рис. 5.7, б. Вони подібні до аналогічних характеристик польового транзистора з вбудованим каналом. Відмінність цих ВАХ полягає в тому, що керування значенням сили струму стоку транзистора здійснюється напругою однієї полярності, яка співпадає з полярністю $U_{зв}$. Струм стоку буде приймати нульові значення при $U_{зв}=0$, в той час, як в польовому транзисторі з вбудованим

каналом струм відмінний від нуля, оскільки вихідна провідність каналу буде відрізнятись від нуля.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 5.8. Для дослідження використовується транзистор КП301Б.

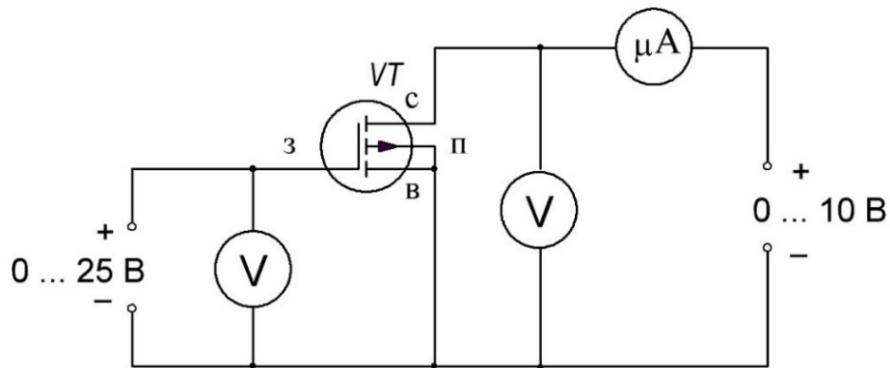


Рис. 5.8. Схема електричного кола для дослідження польового транзистора (КП301Б)

2. Межу вимірювань силу струму мікроамперметра встановити на 200 мкА.
3. Межі вимірювань напруги вольтметрів встановити на 20 В.
4. Експериментально зняти сім'ю стік-затворних характеристик $I_c=f(U_{зв})$ при $U_{св}=2$ В та $U_{св}=4$ В, $U_{св}=6$ В.
5. Напругу затвор-витік ($U_{зв}$) змінювати через 1 В в межах від 1 - 12 В.
6. Результати досліджень записати у табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

$U_{зв}, \text{В}$	$I_c, \text{мкА}$		
	$U_{св}=2 \text{ В}$	$U_{св}=4 \text{ В}$	$U_{св}=6 \text{ В}$
1			
2			
⋮			

7. Зняти сім'ю стокових характеристик $I_c=f(U_{св})$ при: $U_{зв}=5$ В; $U_{зв}=6$ В; $U_{зв}=7$ В; $U_{зв}=8$ В.

8. Напругу U_{CB} змінювати через 1 В в межах від 1 - 10 В .
9. Результати досліджень записати у табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

$U_{CB}, \text{В}$	$I_C, \text{мкА}$			
	$U_{ЗВ}=5 \text{ В}$	$U_{ЗВ}=6 \text{ В}$	$U_{ЗВ}=7 \text{ В}$	$U_{ЗВ}=8 \text{ В}$
1				
2				
⋮				

Контрольні запитання

1. Дайте означення термінам «транзистор» та «польовий транзистор».
2. Поясніть відмінність польових транзисторів з керуючим переходом та польових транзисторів ізольованим затвором.
3. Охарактеризуйте кожен з електродів польового транзистора та поясніть принцип транзистора з керуючим *p-n*-переходом.
4. Як на схемах електричних кіл позначають польові транзистори? Вкажіть назви електродів на рисунку.
5. Поясніть будову та принцип дії уніполярного транзистора з ізольованим затвором.
6. Зобразіть статичні характеристики уніполярного транзистора та охарактеризуйте їх.
7. Як розрахувати крутизну стік-затворної характеристики та активну вихідну провідність?
8. Де застосовуються польові транзистори?

Лабораторна робота № 6.

Дослідження варикапів

Мета роботи: вивчити фізичні основи принципу дії варикапів та експериментально дослідити основні характеристики варикапів.

Прилади і матеріали: варикапи, установка для вивчення *p-n*-переходу ФПК-06.

Теоретичні відомості

При зворотному включенні *p-n*-перехід має електричну ємність, обумовлену нерухомим об'ємним зарядом на межі *p* та *n* областей, величина цієї ємності пропорційна діелектричній проникності матеріалу напівпровідника, площі *p-n*-переходу, концентрації носіїв заряду. Таку електроємність називають бар'єрною ($C_{\bar{o}}$). Величину бар'єрної електроємності напівпровідникового діода можна розрахувати за формулою:

$$C_{\bar{o}} = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}, \quad (6.1)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу, d – ширина *p-n*-переходу, S – площа *p-n*-переходу.

При прямому ввімкненні *p-n*-перехід, крім бар'єрної ємності, буде мати дифузійну ємність ($C_{\text{диф}}$). Дифузійна ємність обумовлена накопиченням носіїв заряду в *n*- та *p*-областях.

$$C_{\text{диф}} = \frac{q_{\text{диф}}}{U_{\text{пр}}}, \quad (6.2)$$

де $q_{\text{диф}}$ – заряд, накопичений в області *p-n*-переходу; $U_{\text{пр}}$ – пряма напруга, якій відповідає $q_{\text{диф}}$.

Дифузійна електроємність майже не впливає на роботу *p-n*-переходу, оскільки вона завжди зашунтована малим прямим опором *p-n*-переходу. Найбільше значення для практичного застосування має бар'єрна ємність.

Варикап – це діод, в основі принципу дії якого лежить залежність бар'єрної ємності *p-n*-переходу від зовнішньої напруги. Можна стверджувати, що варикап – це конденсатор, ємність якого можна змінювати зворотною напругою.

Основною характеристикою варикапа є його вольт-фарадна характеристика (залежність ємності варикапа від напруги). На рис. 6.2, зображено типовий вигляд ВФХ варикапа. Залежність електроємності варикапа від прикладеної напруги залежить від технології виготовлення $p-n$ -переходу.



Рис. 6.1. Графічне позначення варикапа.

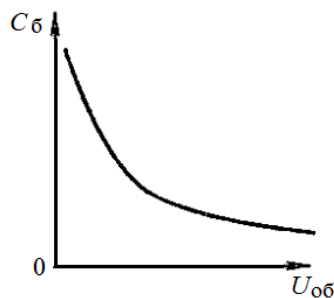


Рис. 6.2. Залежність бар'єрної ємності $p-n$ -переходу від прикладеної оберненої напруги.

Основні параметри варикапів.

1. Номінальна ємність (C_B) – це електроємність між електродами варикапа за заданого зворотного зміщення при температурі 20°C . Електроємності більшості варикапів лежать в межах від одиниць до сотень пікофарад. У більшості випадків номінальну ємність вимірюють при зворотній напрузі 4 В.

2. Коефіцієнт перекриття за ємністю (K_C) – це відношення номінальної ємності, яку вимірюють при мінімальній зворотній напрузі, до мінімальної ємності при максимально допустимій зворотній напрузі. Здебільшого коефіцієнт перекриття дорівнює декільком одиницям.

3. Добротність (Q) – визначається відношення реактивного опору варикапа до активного опору (опір втрат). Добротність варикапа можна визначити з еквівалентної схеми варикапа.

Повний опір варикапа визначається формулою

$$Z = R + jX = r_{\delta} + \frac{r_{3\delta}}{\omega^2 C_{\delta}^2 r_{3\delta}^2 + 1} - j \frac{\omega C_{\delta} r_{3\delta}^2}{\omega^2 C_{\delta}^2 r_{3\delta}^2 + 1}. \quad (6.3)$$

Поділивши дійсну частину електричного опору Z на уявну з врахуванням, що $r_{3\delta} \gg r_{\delta}$, отримаємо величину, обернену до добротності:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega C_{\delta} r_{3\delta}} + \omega C_{\delta} r_{\delta}, \quad (6.3)$$

де C_{δ} – ємність варикапа, $r_{3\delta}$ – опір зворотно зміщеного переходу варикапа, r_{δ} – опір бази.

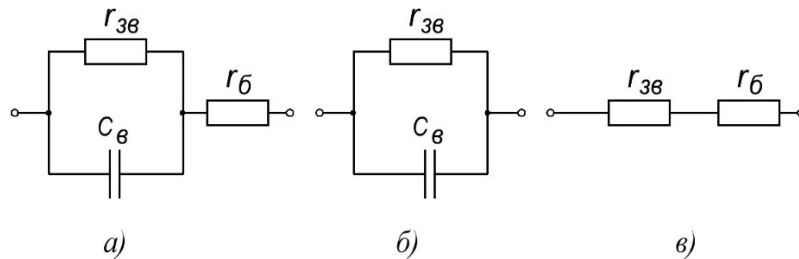


Рис. 6.3. Еквівалентна схема варикапа: *a* – повна; *б* – на низьких частотах; *в* – на високих частотах

При низьких частотах другий доданок у формулі (6.3) набагато менший від першого доданку, тому ним можна знехтувати. Отримаємо

$$Q_{НЧ} = \omega C_{\delta} r_{3\delta}.$$

При високих частотах у формулі (6.3) можна знехтувати першим доданком,

$$Q_{ВЧ} = \frac{1}{\omega C_{\delta} r_{\delta}}.$$

4. Максимально припустима напруга (U_{\max}) – максимальне миттєве значення змінної напруги, яке забезпечує необхідну надійність при тривалій роботі варикапа.

5. Температурний коефіцієнт електроємності – це відношення відносної зміни ємності при певній напрузі до абсолютної зміни температури

навколишнього середовища.

6. Максимально припустима потужність (P_{\max}) – це максимальне значення потужності, яка розсіюється на варикапі, яке забезпечує необхідну надійність при тривалій роботі варикапа.

Залежність параметрів варикапа від температури. Залежність ємності варикапа від температури обумовлена двома основними причинами: залежністю діелектричної проникності ε від температури та залежністю висоти потенціального бар'єру φ_0 від температури.

Діелектрична проникність напівпровідникових матеріалів слабо залежить від температури, тому цією залежністю можна знехтувати.

Залежність висоти потенціального бар'єра φ_0 від температури обумовлена залежністю від температури концентрації власних носіїв n та температурного потенціалу φ_T . Оскільки n_i зі зростанням температури зростає експоненційно, а φ_T – лінійно, то φ_0 з підвищенням температури буде зменшуватися, а отже, ємність варикапа C_v буде збільшуватись. Вплив висоти потенціального бар'єру φ_0 на температурну залежність ємності варикапа C_v буде сильніше проявлятися при невисоких зворотних напругах, тобто у випадку, коли φ_0 співрозмірна з $U_{зв}$.

Залежність добротності варикапа від температури при низьких частотах в основному обумовлена зменшенням зворотного опору p - n переходу із зростанням температури. На високих частотах внаслідок зменшення рухливості носіїв i , відповідно, збільшення опору r_δ добротність варикапа з підвищенням температури зменшується.

Варикапи в електричному колі вмикають лише в зворотному напрямку, оскільки в такому випадку забезпечується високе значення добротності.

В основному варикапи використовуються для налаштування коливальних контурів, у деяких спеціальних схемах, наприклад, в параметричних підсилювачах.

Порядок виконання роботи

1. Дослідіть залежність бар'єрної ємності варикапа від прикладеної напруги. Отримані значення ємності записати в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Залежність бар'єрної ємності варикапа від напруги

$U_c, \text{В}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	25
$C_b, \text{пФ}$																

2. Дослідіть залежність дифузійної ємності варикапа від прикладеної напруги. Результати вимірювань запишіть в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Залежність дифузійної ємності варикапа від напруги

$U_c, \text{В}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$C_{\text{диф}}, \text{пФ}$									

3. За даними табл. 6.1 та табл. 6.2 побудуйте графічну залежність ємності варикапа від прикладеної напруги.

4. Розрахуйте коефіцієнт перекриття бар'єрної ємності варикапа.

Контрольні запитання

1. Чим обумовлена бар'єрна ємність $p-n$ -переходу?
2. Чим обумовлена дифузійна ємність $p-n$ -переходу?
3. Дайте означення варикапа?
4. Зобразіть основну характеристику варикапа? Який вигляд вона має?
5. Перерахуйте основні параметри варикапів.
6. Що називають добротністю та номінальною ємністю варикапа варикапа?
7. Що називають коефіцієнтом перекривання за ємністю?
8. Поясніть, як залежить бар'єрна ємність та добротність від температури?

Лабораторна робота № 7.

Дослідження тиристорів

Мета роботи: Вивчити принцип дії електронного ключа на тиристорі та дослідити його роботу. Ознайомитись зі схемами фазового регулювання потужності, яка споживається.

Прилади і матеріали: панель з тиристором, джерело живлення (12 В), лампа розжарення 6,3 В, 0,3 А, міліамперметр (500 мА), вольтметр, панель для дослідження тиристора в схемі регулювання потужності, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Класифікація та умовні графічні позначення тиристорів. Тиристором називається напівпровідниковий прилад з трьома та більше *p-n*-переходами, який призначений для використання в якості електронного ключа. Залежно від властивостей та конструктивних особливостей тиристори поділяють на тріодні (триністори) і діодні (диністори).

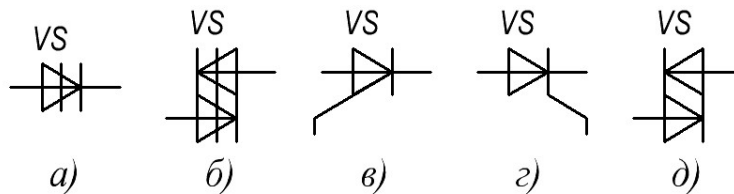


Рис. 7.1. Умовні позначення тиристорів: *а* - діодний тиристор, що включається в зворотному напрямку; *б* - діодний симетричний тиристор; *в* - тріодний тиристор, що включається в зворотному напрямку з керуванням по аноду; *г* - тріодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку з керуванням по катоду; *д* - тріодний симетричний тиристор

Принцип дії тиристорів. Найпростішими за принципом дії є діодні тиристори, які вмикаються в зворотному напрямку, часто їх виготовляють з кремнію, конструктивно вони складаються з чотирьох *n* та *p* областей, які

чергуються (рис. 7.2. а). Область p_1 , в яку проходить струм із зовнішнього кола, називають анодом, а область n_2 називають катодом, області n_1 і p_2 - базами.

Будову тиристора можна представити у вигляді сполучення двох біполярних транзисторів різної структури (рис. 7.2, б, в). Таке сполучення повинно задовольняти таким умовам: колекторний струм транзистора $n_1-p_2-n_2$ є базовим струмом транзистора $p_1-n_1-p_2$, а колекторний струм транзистора $p_1-n_1-p_2$ (VT1) є базовим струмом транзистора $n_1-p_2-n_2$ (VT2).

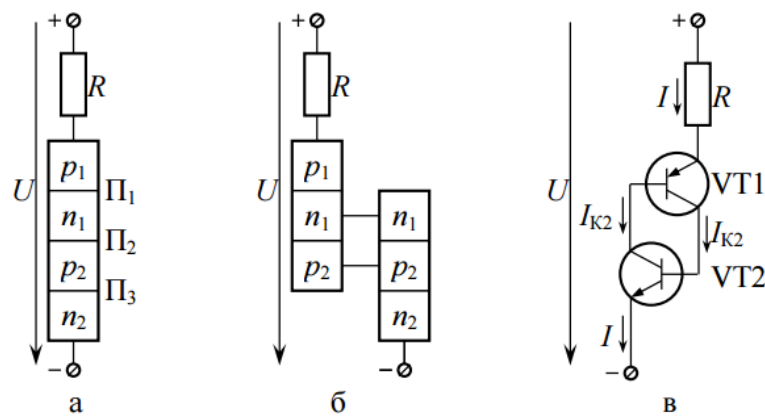


Рис. 7.2. Структура діодного тиристора

Якщо до діодного тиристора під'єднати джерело напруги так, як це показано на рис. 7.2. а, то p - n -переходи П₁ і П₃ перейдуть у відкритий стан, а перехід П₂ буде закритим. p - n -перехід П₂ називають колекторним переходом. Саме на ньому формується майже весь спад напруги.

Оскільки p - n -переходи П₁ і П₃ зміщені в прямому напрямку, то з них в області баз будуть інжектуватися вільні носії заряду: з області p_1 дірки і з області n_2 електрони. Інжектвані носії заряду дифундують в областях баз n_1 та p_2 і наближаються до П₂, електричним колекторного переходу П₂ перекидаються через p - n -перехід. Рухаючись в протилежних напрямках, ці носії заряду (дірки та електрони) створюють загальний струм. При невеликих значеннях зовнішньої напруги практично вся напруга спадає на колекторному переході П₂. Тому до p - n -переходів П₁ і П₃, які мають невеликий опір, прикладена мала напруга і інжекція носіїв заряду незначна. У такому випадку струм малий і рівний зворотному струму через p - n -перехід П₂, тобто I_{K0} .

При зростанні зовнішньої напруги струм у зовнішньому колі зростає незначно. Проте, якщо напруга досягне деякого значення $U_{\text{вкл}}$, носії заряду, проходячи p - n -перехід Π_2 , будуть прискорюватися настільки, що під час зіткнення з атомами в області p - n -переходу іонізують їх, обумовлюючи лавинне розмноження носіїв заряду. Дірки, які виникають внаслідок цього, під дією електричного поля переходять в область p_2 , а електрони переходять в область n_1 . Струм через p - n -перехід Π_2 збільшується, а його опір і спад напруги на ньому зменшується. Це обумовлює зростання напруги, прикладеної до переходів Π_1 і Π_3 , і збільшення інжекції носіїв заряду через них, що призводить до подальшого зростання колекторного струму та збільшення струмів інжекції. Цей процес відбувається лавиноподібно, і опір переходу Π_2 різко зменшується. У результаті зменшення опору падіння напруги на тиристорі стає незначним, і струм через тиристор обмежується тільки опором R .

На рис. 7.3 зображена ВАХ тиристора. Закритому стану тиристора відповідає ділянка 1. Процес лавинного збільшення кількості носіїв заряду відображає ділянку 2. Ця ділянка має негативний диференціальний опір. Після перемикання ВАХ тиристора буде аналогічною вітці ВАХ діода, який зміщений в прямому напрямку (ділянка 3).

Щоб замкнути тиристор, потрібно зменшити його робочий струм до значення, що задовольняє умові $I < I_{\text{кд}}$ за допомогою зниження напруги живлення.

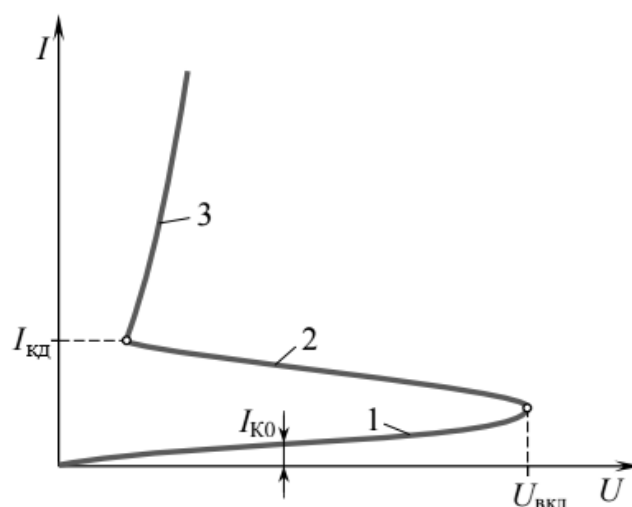


Рис. 7.3. ВАХ тиристора

Керовані тиристри. Тріодний тиристор відрізняється від діодного тим, що одна з його баз має зовнішній електрод, який називають керуючим електродом. Тиристор можна перевести в провідний стан, якщо підключити до однієї з його баз джерело струму в прямому напрямку. Розрізняють триністри з керуванням по катоду та з керуванням по аноду залежно від того, база якого емітерного переходу буде керуючою. На рис. 7.4. а зображена схема включення джерела керуючого струму в базу другого еквівалентного транзистора. Струм, що обумовлює перемикання тиристора, називають керуючим струмом I_k .

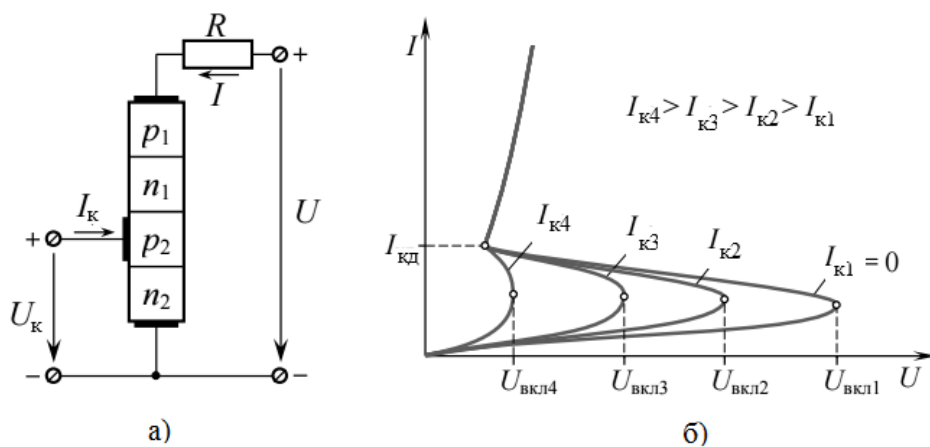


Рис. 7.4. Тиристор з керуванням по катоду: а - структурна схема; б - ВАХ.

Симістри. Для комутації кіл змінного струму застосовуються симетричні тиристри, у таких тиристорах ВАХ однакові в I і III квадрантах. Конструктивно симістри створюють на основі п'ятишарових напівпровідникових структур.

При подачі на керуючий електрод сигналу симістри відкриваються як в прямому, так і в зворотному напрямках. Вимкнення симістора реалізується при переході комутуючої напруги через нуль (зміні полярності напруги з одного півперіоду на інший).

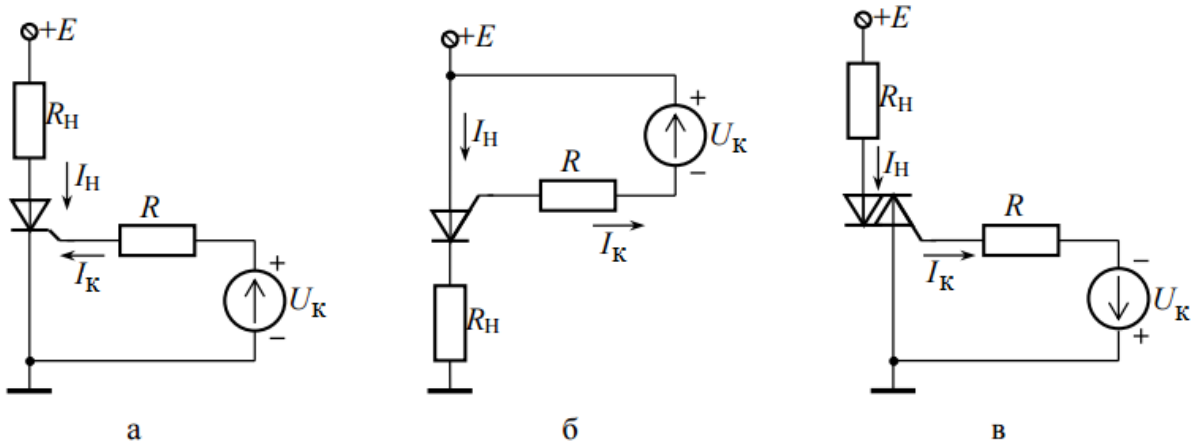


Рис. 7.5. Схеми ввімкнення тиристорів: а - з керуванням по катоду, б - з керуванням по аноду, в - керування симістором.

Застосування тиристорів. Тиристри знаходять застосування як в промисловій, так і в побутовій електроніці. Найбільшого застосування вони набули в пристроях електроживлення (випрямлячі, регулятори потужності, перетворювачі енергії, частотні регулятори), також їх часто застосовують в пристроях керування електроприводом, пристроях комутації та захисту.

До основного недоліку тиристора можна віднести те, що вони не можуть бути вимкнені за допомогою керуючого електрода.

Як приклад розглянемо використання тиристора для регулювання потужності електричного струму. Це вдається досягати подачею на опір навантаження змінної напруги протягом частини періоду (рис. 7.6). Цей спосіб регулювання потужністю називається фазовим регулюванням.

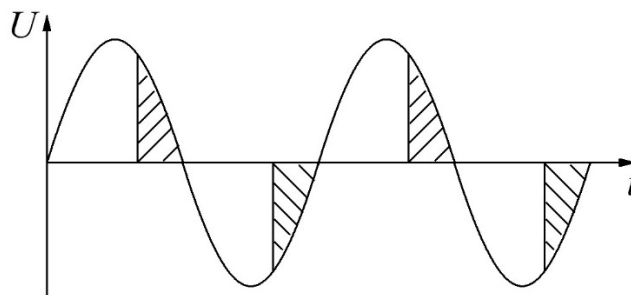


Рис. 7.6. Напруга при фазовому регулюванні потужності.

У схемі електричного кола, наведеній у роботі, в діагональ містка під'єднаний тиристор. Керування тиристором відбувається напругою, яка

знімається з конденсатора C . Час вмикання тиристора відносно фази напруги живлення, відповідно і потужність споживача, залежить від швидкості заряджання конденсатора. Швидкість заряджання конденсатора регулюється величиною опору резистора R_1 . При зменшенні опору R_1 конденсатор буде заряджатися швидше, відповідно, і потужність зросте. Це обумовлено тим, що час і величина струму, який проходить через споживача, залежить від часу перебування тиристора у відкритому стані.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження електронного ключа на тиристорі

1. Скласти електричне коло для дослідження електронного ключа на тиристорі (рис. 7.7).

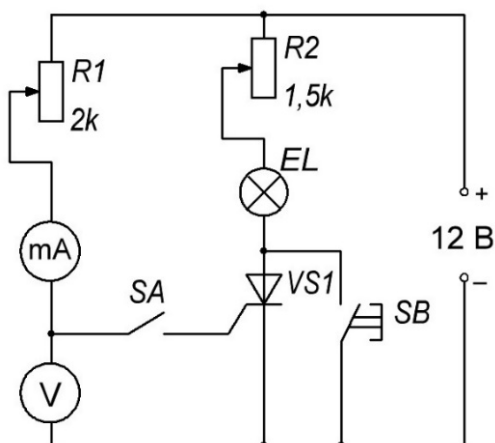


Рис. 7.7. Схема для дослідження електричного ключа на тиристорі

2. Встановити повзунки резисторів R_1 та R_2 у положення, які відповідають максимальному та мінімальному значенням опорів.
3. Увімкнути напругу живлення кола.
4. Зменшуючи опір резистора R_1 , записати у зошит значення сили струму керуючого електрода тиристора VS та напругу на ньому, при якій ввімкнеться лампа.
5. Вимикачем SA вимкнути напругу на керуючому електроді тиристора, відмітивши стан, у якому буде знаходитись тиристор.
6. Натиснувши кнопку SB , заблокувати тиристор VS , відмітити, в якому він

буде знаходитись стані після відпускання кнопки.

7. Вимкнути напругу живлення електричного кола.

8. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 7.8, увімкнувши міліамперметр в анодне коло тиристора.

9. Збільшуючи опір резистора R_2 , записати значення сили струму, при якому тиристор вимкнеться VS .

10. Висновки, зроблені на основі проведених досліджень, подати у формі звіту.

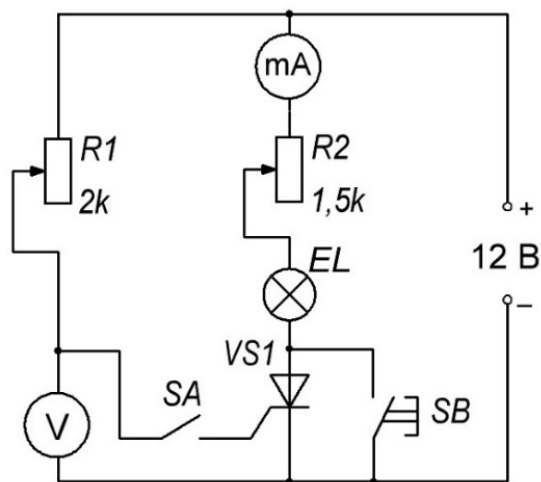


Рис. 7.8. Схема електричного кола для дослідження електричного ключа на тиристорі

Завдання 2. Використання тиристора в схемі регулювання потужності електричного струму

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 7.9.

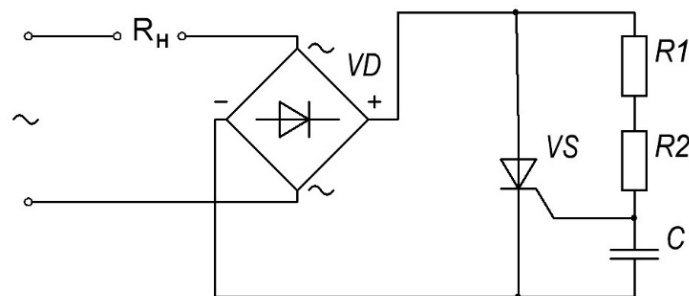


Рис. 7.9. Схема електричного кола для регулювання потужності електричного струму тиристором

2. Подати напругу живлення на коло.
3. Дослідити, що час і величина струму, який проходить через навантаження R_n , залежить від часу знаходження тиристора у відкритому стані.
4. Отримати на осцилографі різні осцилограми напруги на навантаженні при двопівперіодному випрямленні з фазовим регулюванням.

Контрольні запитання

1. Поясніть фізичні причини нелінійності ВАХ тиристора?
2. Які тиристори називають керованими?
3. Для чого призначений керуючий електрод в тиристорі?
4. Як перевести тиристор із відкритого стану в закритий?
5. У чому полягає фазове регулювання споживаної потужності?
6. Перерахуйте основні особливості симістора.

Лабораторна робота № 8.

Дослідження еквівалентів напівпровідникових елементів приладів з від'ємним диференціальним опором

Мета роботи: ознайомитись з однією із можливих транзисторних схем еквіваленту напівпровідникового елемента з від'ємним диференціальним опором. Одержати його ВАХ із різними навантажувальними резисторами.

Прилади і матеріали: панель з асиметричним транзисторним еквівалентом *p-n-p-n*-структури, джерело напруги (24 В), вольтметр, реостат, міліамперметр (200 мА), набір резисторів, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Особливістю напівпровідникових елементів з від'ємним диференціальним опором є їх багатofункціональність. Тобто з таких приладів можна створювати різноманітні радіотехнічні пристрої.

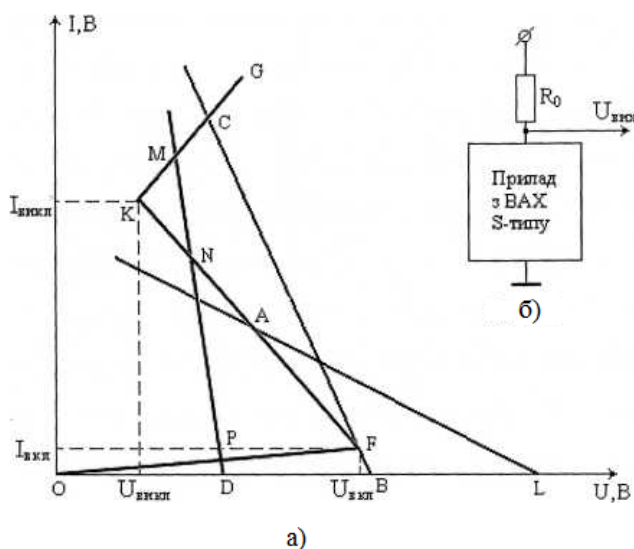


Рис. 8.1. а) робочі точки на ВАХ S-типу, б) структурна схема радіотехнічного приладу, який містить прилад з від'ємним диференціальним опором

На рис. 8.б. зображена структурна схема, яка містить прилад з від'ємним диференціальним опором і послідовно увімкненим до нього резистором R_0 . Резистор R_0 задає режим роботи і положення робочої точки.

Для визначення струмів та напруг вмикання і вимикання на ВАХ S-типу виділяються три основні ділянки (рис. 8.а). На ділянці OF біполярні транзистори працюють у режимі відсікання, на FK - в лінійному режимі, на KG - в режимі насичення. Якщо навантажувальна пряма MD перетинає ВАХ у трьох точках (рис. 8.а), то такий пристрій може виконувати функції тригера. У випадку, коли навантажувальна пряма AL перетинає ВАХ в одній точці (рис. 8.а), то отриманий пристрій працює в лінійному режимі і може виконувати функції підсилювача сигналів або генератора сигналів. При перетинанні ВАХ навантажувальною прямою BC у двох точках пристрій функціонує в ключовому (пороговому) режимі. Отже, один пристрій може виконувати різні функції, це і є їх основною перевагою.

Аналіз приладів з від'ємним диференціальним опором дає можливість зробити висновки, що ці прилади (тиристори, диністори, лавинні і одноперехідні транзистори) теоретично можуть працювати в будь-якому з режимів (наприклад ключовому, підсилювальному, генераторному). Для них властива економія енергії при роботі в ключовому режимі, високі робочі частоти, здатність комутувати сигнали великої потужності. Однак практичне застосування обмежується в основному пристроями імпульсної техніки. Це можна пояснити наявністю характерних для цих приладів недоліків. До цих недоліків відносяться низька температурна стабільність струмів та напруг вмикання та вимикання, висока чутливість деяких параметрів до зміни від'ємного диференціального опору, надмірне споживання електроенергії при роботі в лінійному режимі, висока напруга живлення, що призводить до труднощів при узгодженні з логічними мікросхемами.

Часто на практиці вимагається варіювання основних параметрів ВАХ. Тому виникають завдання зі створення приладів, в яких можна отримувати задані напруги і струми вмикання і вимикання. Прилади, які випускаються промисловістю, цим вимогам не відповідають. Одним із методів усунення перерахованих недоліків є розробка транзисторних аналогів або еквівалентів. Потрібно розуміти, що дана назва не обумовлена еквівалентністю фізичних процесів у вказаних пристроях, а обумовлена лише аналогію їх ВАХ.

Серед транзисторних еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором можна виділити групу, основу якої складають еквіваленти напівпровідникової *p-n-p-n*-структури.

На рис. 8.2. представлений двополюсник, аналог напівпровідникової *p-n-p-n*-структури.

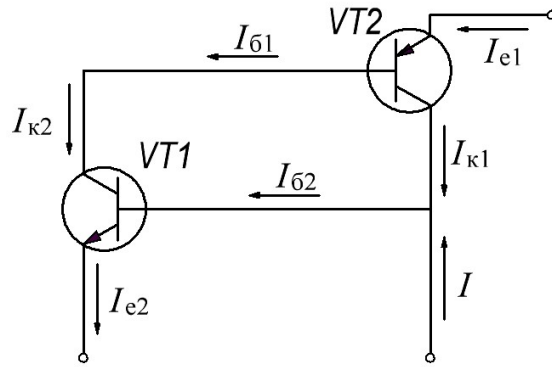


Рис. 8.2 Схема тиристорної $p-n-p-n$ -структури.

Відомо, що якщо в двополюснику є від'ємний зворотній зв'язок за напругою, то його вихідний опір буде додатнім та пропорційним глибині від'ємного зворотного зв'язку.

При додатному зворотному зв'язку за напругою двополюсник з ВАХ S-типу матиме від'ємний диференціальний опір. Транзистори, з яких складається $p-n-p-n$ -структура, в залежності від глибини та характеру додатного зворотного зв'язку можуть відразу перейти в режим насичення або спочатку функціонувати в лінійному режимі роботи, а далі, при зростанні напруги живлення, перейти в режим насичення. Все буде визначатися співвідношенням глибин додатних та від'ємних зворотних зв'язків $p-n-p-n$ -структури.

Розглянемо принцип дії транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури. Схема такого еквівалента зображена на рис. 8.3.

На ділянці OF ВАХ (рис. 8.1. а.) пристрій майже не споживає струму джерела живлення, оскільки транзистори закриті. Напруга, при якій транзистори переходять у відкритий стан, близька до напруги електричного пробою. При включенні одного транзистора через його колекторне коло почне проходити електричний струм, який обумовить спад напруги на колекторному резисторі, яка буде відмикаючою для другого транзистора. Саме в цьому полягає дія додатного зворотного зв'язку за струмом. Струм вмикання транзистора виявляється близьким до струму вимикання. Це обумовлює те, що пристрій має високий і майже некерований від'ємний диференціальний опір. Підключення

резисторів у коло додатного зворотного зв'язку за струмом (вказано пунктиром рис.8.3) дозволяє змінювати глибину зворотного зв'язку та впливати на умови вмикання і вимикання. При невеликих значеннях опорів $R_{кб}$ включення буде обумовлене різким зростанням струму при напрузі, близькій до напруги пробією транзисторів. При великих значеннях опорів $R_{кб}$ (порядку 1 – 100 кОм) струми транзисторів будуть обумовлювати на них напруги, достатні для вмикання еквівалента $p-n-p-n$ -структури при напругах, менших від напруги пробією транзисторів. У даному випадку від'ємний диференціальний опір буде зменшуватись, що обумовить зміну параметрів ВАХ.

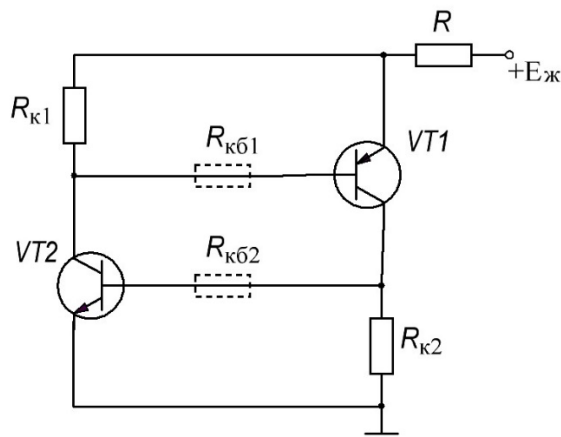


Рис. 8.3. Схема транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури

Одним із різновидів транзисторних еквівалентів $p-n-p-n$ -структури є схема, представлена на рис. 8.4.

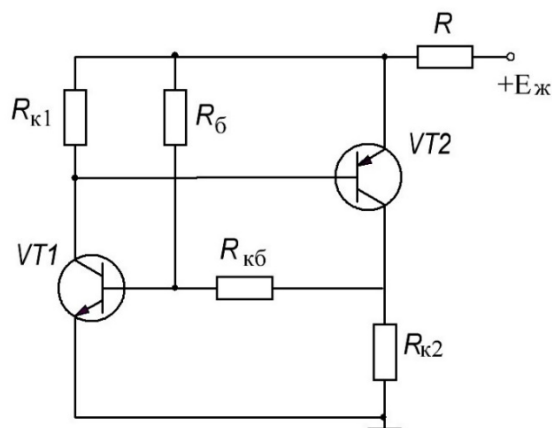


Рис. 8.4. Асиметричний транзисторний еквівалент $p-n-p-n$ -структури

На рис. 8.4 показано асиметричний еквівалент, у якому незалежно від напруг на переходах база-емітер першим завжди вмикається транзистор $VT1$. У вихідному стані обидва транзистори $VT1$ та $VT2$ закриті. Збільшення напруги живлення обумовлює зростання сили струму в подільнику напруги $R_6, R_{к6}, R_{к2}$.

Коли напруга на резисторах $R_{к6}$ і $R_{к2}$ буде рівною напрузі на переході база-емітер $U_{бе1}$, то транзистор $VT1$ відкриється і зросте сила струму $I_{к1}$ в колекторному колі транзистора $VT1$. Оскільки транзисторні еквіваленти $p-n-p-n$ -структури характеризуються великим коефіцієнтом підсилення за струмом, то $VT1$ може бути малопотужним з високоомним колекторним резистором. Опір такого резистора по величині співпадає з опором резистора R_6 . Транзистор $VT2$ потужний з низькоомним колекторним резистором.

Після включення пристрою більша частина струму проходить через колекторне коло потужного транзистора. Введенням $R_{к6}$ у коло додатного зворотного зв'язку та зміною його опору здійснюється регулювання глибини додатного зворотного зв'язку за струмом, вихідного диференціального опору, параметрів вмикання і вимикання. Збільшуючи напругу живлення, можна перевести транзистори в режим насичення. У представленому пристрої вдається отримати від'ємний, нульовий та додатний диференціальний опір. При цьому параметри вольт-амперної характеристики змінюються в широких межах.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 8.5.

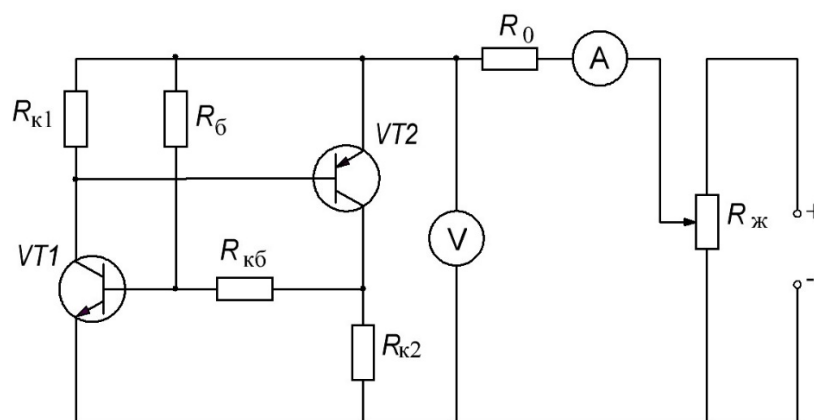


Рис. 8.5. Схема транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури

2. Межі вимірювань сили струму амперметра встановити на 200 мА.
3. Змінюючи напругу живлення резистором $R_{ж}$ через кожні 0,2 В, зняти ВАХ.
4. Під час виконання досліджень, не допускати перевищення струму через резистор R_0 вищого за 80 мА.
5. Змінити резистор навантаження R_0 та повторити вимірювання.
6. Отримані дані занести до таблиці.
7. За даними таблиці побудувати ВАХ приладу.

Контрольні запитання

1. Чому еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором на транзисторних схемах належать до багатофункціональних?
2. Де використовуються еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором?
3. Опишіть принцип дії основних електричних схем еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором.
4. Чим обумовлюється ділянка ВАХ з від'ємним диференціальним опором?

Лабораторна робота № 9.

Тунельний діод і резонансний генератор на його основі

Мета роботи: вивчити принцип дії тунельного діода, навчитись вимірювати його характеристики та параметри тунельного діода та резонансного генератора на його основі.

Прилади і матеріали: панель з тунельним діодом та резонансним генератором, мікроамперметр, частотомір, осцилограф, мілівольтметр, вольтметр, джерело живлення (1,5 В).

Теоретичні відомості

Тунельним діодом називають напівпровідниковий діод з сильнолегованими p та n областями, на прямій вітці ВАХ якого спостерігається N -подібна залежність сили струму від прикладеної напруги. На рис. 9.1. зображена ВАХ тунельного діода при прямому з'єднанні.

Розглянемо особливості ВАХ тунельного діода, для цього розглянемо $p^+ - n^+$ -перехід. $p^+ - n^+$ -перехід у тунельному діоді утворюється двома виродженими напівпровідниками. Якщо концентрація донорних домішок N_D та акцепторних домішок N_A в n^+ і p^+ у напівпровідниках буде становити $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, то концентрація основних носіїв заряду буде набагато вищою від ефективної густини станів у дозовлених зонах $p_{p0}, n_{n0} \gg N_C, N_V$. У такому випадку положення рівня Фермі буде знаходитися в дозовлених зонах p^+ і n^+ напівпровідників.

У напівпровіднику n^+ -типу всі стани у зоні провідності нижче рівня Фермі зайняті електронами, а в напівпровіднику p^+ -типу зайняті дірками. Зонна діаграма $p^+ - n^+$ переходу представлена на рис. 9.2. Для прямого дифузійного струму має місце велика висота потенціального бар'єру. Щоб отримати типові значення прямого струму, потрібно прикласти велику пряму напругу. У виразі для оберненого дрейфового струму концентрація неосновних носіїв $p_{n0} = n_i^2 / N_D$ порівняно мала, і тому обернений струм також буде малим.

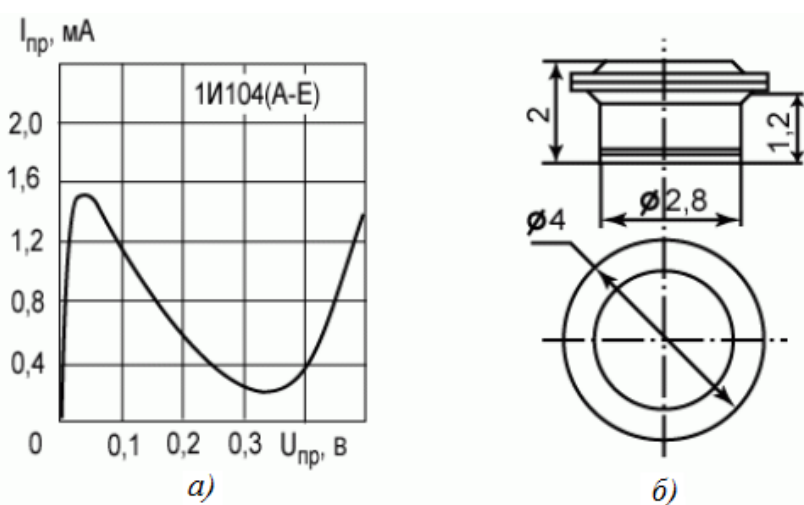


Рис. 9.1. Тунельний діод 1И104: а) вольт-амперна характеристика при прямому зв'язуванні; б) геометричні параметри діода

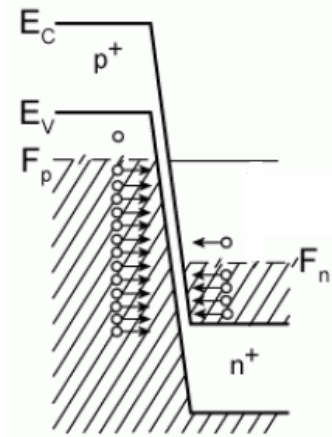


Рис. 9.2. Зонна діаграма p^+-n^+ -переходу в рівновазі

Визначимо, чому дорівнює ширина виродженого несиметричного p - n -переходу. Будемо вважати, що p^+ - більш сильнолегована область, тоді ширина p^+-n^+ -переходу:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 2\varphi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 10^{-6} \text{ см} = 100 \text{ \AA} .$$

Дебройлівську довжину хвилі електрона оцінимо із співвідношень:

$$E = kT = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} ; k = \frac{2\pi}{\lambda} ; E = \frac{\hbar^2 (2\pi)^2}{2m\lambda^2} ; \lambda = \frac{2mkT}{h^2} = \frac{1}{h} \sqrt{2mkT} ;$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{2 \cdot 91 \cdot 10^{31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}}{6,3 \cdot 10^{-34}} \approx 140 \text{ \AA} .$$

Отже, ширина p^+-n^+ -переходу співрозмірна з Дебройлівською довжиною хвилі електрона. У такому випадку в p^+-n^+ -переході будуть проявлятися квантово-механічні ефекти, одним з таких ефектів є тунелювання через потенціальний бар'єр. При вузькому бар'єрі ймовірність тунельного проходження електрона через бар'єр відмінна від нуля. Розглянемо тунельні ефекти у вироджених p^+-n^+ -переходах при різних напругах.

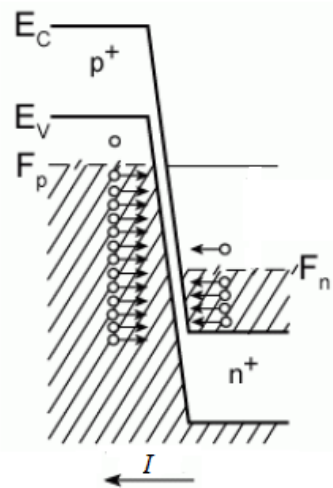


Рис. 9.3. Зонна діаграма тунельного діода при зворотному включенні

На рис. 9.3 представлена зонна діаграма тунельного діода при зворотному включенні. При оберненій напрузі струм в діоді буде обумовлюватись тунельним переходом електронів із валентної зони в зону провідності. Оскільки концентрація електронів і кількість вільних місць в зоні провідності досить великі, то тунельний струм буде різко зростати зі зростанням оберненої напруги. Така поведінка вольт-амперної характеристики різко відрізняє тунельний діод від звичайного діода (випрямного).

При прямій напрузі струм в діоді обумовлюється тунельним переходом носіїв заряду із зони провідності на вільні місця валентної зони. Оскільки тунельні переходи відбуваються без розсіювання енергії, то на зонній діаграмі ці процеси будуть відображатися прямими горизонтальними лініями.

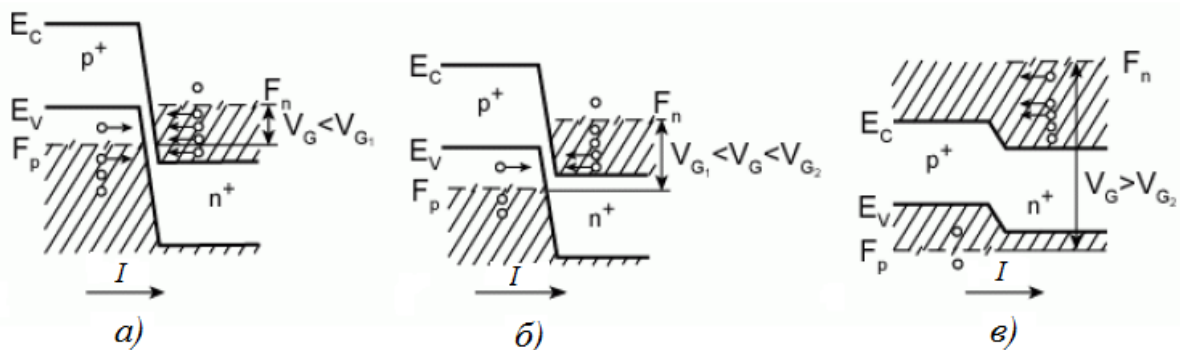


Рис. 9.4. Зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні: а) ділянка 1, б) ділянка 2, в) ділянка 3

На рис. 9.4 зображені зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні, які відповідають трьом точкам на прямій вітці ВАХ. На ділянці 1 (рис.9.4) при невисоких значеннях прямої напруги навпроти електронів зони провідності будуть з'являтися вільні місця у валентній зоні при тій же самій енергії. У міру збільшення напруги число вільних місць також буде збільшуватись і, відповідно, зростатиме струм зі збільшенням напруги. Тунельний струм набуває найбільшого значення при умові, коли всі вакантні місця у валентній зоні будуть розташовані навпроти енергетичних рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності (ділянка 2) (рис. 9.4). Зі збільшенням прямої напруги число цих вакантних місць буде зменшуватися. Це обумовлено тим, що навпроти рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності, виявляються стани в забороненій зоні. На відрізку 3 (рис. 9.4) тунельний струм зменшується зі збільшенням напруги і перетворюється в нуль у випадку, коли заборонена зона p^+ напівпровідника буде енергетично розташована напроти рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності. Подальше зростання прямої напруги обумовлює появу компоненти звичайного дифузійного струму через p - n -перехід.

Ділянка 3 (рис. 9.4) відповідає від'ємному диференціальному опору. Розглянемо детально вольт-амперну характеристику тунельного діода. У випадку прямого зміщення p - n -переходу ВАХ описується формулою:

$$I = A' \frac{qV}{4kT} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - qV)^2, \quad (9.3)$$

де ε_1 і ε_2 – енергетична відстань положення рівня Фермі до дна зони провідності та стелі валентної зони.

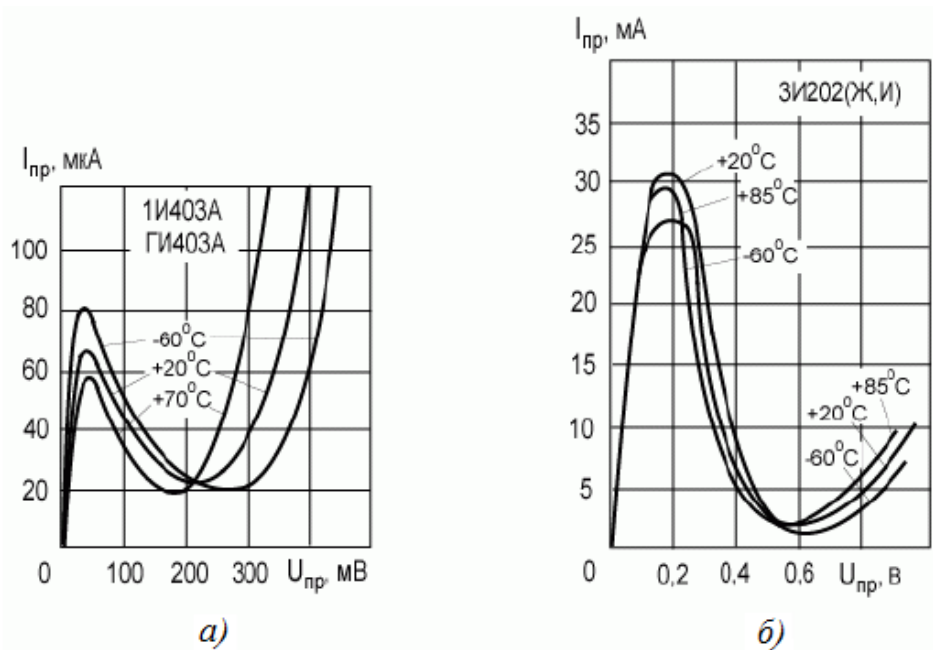


Рис. 9.5. Температурні залежності прямих віток ВАХ в тунельних діодах: а) германієвий діод 1И403; б) арсенід галієвий діод 3И202

Теоретичний розрахунок ВАХ тунельного діода за формулою (9.3) добре узгоджується з результатами експерименту. На рис. 9.5 зображені температурні залежності прямого струму від напруги тунельних діодів, виготовлених з Ge та GaAs. З рис. 9.5 видно, що у діода, виготовленого з більш широкозонного напівпровідника GaAs, ніж Ge, мінімальні значення струму спостерігаються при великих значеннях прямої напруги. Варто відмітити, що тунельному діоду властиві високі значення максимальної граничної частоти $f_{\max} \sim 10^9$ Гц, оскільки тривалість процесів при тунелюванні $\tau_{\min} \sim 10^{-9}$ с. Тому тунельні діоди використовують в НВЧ-техніці.

Розглянемо ВАХ $p-n$ -переходу у випадку, коли положення рівня Фермі в напівпровіднику n -типу провідності та напівпровіднику p -типу провідності збігаються або розташовані на відстані $+kT/q$ від дна зони провідності або стелі валентної зони. У такому випадку ВАХ діода при зворотному включенні буде така ж сама, як і у тунельного діода. Тобто при зростанні оберненої напруги буде спостерігатись швидке зростання оберненого струму.

При прямому включенні $p-n$ -переходу тунельна компонента ВАХ буде відсутня. Це обумовлено тим, що немає повністю заповнених станів у зоні

провідності. Тому при включенні $p-n$ -переходу в таких діодах при напругах, більших або рівних половині ширини забороненої зони, струм буде відсутній. ВАХ такого діода буде інверсною (оберненою), тобто буде висока провідність при зворотному зміщенні $p-n$ -переходу і мала при прямому зміщенні $p-n$ -переходу. Тунельні діоди з інверсною ВАХ отримали назву обернених діодів. ВАХ такого діода представлена на рис. 9.6. Можна стверджувати що, обернений діод - це тунельний діод, у якому відсутня ділянка з негативним диференціальним опором. Висока нелінійність ВАХ при малих напругах (порядку 1 мкВ) дозволяє використовувати такі діоди для детектування слабких сигналів у НВЧ-діапазоні.

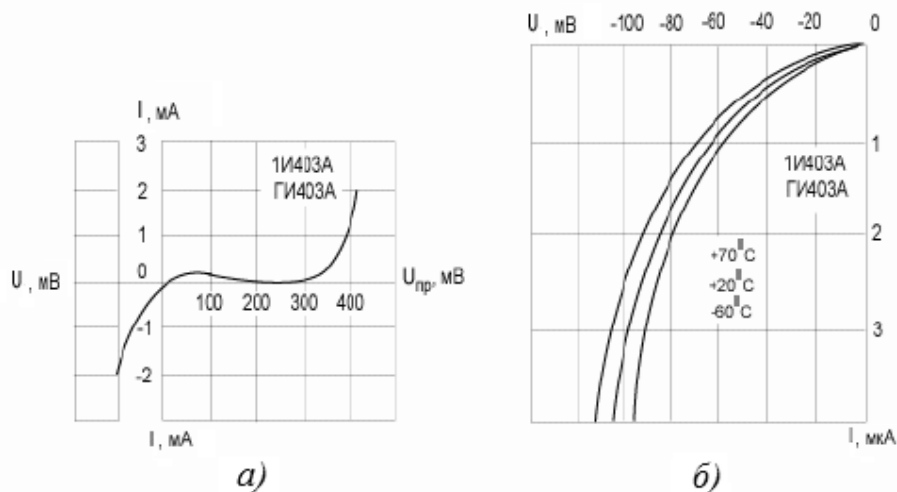


Рис. 9.6. Вольт-амперна характеристика германієвого оберненого діода ГИ403:
а) повна ВАХ; б) зворотна вітка ВАХ при різних значеннях температури

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження ВАХ тунельного діода.

1. Перемикачем S перевести макет в режим дослідження ВАХ тунельного діода.

2. Під'єднати вимірювальні прилади так, як зображено на рис. 9.7. Амперметр налаштувати в режим вимірювання постійного струму з номінальним струмом 20 мА. Вольтметр налаштувати в режим вимірювання постійної напруги з номінальним значенням 1 В.

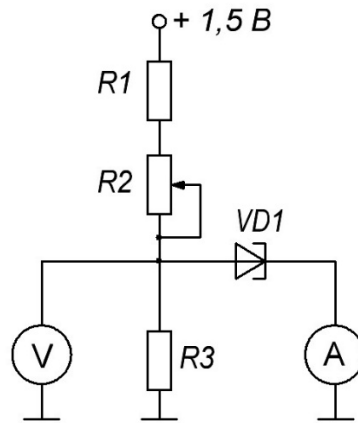


Рис. 9.7. Схема для дослідження ВАХ тунельного діода

3. Увімкнути джерело живлення діода.
4. Змінюючи опір резистора R1, вимірювати напругу на діоді через 30 мВ та реєструвати покази амперметра.
5. Результати вимірювань записати в табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Пряма вітка ВАХ тунельного діода

U , мВ	0	30	60	90	120	150
I , мА							

6. Побудувати пряму вітку ВАХ тунельного діода.
7. На основі експериментальних результатів оцінити величину від'ємного диференціального опору.
8. Визначити напругу зміщення і струм через діод в точці максимуму і мінімуму прямої вітки ВАХ.

Завдання 2. Дослідження резонансного генератора на тунельному діоді.

1. Перемикачем S перевести макет в режим для дослідження генератора на тунельному діоді.
2. Підключити вимірювальні прилади по схемі, зображеній на рис. 9.8.

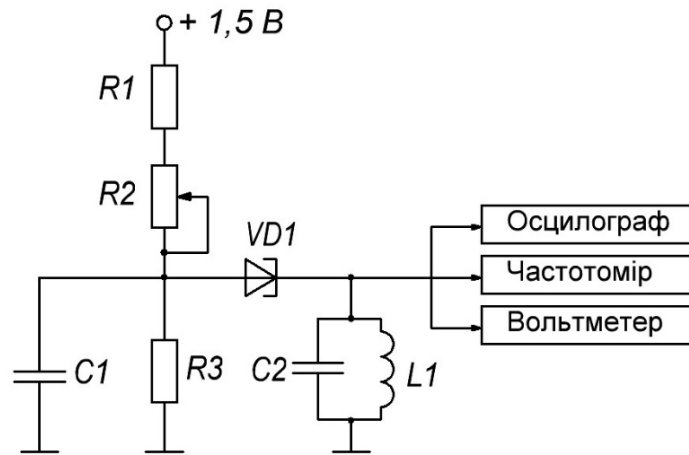


Рис. 9.8. Схема вимірювання параметрів генератора на тунельному діоді

3. Увімкнути живлення резонансного генератора.
4. За допомогою змінного резистора R_2 збільшувати напругу на діоді, отримати на екрані осцилографа періодичні коливання.
5. Осцилограму коливань перемалювати у зошит.
6. Збільшуючи напругу зміщення, зняти покази вольтметра змінного струму, вольтметра постійного струму та частотоміра.
7. Дані досліджень записати в табл. 9.2.

Таблиця 9.2.

U_D , мВ				
$U_{вих}$, мВ				
$F_{вих}$, кГц				

8. Напругу зміщення збільшувати до зникнення коливань.
9. Побудувати графіки залежності частоти та амплітуди коливань від напруги зміщення.

Контрольні запитання

1. У чому відмінність тунельного діода від звичайного випрямного?
2. У чому особливості ВАХ тунельного діода?
3. Покажіть на вольт-амперній характеристиці тунельного діода ділянку з від'ємним диференціальним опором?

4. Чому ВАХ тунельного діода має N -подібну форму.
5. Де використовують тунельні діоди?

Лабораторна робота № 10. **Дослідження мікросхем для керування напівпровідниковим цифро- буквеним індикатором**

Мета роботи: вивчити принцип дії цифрових інтегральних мікросхем, призначених для керування роботою напівпровідникового семисегментного цифро-буквеного індикатора

Прилади і матеріали: панель ESPE-2 (Devise II), джерело живлення (5 В), з'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Крім спеціалізованих великих інтегральних схем у сучасній електроніці використовується універсальний набір логічних елементів у вигляді інтегральних мікросхем, які забезпечують реалізацію логічних функцій. До цього набору можна віднести інвертор, кон'юнктор, диз'юнктор, повторювач, І-НЕ, АБО-НЕ, виключне АБО, і т. ін.

Логічний елемент НЕ (інвертор). Логічний елемент НЕ реалізовує логічну функцію

$$Y = \bar{X}$$

На рис.11.1 зображено його умовне схематичне позначення (рис. 10.1, а) та принципова електрична схема (рис. 10.1, б).

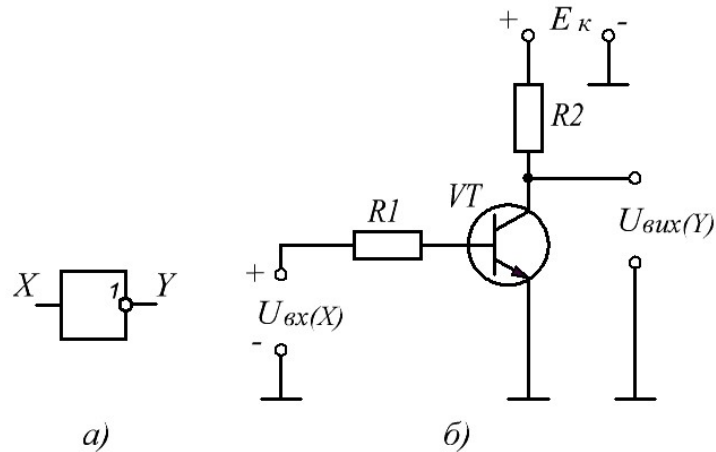


Рис. 10.1. Логічний елемент НЕ: а) умовне схематичне позначення; б) принципова електрична схема

Логічний елемент І (кон'юнктор). Логічний елемент І реалізовує логічну функцію

$$Y = X_1 \wedge X_2 = X_1 \cdot X_2.$$

На рис. 10.2 показані його умовне схематичне позначення (рис. 10.2, а), принципова схема (рис. 10.2, б) та таблиця істинності (табл. 10.1).

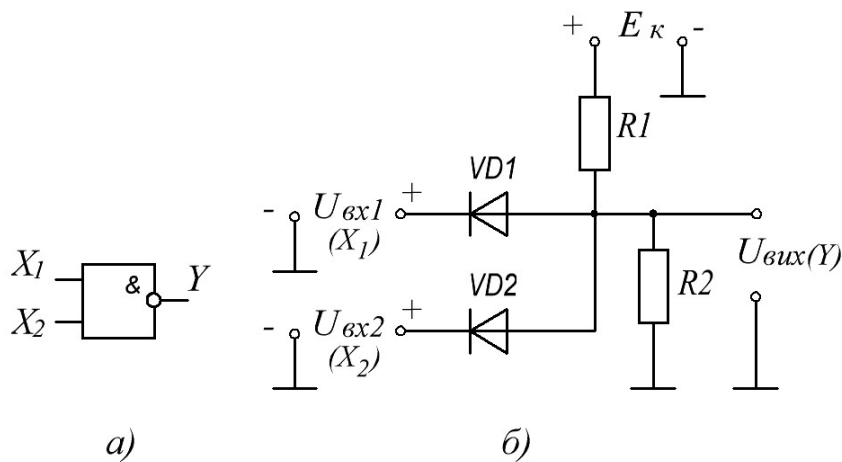


Рис. 11.2. Логічний елемент І: а) позначення на електричних схемах; б) принципова електрична схема

Таблиця 10.1. Таблиця істинності
логічного елемента І

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логічний елемент АБО (Диз'юнктор)

Диз'юнктор реалізує логічну функцію

$$Y = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2$$

Нижче показані його позначення на електричних схемах (рис. 10.3.а),
принципова схема (рис. 10.3. б) і таблиця істинності (табл. 10.2).

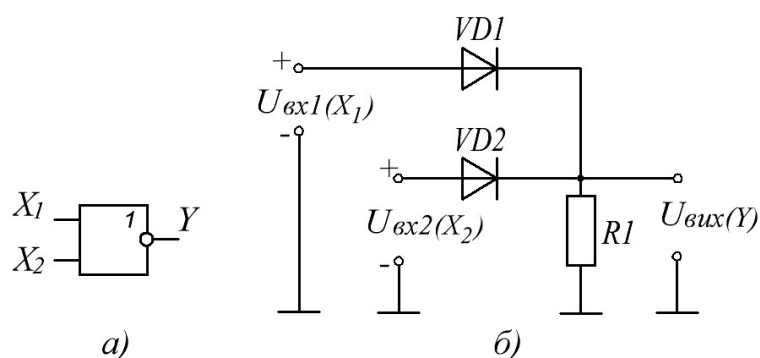


Рис. 10.3. Логічний елемент АБО: а) умовне схематичне позначення; б)
принципова електрична схема

Таблиця 10.2. Таблиця істинності
логічного елемента АБО

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Особливість логічного елемента АБО полягає в тому, що на його виході з'являється сигнал низького рівня тільки тоді, коли на усі його входи подаються також сигнали низького рівня.

Логічний елемент І – НЕ. Елемент І - НЕ реалізовує логічну функцію

$$Y = \overline{X_1 \wedge X_2} = \overline{X_1 \cdot X_2}$$

Нижче показані його позначення на електричних схемах (рис. 10.4, а) та функціональна схема (рис. 10.4, б) і таблиця істинності (табл. 10.3).

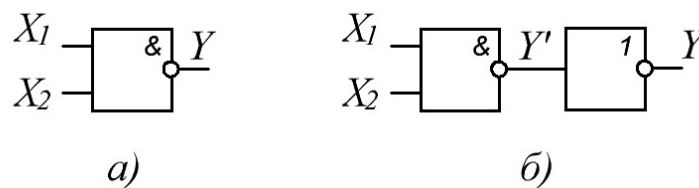


Рис. 10.4. Логічний елемент І-НЕ: а) умовне схематичне позначення; б) функціональна схема

Таблиця 13.3. Таблиця істинності логічного елемента І-НЕ

X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Логічний елемент АБО-НЕ. Логічний елемент АБО-НЕ реалізує логічну функцію

$$Y = \overline{X_1 \vee X_2} = \overline{X_1 + X_2}$$

На рис. 10.5 показані його позначення на електричних схемах (рис. 10.5, а), функціональна схема (рис. 10.5, б) та таблиця істинності (табл. 10.4).

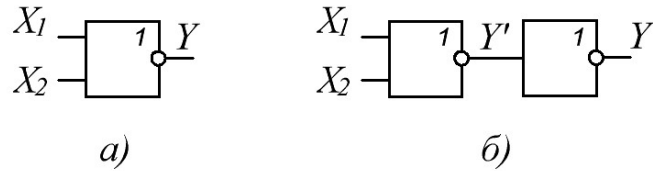


Рис. 10.5. Логічний елемент АБО-НЕ: а) позначення на електричних схемах; б) функціональна схема

Таблиця 10.4. Таблиця істинності логічного елемента АБО-НЕ

X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Виключне АБО. Логічний елемент “Виключне АБО” реалізує логічну функцію

$$Y = X_1 \oplus X_2 = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2$$

Нижче показані його позначення на електричних схемах (рис. 10.6) і таблиця істинності (табл. 10.5).

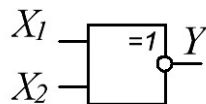


Рис. 10.6. Позначення логічного елемента “Виключне АБО” на електричних схемах

Таблиця 10.5. Таблиця істинності логічного елемента Виключне АБО

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Мікросхема SN7402. Мікросхема SN7402 є зарубіжними аналогом вітчизняних мікросхем К155ЛЕ1 та КМ155ЛЕ1. Мікросхема SN7402 представляє собою чотири логічних елементи 2АБО-НЕ (рис. 10.7).

Електрична схема одного елемента 2АБО-НЕ мікросхеми SN7402 показана на рис.10.8.

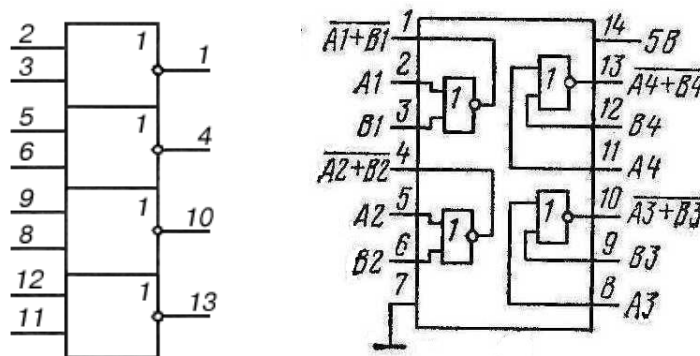


Рис. 10.7. Призначення та нумерація ніжок мікросхеми SN7402 та її структурна схема

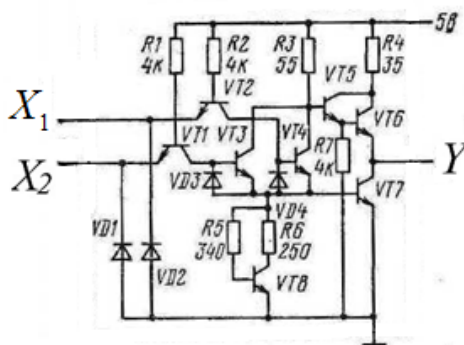


Рис. 10.8. Електрична схема одного елемента 2АБО-НЕ мікросхеми SN7402 та її зовнішній вигляд

Мікросхема SN7400. У функціональній структурі мікросхеми SN7400 міститься чотири незалежних один від одного логічних елементи 2І-НЕ. (загальний вивід - 7, вивід 14 - позитивний полюс живлення).

Мікросхема SN7400 є зарубіжним аналогом мікросхеми К155ЛА3.

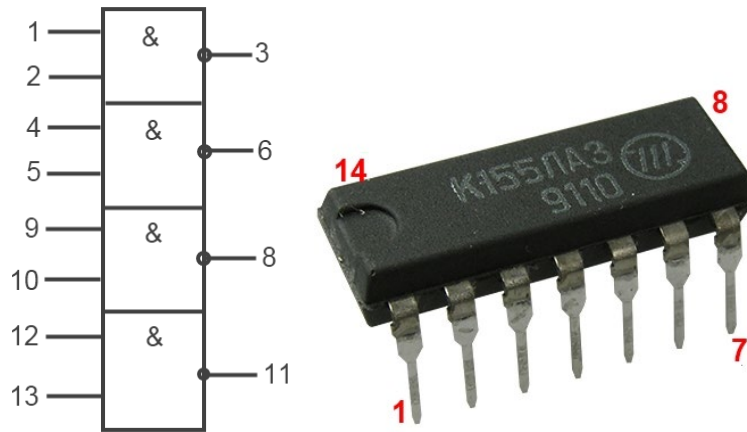


Рис. 10.9. Структурна схема та зовнішній вигляд мікросхеми SN7400.

Мікросхема КМ155ИЕ6. Зарубіжні аналоги SN74192N, SN74192J. Мікросхема являє собою двійково-десятковий прямий та реверсивний лічильник. Містить 268 інтегральних елементів. Корпус КМ155ИЕ6 типу 201.16-6.

Імпульсні тактові входи для рахунку на збільшення C_u (вивід 5) і на зменшення C_d (вивід 4) окремі. Стан лічильника змінюється по позитивних перепадах тактових імпульсів від низького рівня до високого на кожному з цих тактових входів.

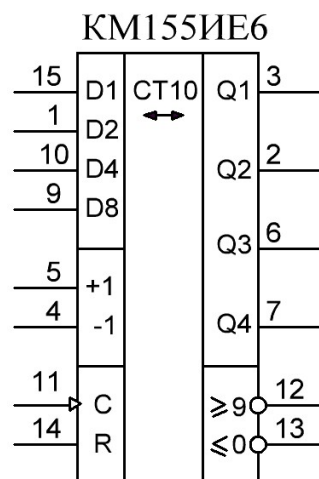


Рис. 10.10. Умовне позначення мікросхеми КМ155ИЕ6 та призначення її ніжок:

D1, D2, D4, D8 – інформаційні входи; Q1, Q2, Q3, Q4 – виходи першого, другого, третього та четвертого розрядів; -1 - вхід "зворотний рахунок"; +1 -

вхід "прямий рахунок"; С - вхід попереднім записом; R - вхід установки "0"; ≥ 9 - вихід "пряме перенесення"; ≤ 0 - вихід "зворотне перенесення".

Мікросхема КР514ИД2. Мікросхеми 514ИД2, КР514ИД2 призначені для управління напівпровідниковими семисегментними цифро-буквеними індикаторами, які використовуються в електронній апаратурі. КР514ИД2 - мікросхема дешифратор двійково-десятькового коду для 7-сегментного світлодіодного індикатора із загальним анодом.

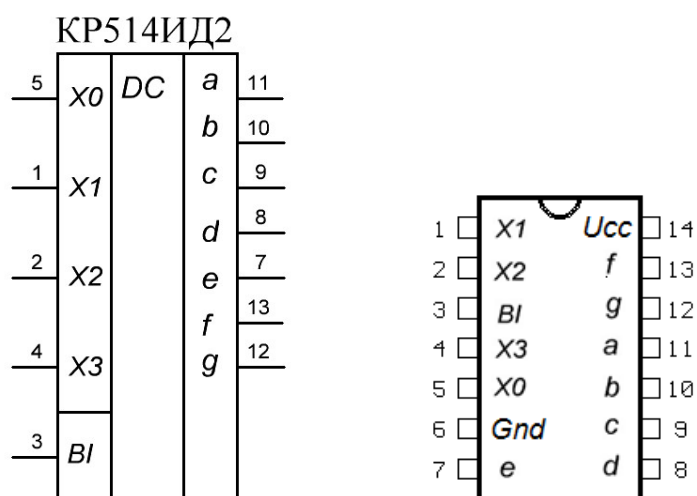


Рис. 10.11. Умовне позначення мікросхеми КР514ИД2 та призначення її ніжок:

X0, X1, X2, X3 - інформаційні входи; BI - вхід гашення; a, b, c, d, e, f, g - виходи, що підключаються до сегментних індикаторів; Ucc - живлення +5 В; Gnd - спільний

Таблиця 10.6. Таблиця істинності мікросхеми КР514ИД2

X0	X1	X2	X3	a	b	c	d	e	f	g	Символ
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	2
1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	3
0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	4
1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	5
0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	7
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	c
1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	e
0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	u
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	c
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	-
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	t

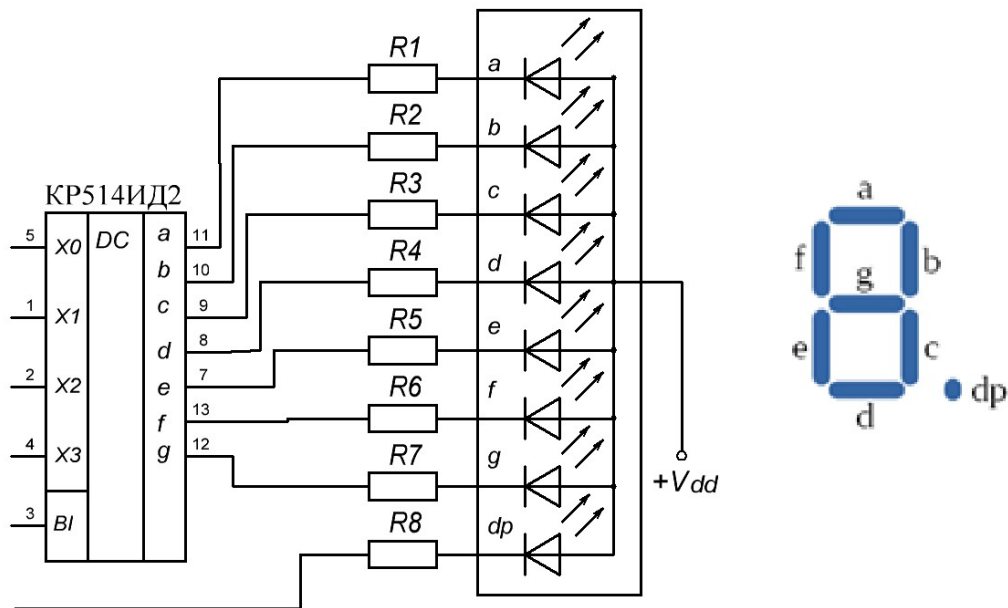


Рис. 10.12. Схема підключення семисегментного індикатора до мікросхеми КР514ИД2 зі спільним анодом

Порядок виконання роботи

1. Дослідити роботу мікросхеми К155ЛЕ1. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента АБО-НЕ.
2. Дослідити роботу мікросхеми 155ЛА3. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента І-НЕ.
3. Дослідити роботу мікросхеми КМ155ИЕ6 та КР514ИД2. Дослідити залежність показів семисегментного цифро-буквеного індикатора від двійкового коду на входах та виходах мікросхем. За результатами проведених досліджень побудувати таблиці істинності.

Контрольні питання

1. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента НЕ.
2. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента І.
3. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента АБО.

4. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «Виключне АБО».

5. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «АБО-НЕ»

6. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «І-НЕ»

7. Охарактеризуйте мікросхеми SN7402 та SN7400.

8. Для чого призначений прямий та реверсивний двійково-десятковий лічильник?

9. Як на електронних схемах позначають мікросхему КР514ИД2 - дешифратор двійково-десятькового коду?

10. Поясніть принцип дії мікросхеми КР514ИД2 - дешифратора двійково-десятькового коду.

11. Що представляє собою напівпровідниковий семисегментний індикатор?

Рекомендована література та інтернет ресурси

1. Борисов О. В., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка: підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2018. 484 с.
2. Дружинін А. О., Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів. Навчальний посібник. Львів : Видавн. Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 332 с.
3. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. за ред. Ю. І. Якименка. К. : Освіта України, 2011. 462 с.
4. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. К. : Каравела, 2004. 432 с.
5. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник для студ. вузів. К. : Каравела, 2008. 687 с.
6. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: Підручник. К. : Вища шк., 2012. 527с.
7. Городжа А. Д. Загальна Електротехніка та основи електроніки. К. : КНУБА, 2000. 150 с.
8. Малинівський С.М. Загальна Електротехніка та основи електроніки. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2001. 596 с.
9. Титаренко М. В. Електротехніка та основи електроніки: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вузів. К. : Кондор, 2004. 240 с.
10. Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І., Якименко Ю.І. Напівпровідникові прилади: Підручник. К. : ІВЦ, "Видавництво «Політехніка", 2003. 388 с.
11. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник. Львів: Афіша, 2001. 424 с.
12. Мар'янчук П.Д., Козярьський І.П. Електронні процеси в напівпровідниках. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т., 2016. 132 с.
13. Цибульський Л.Ю. Фізичні основи електроніки. Ч.1: Фізика твердого тіла. К. : НТУУ «КПІ», 2016. 250 с.

14. Дрозденко К.С. Фізичні основи електроніки: курс лекцій. К. : НТУУ «КПІ», 2021. 153 с.
15. Поплавко Ю.М., Ільченко В.І., Воронов А.С., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Ч. 3. Напівпровідники. К. : Політехнік, 2011.
16. Москалюк В.О., Тимофеев В.І., Саурова Т.А. Фізика електронних процесів. К. : НТУУ «КПІ», 2020. 324 с.
17. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти у 4-х т. – Т.2: Аналогові та імпульсні пристрої. К. : ТОВ "Видавництво Обереги", 2000, 510 с.
18. Новосад О. В., Федосов С. А., Божко В. В., Кевшин А. Г. Електроніка: методичні рекомендації до лабораторних робіт. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 87 с. Режим доступу: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19583> (дата звернення: 30.09.2024).
19. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електроніка: задачі. Луцьк: Вежа-Друк, 2020. 48 с. Режим доступу: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/19584> (дата звернення: 30.09.2024).
20. Новосад О. В., Федосов С. А., Кевшин А. Г. Лабораторний практикум з електрики і магнетизму : навч. посіб. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2023. 165 с. Режим доступу: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/23304> (дата звернення: 30.09.2024).
21. Paul Horowitz, Winfield Hill. The Art of Electronics. Cambridge: Cambridge University Press. 2015. 1255 p.
22. Infobooks. 25+ Electronics Books for Free! Режим доступу: <https://www.infobooks.org/free-pdf-books/physics/electronics/#-basic-electronics-books-> (дата звернення: 30.09.2024).
23. Streetman B., Banerjee S. Solid State Electronic Devices 7th Edition. University of Texas at Austin, 2016. 621 p. Режим доступу: <https://rrsdce.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/07/sspd-eee-swapnil.pdf> (дата звернення: 30.09.2024).

Навчально-методичне видання

Новосад Олексій Володимирович

Елементна база напівпровідникової електроніки

Лабораторний практикум

Друкується в авторській редакції