

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи
з дисципліни "Твердотільна електроніка"
для студентів спеціальностей

171 "Електроніка", 153 "Мікро- та наносистемна техніка"
усіх форм навчання

Суми
Сумський державний університет
2022

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Твердотільна електроніка" / укладачі А.С. Опанасюк, О.М. Кобяков, Я.В. Знаменщиков. - Суми: Сумський державний університет, 2023. - 64 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

Зміст

	С.
1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	5
2 СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	7
2.1. Основна навчальна література.....	7
2.2. Додаткова рекомендована література.....	8
3. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ ТА ПИТАННЯ КУРСУ «ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ».....	9
3.1. Оформлення курсової роботи.....	9
3.2. Питання що вивчаються у другому семестрі курсу «Твердотільної електроніки».....	10
4. КУРСОВА РОБОТА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ.....	13
4.1. Реферативна частина. Завдання 1.....	13
4.2. Розрахункова частина. Завдання 2. Побудова зонної діаграми гетеропереходу з межею поділу матеріалів близькою до ідеальної.....	14
Мета розрахунку.....	14
Теоретичні відомості.....	14
Зміст завдання.....	18
Методичні вказівки до виконання завдання.....	20
4.3. Розрахункова частина. Завдання 3. Визначення основних робочих характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів.....	22
Мета завдання.....	22
Теоретичні відомості.....	22
Зміст завдання.....	29
Методичні вказівки до виконання завдання.....	30
4.4. Розрахункова частина. Завдання 4. Розрахунок та аналіз роботи підсилювальних каскадів на операційних підсилювачах.....	31
Мета розрахунку.....	31
Теоретичні відомості.....	31
Зміст завдання.....	35

Методичні вказівки до виконання завдання та приклад розрахунку.....	37
Порядок розрахунку.....	38
5 ДОВІДНИКОВИЙ МІНІМУМ.....	41
5.1. Основні формули, що використовуються у КР.....	41
5.2. Основні константи, що використовуються у КР.....	43

1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Навчальна дисципліна «Твердотільна електроніка» належить до циклу професійної та практичної підготовки освітньо-професійної програми навчання студентів за спеціальностями 171 "Електроніка", 153 "Мікро- та наносистемна техніка" усіх форм навчання. Метою вивчення дисципліни є формування у студентів знань в області функціонування напівпровідникових приладів та особливостей їхнього застосування в електронних схемах.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні:

- отримати знання про основні активні твердотільні елементи електронної апаратури;
- розширити свій науково-технічний кругозір в області електронної техніки;
- придбати знання, необхідні інженеру, що займається експлуатацією пристроїв і систем електроніки.

Після засвоєння матеріалу навчальної дисципліни студент повинен:

ЗНАТИ:

- фізичні принципи роботи приладів твердотільної електроніки, що являються основою їх функціонування;
- параметри і характеристики різних напівпровідникових приладів і елементів інтегральних мікросхем, необхідні для забезпечення їх штатних режимів роботи;
- особливості експлуатації та можливі застосування основних приладів електроніки;
- типові аналогові та цифрові схемотехнічні рішення.

ВОЛОДІТИ:

- інформацією про області застосування і перспективи розвитку приладів і пристроїв твердотільної електроніки і мікроелектроніки;
- методами дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) та інших параметрів і характеристик приладів твердотільної електроніки;

ВМІТИ:

- забезпечувати штатні режими роботи електронних приладів;
- експериментально знімати основні характеристики і визначати параметри напівпровідникових приладів;
- представляти основні активні прилади твердотільної електроніки у вигляді еквівалентних схем та електричних моделей;
- аналізувати роботу електронних схем;
- застосовувати прилади твердотільної електроніки для реалізації схемних рішень;
- створювати на основі типових рішень та універсальних схем нові схемотехнічні продукти.

Дисципліна «Твердотільна електроніка» вивчається студентами усіх форм навчання на 2-3 курсах (4-5 семестри). Робоча програма передбачає викладання 64-годинного лекційного курсу, проведення практичних занять, а також виконання студентами лабораторних робіт у рамках лабораторного практикуму. Крім того, студентам у 5 семестрі пропонується виконати курсову роботу (КР), яка містить теоретичні питання за темами курсу, а також розрахункову частину.

На лекціях викладаються основні питання тем робочої програми, спираючись на які студент за допомогою методичних вказівок, рекомендованої літератури та лекційного курсу ***самостійно вивчає всі питання розділу.***

У процесі вивчення розділів дисципліни рекомендується скласти стислий конспект, звертаючи основну увагу на фізичні процеси у приладах в статичному та динамічному режимі їх роботи. Виведення не основних формул можна опустити, але обов'язково потрібно знати початкові умови отримання та фізичну сутність цих формул. Після вивчення кожної теми студент повинен вміти відповісти на усі запитання самоконтролю. Якщо у процесі вивчення деяких тем, при відповідях на запитання самоконтролю чи при виконанні контрольних робіт виникають ускладнення, рекомендується в

усній чи письмовій формі звернутись за поясненнями та консультацією до провідного викладача, що викладає відповідний курс.

Вивчення розділів робочої програми слід здійснювати за допомогою рекомендованої літератури, посилення на яку наведені після методичних вказівок до кожного розділу з вказівкою сторінок. Проте можна використовувати й інші літературні джерела, якщо глибина і обсяг матеріалу у них відповідає вимогам навчальної програми.

2. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

2.1. Основна навчальна література

1. Курс лекцій з дисципліни «Твердотільна електроніка» / А.І. Новгородцев, О.А. Борисенко, О.М. Кобяков та ін. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 205 с.

2. Твердотільна електроніка: підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.

3. Дружинін А.О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посіб. / А.О. Дружинін. - Львів: Львівська політехніка, 2009. - 332 с.

4. Фізичні основи електронної техніки / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лукіянець та ін. – Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.

5. Медведенко Б.І. Напівпровідникові прилади: підручник / Л.Д. Васильєва, Б.І. Медведенко, Ю.І. Якименко. – Київ: Кондор, 2008. - 388 с.

6. Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І., Якименко Ю.І. Напівпровідникові прилади. - Київ: ЗІВЦ Видавництво «Політехніка», 2003, -388 с.

7. Papadopoulos C. Solid-State Electronic Devices: An Introduction / C. Papadopoulos. - Springer Science, 2014. – 287 p.

8. Streetman B. Solid State Electronic Devices 7th Edition / B. Streetman, S. Banerjee/ - University of Texas at Austin, 2016. – 212 p.

9. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Твердотельна електроніка » Укл. Любимий О. А. СумДУ, 2012 р

2.2. Додаткова рекомендована література

1. Осадчук В.С. Напівпровідникові діоди / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 162 с.

2. Осадчук В.С. Транзистори / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 207 с.

3. Brennan K.F. Physics of semiconductors with application to optoelectronic devices /K.F. Brennan. Cambridge University press, 2001. - 762 p.

4. Grundmann M. The physics of semiconductors. An introduction nanophysics and application / M. Grundmann – Springer, 2010. – 772 с.

5. Борисенко О.А. Твердотільна електроніка, навч. посіб. / О.А. Борисенко, О.М. Кобяков, А.І. Новгородцев та ін. - Суми: СумДУ, 2013. – 271 с.

3. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ ТА ПИТАННЯ КУРСУ «ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ»

3.1. Оформлення курсової роботи

Виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Твердотільна електроніка» передбачене навчальним планом у п'ятому семестрі.

До виконання курсової роботи слід приступати лише після вивчення теоретичного матеріалу відповідних тем робочої програми. Вона складається з реферативної частини, що включає письмову відповідь студента на 3 запитання відповідної теми та розрахункової частини. Питання та завдання КР поділені на

варіанти. Студент повинен виконувати той варіант, який відповідає його номеру у списку групи.

Після виконання КР здається викладачу на перевірку. Оцінка за перевірену роботу разом з оцінками студента за лабораторний практикум є основою для допуску його до семестрового екзамену (ДСК) з дисципліни.

КР виконується в окремому зошиті (при неможливості, в електронному вигляді). На обкладинці зошиту повинні бути вказані: прізвище, ім'я, по батькові студента, номер групи, варіант контрольної роботи. Текст завдання на реферативну та розрахункові частини повинні бути наведені повністю.

Робота повинна бути оформлена повно, акуратно та розбірливо, з дотриманням ДСТУ та у відповідності до норм, що прийняті в науково-технічній літературі. Відповідь на кожне питання реферативної частини повинна займати не менше однієї сторінки зошиту. Вона повинна бути написана власними словами і являти собою не переписаний з окремого запропонованого джерела уривок тексту, а результат обмірковування матеріалу отриманого з 2-3 джерел. При цьому додатковою перевагою реферативної відповіді вважається застосування довідникових даних, можливий схемотехнічний приклад (у випадку, якщо він є доречним). Всі рівняння, формули, рисунки та графіки повинні бути пронумеровані арабськими цифрами в межах відповіді на одне питання.

У кінці роботи наводиться список використаних джерел, у відповідності до правил оформлення літератури. Посилання в тексті роботи повинні містити номер джерела за списком, наприклад [1].

3.2. Питання що вивчаються у другому семестрі курсу «Твердотільної електроніки»

1. Передача інформації електромагнітними хвилями. Генерація несучої частоти. Загальні відомості про прилади, що генерують електричні коливання. Лавинно-пролітні діоди (ЛПД).

Загальні відомості. Діоди Ріда. Їх будова і зонна діаграма. Області множення і дрейфу. Принципи генерації. Механізм виникнення негативного диференціального опору. Залежності струму і напруги від часу.

2. Типові конструкції ЛПД. Використання ЛПД для генерації НВЧ-коливань. Основні параметри ЛПД різної конструкції.

3. Діоди Ганна. Загальні відомості. Ефект Ганна. Вимоги до зонної структури напівпровідника. Утворення доменів. Статична вольт-амперна характеристика діодів Ганна.

4. Зарядова нестійкість у приладах з від'ємним диференціальним опором. Генерація НВЧ-коливань у діодах Ганна. Умова реалізації генерації. Недоліки та переваги генераторів Ганна.

5. Основи мікроелектроніки. Етапи розвитку мікроелектроніки. Основні поняття та визначення. Класифікація інтегральних схем (ІС), їх виробники. Система умовних позначень.

6. Елементи конструкції ІС. Технологія виготовлення основних елементів ІС: напівпровідникова, плівкова, гібридна, суміщена. Основні етапи фотолітографії.

7. Виготовлення напівпровідникових ІС за планарно-дифузійним та планарно-епітаксialним методами. Недоліки та переваги цих методів.

8. Виготовлення основних елементів ІС за плівковою та напівпровідниковою технологіями. Виготовлення опорів, конденсаторів, біполярних транзисторів.

9. Виготовлення біполярних транзисторів та діодів за напівпровідниковою технологією. Вмикання біполярних транзисторів у діодному режимі.

10. МОН (МДП) транзистори. ІС з інжекційним живленням. TRI GATE архітектура. Перспективи розвитку електроніки. Друк електроніки.

11. Введення в оптоелектроніку. Загальні відомості. Особливості оптоелектроніки, її риси. Основні прилади оптоелектроніки, їх переваги та недоліки.

12. Індикатори, формувачі сигналів, волоконно-оптичні лінії зв'язку, оптопари, сонячні фотоперетворювачі, оптична пам'ять запам'ятовувальних пристроїв, сонячні фотоперетворювачі, оптоелектронні датчики, тощо.

13. Основні поняття оптики. Електромагнітні хвилі, їх основні характеристики. Шкала електромагнітних хвиль. Випромінювання світла. Характеристики випромінювання.

14. Відбиття світла від границі розділу матеріалів, поглинання у напівпровіднику, проходження через матеріал. Види поглинання та його закони. Співвідношення Ламберта.

15. Закони відбиття та заломлення світла. Формула Друде-Фойгта.

16. Прямозонні та непрямоzonні матеріали, їх коефіцієнти поглинання. Визначення ширини зони напівпровідників.

17. Екситони. Енергія утворення екситону. Вільні та зв'язані екситону. Екситонне поглинання.

18. Люмінесценція. Її види. Спонтанна та вимушена рекомбінація. Інжекційна та ударна люмінесценція.

19. Оптоелектронні напівпровідникові прилади. Світлодіоди, їх позначення. Конструкція світлодіодів та матеріали для виготовлення. Їх основні параметри. Світлова ВАХ та яскравостні характеристики.

20. Світлодіоди з перестроюваним кольором. Їх будова. Семисегментні та матричні світлодіоди. Підключення приладів. Основні параметри світлодіодів.

21. Напівпровідникові лазери. Їх принцип роботи та будова. Типи лазерних діодів. Області використання одномодових та багатомодових лазерів. Лазери на наноструктурах.

22. Напівпровідникові фотоприймачі. Їх види. Фоторезистори. Будова та схема вмикання. Недоліки та переваги.

23. Фотодіоди. Принцип роботи та будова. ВАХ фотодіода. Основні параметри фотоприймачів.

24. Фотоприймачі з внутрішнім підсиленням. Фоторезистори та фото тиристри. Будова та принцип роботи. Схеми вмикання. Вигляд ВАХ.

25. Сонячне випромінювання, його основні характеристики та потенціал. Сонячний спектр у космосі та на землі.

26. Конструкція та принципи роботи сонячних елементів. Основні фізичні процеси у фотоперетворювачах. Втрати енергії у приладах.

27. Сонячні елементи на основі $p-n$ – переходу. Сонячні елементи з гетеропереходами. Їх переваги. Еквівалентна схема фотоелементів.

28. Темнові та світлові вольт-амперні характеристики ідеальних і реальних сонячних елементів. Визначення основних характеристик фотоперетворювачів. Оптимум Шоклі-Квайсера. Максимальний ККД СЕ.

29. Три покоління СЕ. Нові матеріали геліоенергетики. Одноперехідні та тандемні фотоперетворювачі. Основні характеристики сучасних СЕ.

30. Оптопари, їх застосування. Недоліки та переваги оптопар. Електронні аналоги оптопар.

4. КУРСОВА РОБОТА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

4.1. Реферативна частина. Завдання 1

У таблиці 1 вказані номери питань, які повинні розкрити студенти, за варіантами. *Їх необхідно брати з переліку наведеного вище.*

Таблиця 1. Питання реферативної частини КР

Варіанти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Теми та питання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Варіанти	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Теми та питання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	19	18	17	16	15	14	13	12	11	14
	29	28	27	26	25	24	23	22	21	29

4.2. Розрахункова частина. Завдання 2.

Побудова зонної діаграми гетеропереходу з межею поділу матеріалів близькою до ідеальної

Мета завдання

Метою роботи є побудова зонної діаграми гетеропереходу з межею поділу матеріалів близькою до ідеальної, розрахунок темної вольт-амперної характеристики приладу та визначення деяких характеристик гетеропереходу.

Теоретичні відомості

Електричним переходом називається перехідний шар між областями твердого тіла з різними типами або значеннями провідності.

Електронні переходи є основою широкого класу електронних приладів. Звичайно переходи створюються між областями напівпровідника з різними типами провідності (*p-n - переходи* або *електронно-діркові переходи*), між областями напівпровідника з електропровідністю одного типу, але з різною концентрацією домішок (*n⁺-n⁻ - та p⁺-p⁻ - переходи*), між областями легованого та чистого напівпровідників (*n(p) - i - переходи*), між областями напівпровідника з різною шириною забороненої зони (*гетеропереходи*), між напівпровідником і металом (*МП - переходи*) тощо.

Гетеропереходом (ГП) називають контакт двох напівпровідників різного виду.

Їх поділяють на *ізотипні та анізотипні*. Якщо тип провідності обох напівпровідників однаковий вони називаються *ізотипними* (наприклад, *n-Si-n-Ge*), різний – *анізотипними* (наприклад, *p-Si-n-Ge*).

Відмінність гетеропереходів від звичайного *p-n* переходу полягає в тому, що якщо там використовується один і той же напівпровідник, наприклад, *p-Si* та *n-Si* то у *ГП* складові різні.

Оскільки в ГП використовуються різні матеріали, необхідно, щоб у цих матеріалів з великою точністю збігалися два параметри: *температурний коефіцієнт розширення (ТКР) і постійні ґратки матеріалів*. В результаті вдається отримати границю розділу матеріалів вільну від дефектів (дислокацій). Границя розділу матеріалів яка практично не містить поверхневі стани (ідеальний ГП) може бути отримана при невідповідності сталих ґраток контактуючих матеріалів, що не перевищує 3-4%. З урахуванням сказаного, *кількість напівпровідників придатних для створення якісних ГП обмежена* (див. рис.1). Узгодити сталі ґратки матеріалів для яких вони суттєво відрізняються можна шляхом створення на межі напівпровідникових матеріалів прошарків твердих розчинів.

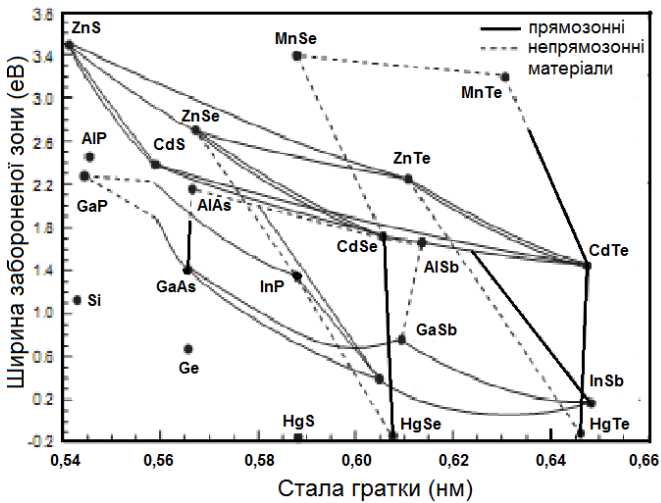


Рисунок 1 - Ширина забороненої зони та стала ґратки деяких напівпровідникових матеріалів. Для створення електронних пристроїв на основі гетеропереходів придатні пари матеріалів, що мають близькі значення сталих ґратки

Завдяки ряду переваг перед гомопереходами ГП знаходять все більше використання у мікроелектроніці для створення лазерів, світлодіодів, детекторів жорсткого випромінювання, сонячних елементів та ін. Для розуміння можливості створення на основі ГП тих чи інших приладів електроніки звичайно будують зонні діаграми контакту напівпровідникових матеріалів. При побудові зонних діаграм ГП, детальному аналізу розподілу електричного поля і потенціалу в області просторового заряду, а також величини і компонентів електричного струму необхідно враховувати, що *різні напівпровідники мають різні значення електронної спорідненості χ , роботи виходу ϕ , ширини забороненої зони E_g і діелектричної проникності ϵ* . Внаслідок цього на діаграмах виникають «шічки» та «розриви» зон.

Побудуємо зонну діаграму контакту двох різних напівпровідників. При приведенні матеріалів у контакт відбувається перетікання носіїв з одного матеріалу у інший та вирівнювання рівня Фермі. Необхідні для побудови енергетичних діаграм значення розривів країв зони провідності та валентної зони визначаються виразами.

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1; \quad (1)$$

$$\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_c. \quad (2)$$

Відомо, що сумарний контактний потенціал на гетерограниці, обумовлений різницею робіт виходу матеріалів, дорівнює:

$$U_k = |U_{k1} + U_{k2}| = |\phi_1 - \phi_2|. \quad (3)$$

Відношення потенціалів U_{CdTe} та U_{ZnS} задається виразом:

$$\frac{U_{k1}}{U_{k2}} = \frac{N_{a2} \epsilon_2}{N_{d1} \epsilon_1}, \quad (4)$$

де N_{a2}, N_{d1} – концентрації донорів і акцепторів у відповідних матеріалах.

Приклад побудови зонної діаграми ГП наведено на рис.2.

Теорія симетричного гомопереходу, що враховує рекомбінаційно-генераційні процеси в збідненому шарі, розроблена Са, Нойсом і Шоклі (СНШ - теорія). Для опису механізму перенесення струму через ідеальний ГП в наш час запропоновано декілька фізичних моделей: **дифузійну, емісійну, рекомбінаційну, тунельну і тунельно-рекомбінаційну.** Відповідно всі струми, що протікають через ГП Андерсон розділяє на **теплові і нетеплові.** Характерно, що дифузійна, емісійна і рекомбінаційна теорії (теплові) приводять до однакового математичного виразу що описує проходження

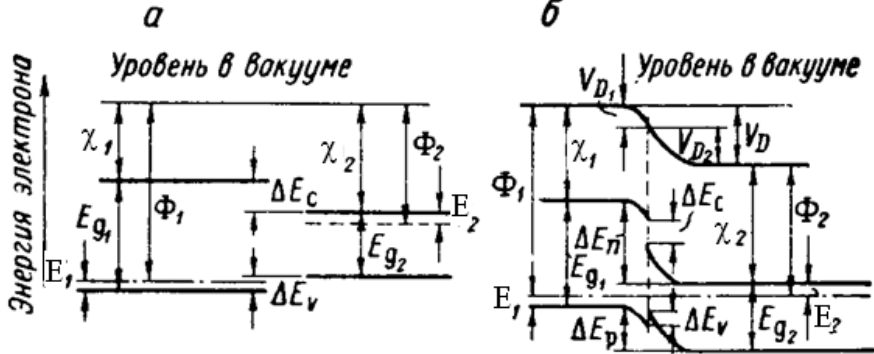


Рисунок 2 - Побудова зонної діаграми гетероперехода до (а) та після (б) контакту матеріалів

струму через ГП. Слід відмітити, що це співвідношення за виглядом не відрізняється від виразу який описує ВАХ гомопереходу:

$$j = j_0 [\exp(\pm \frac{qU}{AkT}) - 1], \quad j_0 = j_{00} \exp(-\frac{qU_k}{AkT}), \quad (5)$$

де j_0 – густина струму насичення; q – заряд електрона; U – прикладена напруга; U_k – контактна різниця потенціалів на гетеропереході; A – фактор ідеальності ВАХ; k – стала Больцмана; T – температура.

У співвідношенні знак плюс відповідає прямій гілці ВАХ, мінус – оберненій. Механізм струмоперенесення визначає тут величину коефіцієнта ідеальності переходу A та струму насичення I_0 . У випадку дифузійного механізму $A=2$, емісійного механізму $A=1$, рекомбінаційного - $1 < A < 2$, тунельного - $1,3 < A < 2$.

Ці механізми характерні для ГП близьких до ідеальних.

Зміст завдання

1. Побудувати зонну діаграму гетеропереходу з межею поділу матеріалів близькою до ідеальної. При цьому використати значення фізичних величин наведених у таблиці 2.

Таблиця 2. Деякі фізичні характеристики напівпровідникових матеріалів

Напів- провідник	Ширина забороне ної зони E_g , eV	Спорідне ність з електроно м χ , eV	Електричн а стала матеріалу ϵ	Ефективна маса носіїв	
				m_n/m_0	m_p/m_0
n -ZnS (вікно)	3,68	3,90	8,3	0,40	0,82
n -CdS (вікно)	2,42	4,50	8,6	0,21	0,80
n -SnS ₂ (вікно)	2,80	4,10	7,57	0,44	0,66
n -ZnO (вікно)	3,30	3,80	8,7	0,27	0,64

$n\text{-In}_2\text{S}_3$ (вікно)	2,20	4,00	9,2	0,24	0,78
$n\text{-Mg}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{O}$ (вікно)	4,00	3,10			
$n\text{-ZnSe}$ (вікно)	2,67	4,09	8,9	0,21	0,60
$p\text{-CdTe}$ (поглинач)	1,46	4,28	10,6	0,11	0,35
$p\text{-SnS}$ (поглинач)	1,30	4,00	16	0,44	0,20

2. За відомими значеннями параметрів побудувати темнову ВАХ ($I-U$) гетеропереходного сонячного елемента в інтервалі від 0 до 3 В при трьох різних температурах (280, 300, 320 К). При побудові використати співвідношення (5). Початкові данні взяти з таблиці 3 у відповідності до свого варіанту. Отримані ВАХ побудувати з використанням міліметрового паперу, графічного редактора *Origin*, або якогось іншого.

Всі розрахунки проводити в системі СІ.

3. З темної ВАХ знайти коефіцієнт випрямлення діоду (K) при цих температурах як відношення прямого струму до зворотного при напрузі $U = 1$ В.

4. У точці перетину дотичної до прямої гілки ВАХ в області великих струмів ($U > 2$ В) з віссю напруги визначити контактну різницю потенціалів U_k на гетеропереході. Порівняти це значення зі знайденим з виразу (3). Розрахувати висоту потенціального бар'єра на переході qU_k .

5. З нахилу цієї дотичної знайти послідовний опір сонячного елемента враховуючи, що $\text{tg}\alpha = 1/R$. При розрахунках кута використовувати систему СІ.

Початкові данні для різних варіантів розрахункової частини курсової роботи наведені в табл.3.

Таблиця 3. Початкові данні для розрахункової частини КР

№ Варіанта	Температура, К	ГП (вікно <i>n</i> -типу/поглинаючий шар <i>p</i> -типу)	Сталі ВАХ		Концентрація донорів та акцепторів $см^{-3}$		Площа СЕ, $см^2$
			j_{00} А/ $см^2$	<i>A</i>	N_d	N_a	
1	200, 300, 400	CdS/CdTe	$1 \cdot 10^{-8}$	2,0	10^{16}	10^{16}	10
2	210, 310, 410	ZnS/CdTe	$2 \cdot 10^{-8}$	2,1	$2 \cdot 10^{16}$	10^{17}	20
3	220, 320, 420	SnS ₂ /SnS	$3 \cdot 10^{-8}$	2,2	$3 \cdot 10^{16}$	10^{17}	30
4	230, 330, 430	In ₂ S ₃ /CdTe	$4 \cdot 10^{-8}$	2,3	$4 \cdot 10^{16}$	10^{17}	40
5	240, 340, 440	CdS/SnS	$5 \cdot 10^{-8}$	2,4	$5 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	50
6	250, 350, 450	CdS/SnS	$6 \cdot 10^{-8}$	2,5	$6 \cdot 10^{16}$	10^{18}	60
7	260, 360, 460	ZnSe/CdTe	$7 \cdot 10^{-8}$	2,0	$7 \cdot 10^{16}$	10^{16}	70
8	270, 370, 470	In ₂ S ₃ /SnS	$8 \cdot 10^{-8}$	2,1	$8 \cdot 10^{16}$	10^{16}	80
9	280, 380, 480	ZnS/SnS	$9 \cdot 10^{-8}$	2,2	$9 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$	90
10	290, 390, 490	ZnSe/SnS	10^{-7}	2,3	10^{17}	$4 \cdot 10^{17}$	100
11	300, 400, 500	ZnO/SnS	10^{-9}	2,4	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$	110
12	200, 310, 420	ZnO/CdTe	$2 \cdot 10^{-9}$	2,5	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$	120
13	210, 320, 430	CdS/CdTe	$3 \cdot 10^{-9}$	2,0	$3 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{17}$	130
14	220, 340, 450	ZnS/CdTe	$4 \cdot 10^{-9}$	2,1	$4 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	140
15	230, 360, 470	SnS ₂ /SnS	$5 \cdot 10^{-9}$	2,2	$5 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{17}$	150
16	240, 380, 490	In ₂ S ₃ /CdTe	$6 \cdot 10^{-9}$	2,3	$6 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{17}$	160
17	250, 400, 500	CdS/SnS	$7 \cdot 10^{-9}$	2,4	$7 \cdot 10^{17}$	10^{17}	170
18	260, 330, 410	CdS/SnS	$8 \cdot 10^{-9}$	2,5	$8 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	180
19	270, 350, 430	Mg _{0,3} Zn _{0,7} O CdTe	$9 \cdot 10^{-9}$	2,0	$9 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	190
20	280, 370, 450	Mg _{0,3} Zn _{0,7} O /SnS	10^{-8}	2,1	10^{18}	$4 \cdot 10^{16}$	200

Методичні вказівки до виконання завдання

При побудові енергетичної діаграми гетеропереходу вважати, що межа розділу матеріалів є близькою до ідеальної, на ній відсутні приповерхневі стани.

Спочатку побудувати діаграми енергетичних зон матеріалів до їх контакту. Для цього від рівня вакууму, який вважається нульовим відкласти вниз у вибраному масштабі енергію електронної спорідненості, а потім енергію ширини забороненої зони матеріалу. За відомою концентрацією легуючої домішки у матеріалі розрахувати положення рівня Фермі, вважаючи, що всі домішки іонізовані ($n = N_d$, $p = N_a$). Для цього використати наступні співвідношення:

$$n = N_c \exp \frac{E_F}{kT}, \quad (6)$$

$$p = N_v \exp^{-(E_g + E_F)/kT}, \quad (7)$$

де n - концентрація носіїв заряду у електронному напівпровіднику; p - концентрація носіїв заряду у дірковому напівпровіднику; E_F - положення рівня Фермі; N_c , N_v - ефективна густина станів у зоні провідності, валентній зоні.

Відлік енергії рівня Фермі ведеться від низу зони провідності.

Ефективна густина станів у зоні провідності (валентній зоні) напівпровідника визначається виразами

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (8)$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (9)$$

де m_n , m_p – ефективні маси електронів і дірок; h – стала Планка;

Для побудови діаграми енергетичних зон напівпровідників після утворення різкого гетеропереходу спочатку слід знайти розриви зон на гетерограниці з використанням співвідношень (1),

(2). Розв'язавши спільно рівняння (3) та (4), знайти значення контактних потенціалів U_{k1}, U_{k2} на кожній стороні гетеропереходу.

Після розрахунку вказаних фізичних величин приступити до побудови зонної діаграми гетеропереходу в рівноважному стані. При цьому врахувати, що при приведенні напівпровідників у контакт, положення рівня Фермі у матеріалах стає однаковим. У подальшому для побудови діаграми енергетичних зон напівпровідників використати рис. 2.

Побудову проводити з використанням міліметрового паперу, редактора *Origin* або будь-якого іншого графічного редактора.

4.3. Розрахункова частина.

Завдання 3. Визначення основних робочих характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів

Мета завдання

Побудова світлових ВАХ сонячного елемента та визначення його основних робочих характеристик (напруги холостого ходу, струму короткого замикання, фактору заповнення ВАХ та ККД).

Теоретичні відомості

Сонячним елементом (СЕ) називається електронний прилад, що здійснюють пряме перетворення сонячного світла в електричну енергію. Перетворення енергії у фотоелектричних перетворювачах (ФЕП) засноване на *фотовольтаїчному ефекті, який виникає в неоднорідних напівпровідникових структурах при дії на них сонячного випромінювання.* Неоднорідність структури ФЕП може бути отримана шляхом легуванням одного і того ж напівпровідника різними домішками (*створення p-n - переходів*) або шляхом з'єднання різних напівпровідників з неоднаковою шириною забороненої зони

(створення гетеропереходів). Використовуються також *МДП структури*.

При роботі СЕ відбуваються наступні процеси:

1. *Генерація електронно-діркових пар під дією випромінювання;*
2. *Дифузія неосновних фотогенерованих носіїв до p - n , гетеро- або переходу напівпровідник-метал;*
3. *Розділення носіїв переходом;*
4. *Збирання носіїв омичними контактами.*

Розглянемо роботу СЕ під дією випромінювання з енергією більшою, ніж ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу ($h\nu > E_g$). У результаті поглинання фотонів виникають електронно-діркові пари. Під дією внутрішнього поля на p - n - переході чи гетеропереході створені світлом носії заряду рухаються в протилежних напрямках: дірки - в p -область, а електрони - в n -область. При цьому носії заряду, що перейшли через p - n -перехід, створюють додатковий струм. Оскільки надлишкові дірки, що перейшли в p -область, зменшують від'ємний об'ємний заряд відбувається зниження потенційного бар'єру на межі p - n -переходу.

Отже, поділ фотогенерованих носіїв електричним полем в приконтактній області електричного переходу приводить до виникнення різниці потенціалів, що прикладена до переходу в прямому напрямі, так званої фото-ЕРС. Це еквівалентно прикладанню додаткової напруги U в прямому напрямі до неосвітленого p - n -переходу.

Електрони з n -області і дірки з p -області, долаючи знижений потенційний бар'єр, будуть інжектвані в іншу область, де вони стануть неосновними носіями заряду і рекомбінують. При цьому струми, обумовлені інжекткованими носіями заряду, направлені з p в n -область. Стаціонарний стан встановиться тоді, коли число створених світлом електронно-діркових пар зрівняється з числом

носіїв заряду, що проходять через знижений потенційний бар'єр $p-n$ – переходу у протилежному напрямі.

Якщо $p-n$ - перехід з'єднаний з зовнішнім електричним колом, то в ньому генерується фото-ЕРС. ВАХ освітленого СЕ являє собою суперпозицію темної ВАХ $p-n$ - переходу і фотогенерованого (світлового) струму. Під дією світла темнова ВАХ зміщується вниз за віссю струмів в четверту чверть, в якій приладом генерується корисна потужність (рис. 3). Оскільки освітлення СЕ приводить до збільшення струму $p-n$ - переходу на світловий струм рівняння діода приймає вигляд:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_L, \quad (10)$$

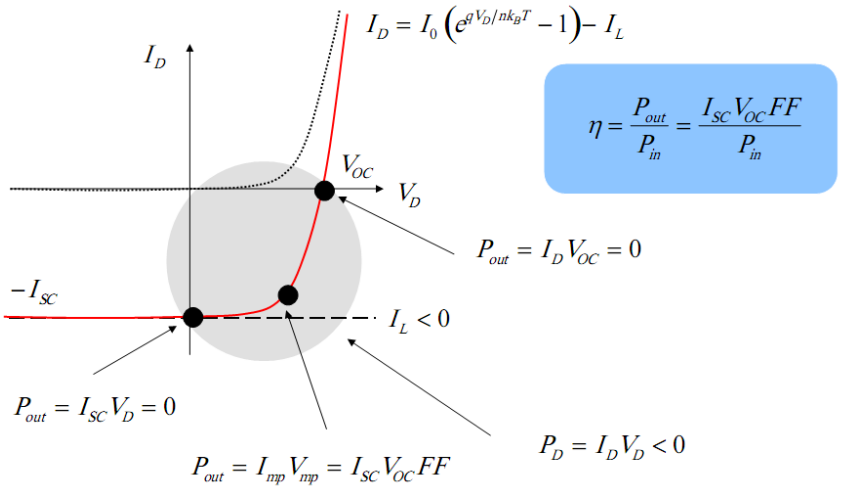


Рисунок 3 – Світлова ВАХ та основні характеристики СЕ

де I_L - світловий струм.

Величина фотоструму I_L визначається числом надлишкових носіїв заряду, що створені світлом та дійшли до $p-n$ -переходу, і дорівнює

$$I_L = j_L S = q\alpha\gamma QSI_r / h\nu, \quad (11)$$

де j_L - густина фотоструму; S - площа p - n -переходу; α - коефіцієнт поглинання світла; Q - квантовий вихід; γ - коефіцієнт збирання носіїв - частка електронно-діркових пар, що непрорекомбінували та були розділені переходом; I_r - інтенсивність випромінювання.

Останній вираз справедливий для випадку, коли все падаюче на напівпровідник світло поглинається матеріалом. Рівняння світлової ВАХ залишається справедливим при освітленні фотоелемента світлом довільного спектрального складу, при цьому змінюється лише значення фотоструму I_L .

Струм короткого замикання I_{sc} (рис. 4) відповідає максимальному струму, який може проходити через ФЕП під час освітлення, коли він замкнений сам на себе ($R = 0$). Якщо прийняти $U = 0$, то з виразу (5) можна визначити величину струму короткого замикання $I_{sc} = -I_L$. Таким чином, струм короткого замикання дорівнює струму, що генерується СЕ.

Напруга холостого ходу СЕ U_{oc} (див. рис. 4) відповідає напрузі на розімкнених клеммах фотоелемента ($R = \infty$). Вона може бути отримана, якщо прийняти у співвідношенні (10) $I = 0$.

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\left(\frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right]. \quad (12)$$

З виразу (12) випливає, що напруга U_{oc} може бути підвищена за рахунок збільшення відношення I_L/I_0 . Цього можна досягти, знижуючи темновий струм шляхом збільшення рівня легування підкладки, або часу життя неосновних носіїв заряду. Збільшення струму короткого замикання також може привести до підвищення напруги холостого ходу, однак ефект від цього не такий виражений, як у випадку зменшення темнового струму.

Коефіцієнт корисної дії ФЕП розраховується за формулою

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P_s}, \quad (13)$$

де P_s – потужність сонячного випромінювання, що падає на сонячний елемент; FF – фактор заповнення ВАХ (коефіцієнт форми ВАХ), який дорівнює

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}, \quad (14)$$

де I_m та U_m – густина струму та напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу (рис. 3).

З рівняння (14) випливає, що коефіцієнт форми вказує, наскільки реальна ВАХ СЕ відрізняється від ідеальної, яка являє собою прямокутну сходинку з напругою U_{oc} і струмом I_{sc} .

Вихідна потужність ФЕП дорівнює

$$P = IU = I_s U \left(\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) - I_L U. \quad (15)$$

Максимальну потужність СЕ, що виділяється у зовнішньому колі можна отримати при правильному узгодженні опорів ФЕП та навантаження. Положення точки максимальної потужності на світловій ВАХ можна знайти прийнявши, що $dP/dU = 0$ (умова екстремуму функції) (рис. 4).

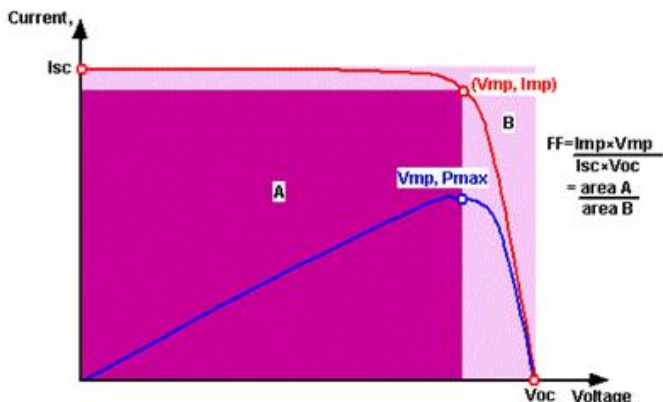


Рисунок 4. - Визначення фактору заповнення FF ВАХ СЕ

Звідси отримаємо значення струму та напруги у цій точці

$$I_m = I_s \beta U_m e^{\beta U_m} \sim I_L \left(1 - \frac{1}{\beta U_m}\right), \quad (16)$$

$$U_m = \frac{1}{\beta} \ln \frac{I_L/I_s + 1}{1 + \beta U_m} \sim U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m), \quad (17)$$

де $\beta = \frac{q}{AkT}$ ($\beta \sim 38,7 \text{ В}^{-1}$ при $T = 300 \text{ К}$)

Формула (17) дозволяє визначити U_m методом послідовних наближень. В якості першого наближення в праву частину підставляється $U_m = U_{oc}$, при другому наближенні – визначене значення U_m . Двох ітераційних обчислень достатньо для отримання чотирьох вірних значущих цифр напруги. Можна також розв'язати трансцендентне рівняння (17), використавши функцію `fsolve` пакета `Maple`. Значення I_m визначається шляхом підстановки U_m в співвідношення (16). Відповідно опір оптимального зовнішнього навантаження СЕ дорівнює $R_{op} = dU_m/dI_m$.

Таким чином, максимальна вихідна потужність ФЕП визначається співвідношенням

$$P_m = I_m U_m \approx I_L (U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m) - \frac{1}{\beta}), \quad (18)$$

Реальний СЕ на відміну від ідеального $p-n$ - переходу має послідовний та шунтувальний опори. У більшості випадків еквівалентну електричну схему освітленого ФЕП зображують у вигляді електричного кола із зосередженими опорамми (рис. 5), а його ВАХ записують у вигляді

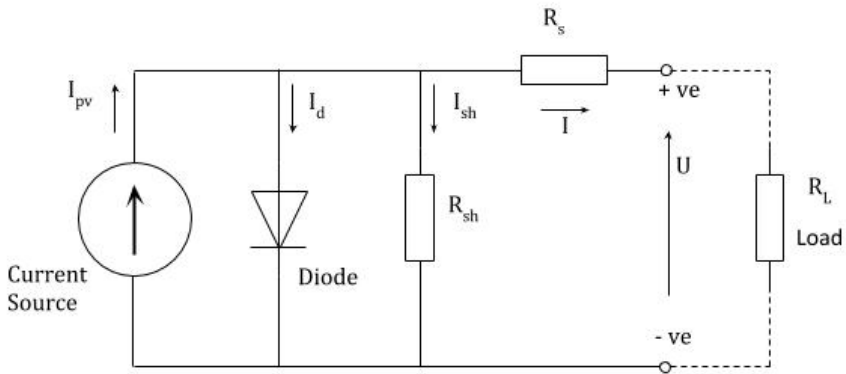


Рисунок 5 - Еквівалентна електрична схема реального СЕ з послідовним R_s і шунтувальним R_{sh} опорамми

$$I = I_0 \left[\exp \frac{q(U - IR_s)}{kT} - 1 \right] + \frac{(U - IR_s)}{R_{sh}} - I_L. \quad (19)$$

де R_s - послідовний опір, R_{sh} - шунтувальний опір.

Послідовний опір обумовлений об'ємним опором шарів, що утворюють СЕ та опором контактів на лицьовій і зворотній сторонах приладу. Шунтувальний опір пов'язаний головним чином зі струмами витоку $p-n$ -переходу. Канали об'ємних витоків створюються чужорідними мікро- і макровключеннями в матеріалі діоду. Канали поверхневих витоків утворюються при

інтенсивній рекомбінації електронно-діркових пар через поверхневі енергетичні стани напівпровідника, що виникають через порушення валентних зв'язків, а також при проходженні струму по забрудненням у місцях виходу p - n -переходу на поверхню.

Послідовний і шунтувальний опори обумовлюють втрати енергії в СЕ, які призводять до зменшення коефіцієнта форми ВАХ і напруги холостого ходу (рис.6). Тому знання цих параметрів дуже важливо для вдосконалення технології виготовлення ФЕП.

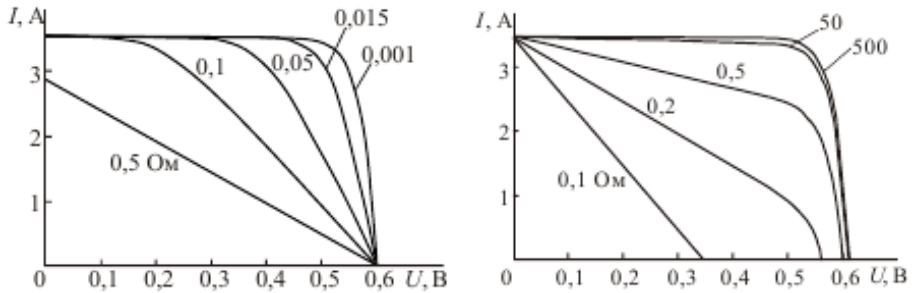


Рисунок 6 – Вплив послідовного R_s та шунтувального R_{sh} опорів на вигляд ВАХ СЕ

Падіння напруги на послідовному опорі R_s впливає на ВАХ, значно суттєвіше ніж падіння напруги на шунтувальному опорі (рис. 6 а). Як видно з рисунку при збільшенні послідовного опору від 0 до 5 Ом потужність СЕ зменшується більше ніж на 70%. При умові $j_{sc} = 40 \text{ mA/cm}^2$ і $U_{oc} = 0,6 \text{ В}$, для того щоб частка втрат була меншою ніж 3%, послідовний опір квадратного сантиметра площі елемента не повинен перевищувати 0,5 Ом.

Аналогічно для того щоб втрати, обумовлені шунтувальним опором не перевищували 3%, R_{sh} кожного квадратного сантиметра площі СЕ має бути більшим 500 Ом.

З рівняння (19) видно, що вплив R_s на ВАХ найбільш значний при сильних струмах (високій напрузі зміщення), тоді як вплив R_p - при низькій напрузі, коли струм, що проходить через перехід,

малий у порівнянні з шунтувальним струмом. Легко зрозуміти, що з ВАХ можна визначити як послідовний так і шунтувальний опір приладу.

Зміст завдання

Побудувати світлову ВАХ сонячного елемента при температурах вказаних у таблиці 3. Знайти його напругу холостого ходу, струм короткого замикання, фактор заповнення ВАХ та ККД. *Використати умову освітлення АМІ для варіантів 1-10 та АМ0 для варіантів 11-20.*

Методичні вказівки до виконання завдання

Беручись за виконання завдання 3 слід згадати, що світлова ВАХ СЕ зсунута відносно темної за струмом на величину світлового струму $I_{sc} = I_L$ (рис.3). Коефіцієнт корисної дії фотоперетворювача розраховується за формулою (13). В той час як вихідна потужність фотоперетворювача може бути знайдена із співвідношення (15). Приймаючи, що $dP/dU = 0$ отримаємо вирази для розрахунку значень струму та напруги у точці максимальної потужності на ВАХ у вигляді виразів (16) та (17). Знаючи ці величини легко розрахувати значення максимальної вихідної потужності фотоперетворювача зі співвідношення (18).

Густина фотоструму, що виробляється СЕ визначається шириною забороненої зони поглинаючого матеріалу, його квантовим виходом та деякими іншими конструктивними особливостями приладу.

$$J_L(E_g) = q \int_{\nu}^{\infty} \alpha(\nu) f(\nu, T) Q(\nu) d\nu, \quad (20)$$

де J_L - густина фотоструму; α - коефіцієнт поглинання світла матеріалом, який залежить від ν ; $f(\nu, T)$ випромінювальна здатність сонця; Q – квантовий вихід (число електронно-діркових

пар, що утворюються в матеріалі при падінні на нього одного фотона світла). В подальшому будемо приймати, що $Q=1$.

Нижня межа інтегрування може бути знайдена з виразу $h\nu = E_g$, де E_g – ширина забороненої зони поглинаючого матеріалу.

У першому наближенні можна вважати, що сонце випромінює енергію як абсолютно чорне тіло з температурою $T = 5900$ К. Добре відомо, що випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла задається співвідношенням

$$f(\nu, T) = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (21)$$

Підставивши цей вираз у співвідношення (20) остаточно знайдемо значення світлового струму фотоперетворювача

$$I_L(E_g) = S j_L = S q \int_{\nu}^{\infty} \alpha(\nu) \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} Q(\nu) d\nu. \quad (22)$$

Отриманий вираз дозволяє знайти фотострум сонячного елемента на основі будь-яких напівпровідникових матеріалів. ***Залежність α від частоти поглинутого випромінювання береться з довідникової літератури.***

Наприклад, густина струму фотоперетворювачів на основі шарів CdTe давно розрахована і дорівнює $j_L = 26$ мА/см² в умовах освітлення АМ1. Напруга холостого ходу СЕ U_{oc} тоді може бути розрахована із співвідношення (12).

Повна потужність випромінювання сонця в умовах АМ1 (сонце в zenіті) складає $P_s = 1000$ Вт/м² (на широтах, що відповідають місту Суми - $P_s = 925$ Вт/м²), в умовах АМ1,5 (кут падіння сонячного випромінювання на поверхню землі 60°) – 691 Вт/м².

4.4. Розрахункова частина. Завдання 4.

Розрахунок та аналіз роботи підсилювальних каскадів на операційних підсилювачах (ОП)

Група ФЕ не виконує!

Мета розрахунку

Метою даної роботи є набуття навиків розрахунку та аналізу підсилюючих каскадів на ОП.

Теоретичні відомості

Інвертувальний підсилювач

Інвертувальний підсилювач (необхідно розрізнити поняття «операційний підсилювач» і «підсилювач, виконаний на операційному підсилювачі»), схему якого наведено на рис. 7, змінює знак вихідного сигналу відносно вхідного. Він створюється введенням паралельного негативного зворотного зв'язку за допомогою резистора R_{33} на інвертувальний вхід ОП - на цей вхід подається частина вихідного сигналу з подільника R_{33} , R_1 . Неінвертувальний вхід з'єднується із спільною точкою схеми (точкою з нульовим потенціалом). Вхідний сигнал через резистор R_1 подається на інвертувальний вхід ОП.

Виходячи з наведеного вище та вважаючи ОП ідеальним, при аналізі схем з підсилювачем будемо припускати що:

- 1) коефіцієнт підсилення ОП нескінченний;
- 2) входи ОП струму не споживають ($R_{ex\ ОП} = \infty$);
- 3) у вихідних колах ОП падіння напруги відсутнє ($R_{вих\ ОП} = 0$);

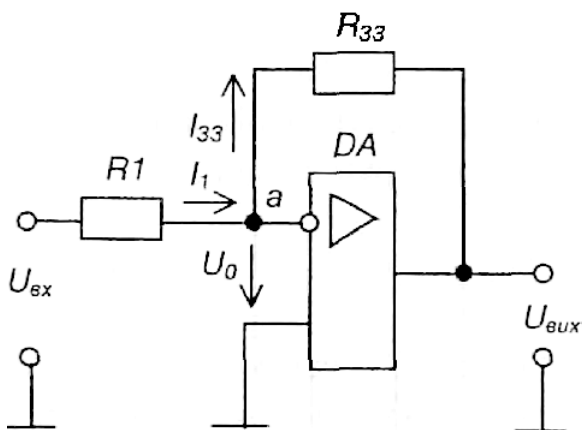


Рисунок 7 - Інвертувальний підсилювач на ОП

4) якщо ОП охоплено негативним зворотнім зв'язком і він працює в лінійному режимі (в режимі підсилення, а не насичення), різниця потенціалів між його входами $U_{вх\text{ОП}} = U_0 = 0$.

Доведемо останнє положення.

$$U_{вих\text{ОП}} = K_{УОП} U_{вх\text{ОП}}, \quad (23)$$

$$U_{вх\text{ОП}} = \frac{U_{вих\text{ОП}}}{K_{УОП}}, \quad (24)$$

Якщо $K_{УОП} \rightarrow \infty$, то $U_{вх\text{ОП}} \rightarrow 0$.

Реально $U_{вх\text{ОП}} = U_0$ нулю не дорівнює. Але це настільки незначна величина, що для більшості схем на ОП нею можна знехтувати. Дійсно, якщо, наприклад, $U_{вих\text{ОП}} = 10$ В (це майже відповідає насиченню), а $K_{УОП} = 10^5$, то $U_0 = 100$ мкВ!

Оскільки на неінвертувальний вхід подана напруга $U_n = 0$ (він з'єднаний з нульовою точкою), а $U_0 = 0$, то і потенціал інвертувального входу також дорівнює нулю (віртуальний нуль). У результаті джерелом вхідного сигналу пристрій сприймається

як R_I - вхідний опір підсилювача дорівнює величині резистора R_I .
З першого закону Кірхгофа для вузла a маємо

$$I_I = I_{33}. \quad (25)$$

Тобто

$$\frac{U_{\text{ВХ ОП}}}{R_I} = - \frac{U_{\text{ВИХ ОП}}}{R_{33}}, \quad (26)$$

ОП, забезпечуючи рівність $U_0 = 0$, створює на виході таку напругу, щоб відвести струм I_I через резистор R_{33} .

Тоді

$$K_{U33} = \frac{U_{\text{ВИХ ОП}}}{U_{\text{ВХ ОП}}} = - \frac{R_{33}}{R_I}, \quad (27)$$

Отже, K_{U33} залежить лише від співвідношення опорів резисторів дільника негативного зворотного зв'язку. Знак «-» вказує на інверсію вхідного сигналу. Вхідний опір схеми дорівнює величині R_I .

Якщо $R_{33} > R_I$, то $U_{\text{вих}} = - \frac{R_{33}}{R_I} U_{\text{вх}}$, - маємо інвертувальний масштабний підсилювач (з масштабним коефіцієнтом $K_{U33} = - R_{33}/R_I$).

При $R_{33} = R_I$, $K_{U33} = - 1$ - схема набуває властивостей інвертувального повторювача вхідної напруги (інвертор сигналу).

Неінвертувальний підсилювач

Неінвертувальний підсилювач, схема якого зображена на рис. 8, можна отримати, якщо ввести послідовний негативний зворотній зв'язок за напругою на інвертувальний вхід, а вхідний сигнал подати на неінвертувальний вхід ОП.

Тут $U_n = U_{\text{вх}}$, а вхідний струм $I_{\text{вх}} = 0$, оскільки $R_{\text{вх ОП}} = \infty$

В той же час, оскільки $U_0 = 0$, то $U_{R_I} = U_{\text{вх}}$ а, $\frac{U_{\text{вх}}}{R_I} = I_{33}$.

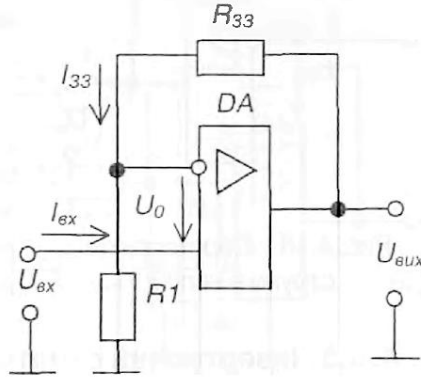


Рисунок 8 - Неінвертувальний підсилювач на ОП

З іншого боку

$$I_{33} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_{33} + R_1}. \quad (28)$$

Отже

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_{33} + R_1}. \quad (29)$$

Звідки

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right). \quad (30)$$

Тоді коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача дорівнює

$$K_{U33} = \frac{U_{\text{вих ОП}}}{U_{\text{вх ОП}}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}, \quad (31)$$

Якщо $R_{33} = 0$, а $R_1 \rightarrow \infty$ одержимо неінвертувальний повторювач, схему якого зображено на рис. 9.

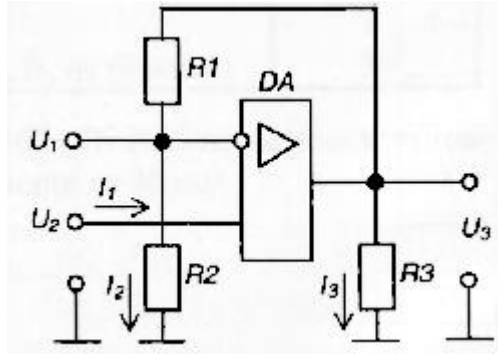


Рисунок 9 - Розрахункова схема неінвертувального підсилювача на ОП

Неінвертувальний та інвертувальний підсилювачі широко використовуються як високостабільні підсилювачі різного призначення. При цьому, неінвертувальний підсилювач на ОП має великий вхідний опір (теоретично - нескінченний) і використовується для підсилення сигналів джерел з високим вихідним опором.

Зміст завдання

Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) тип та схема підсилюючого каскаду
- 2) величини опорів деяких резисторів схеми каскаду;
- 3) напрями проходження струмів у гілках каскаду та величини деяких з них;
- 4) величина напруги на вході і виході каскаду або його коефіцієнт підсилення за напругою K_{U33}
- 5) тип ОП та типова схема його вмикання.

Варіанти вихідних даних наведені в таблицях 4 та 5.

Необхідно визначити:

- 1) величини параметрів, позначених в табл. 4-5 значком "x";

Таблиця 4 - Вихідні дані для розрахунку інвертувального підсилювача на ОП

Пара метр	Одиниця вимірювань	Варіант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	кОм	1	x	x	1,1	-	-	x	-	2	1,1
R_2		1,5	3	-	-	1,2	x	-	1	-	1,5
R_3		x	30	75	33	x	x	240	x	x	33
R_4		2	1	6,2	2,2	x	2,4	x	x	x	2,2
U_1	В	1,5	0,15	x	x	-	-	x	-	-0,05	x
U_2		-2,5	-0,25	-	-	x	0,01	-	x	-	0
U_3		2,5	x	x	x	-5	x	1,2	-2,2	x	x
I_1	мА	x	x	x	0,2	-	-	0,005	-	x	0,2
I_2		x	x	-	-	x	x	-	x	-	-
I_3		x	x	x	x	x	0,05	x	0,02	x	x
I_4		x	0,25	1	x	2,5	x	1	0,01	0,55	x
K_{U33}		-	-	-50	x	-100	-120	x	x	-110	x

Таблиця 5 - Вихідні дані для розрахунку неінвертувального підсилювача на ОП

Пара метр	Одиниця вимірювань	Варіант									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R_1	кОм	18	x	220	x	75	x	24	15	x	36
R_2		x	1,2	x	3	x	1	x	x	2,4	x
R_3		10	6,2	3,9	x	2	2	x	x	10	x
U_1	В	0,3	x	0,044	x	0,15	x	0,3	x	x	x
U_2		x	0,6	x	0,1	x	x	x	x	0,2	0,25
U_3		-4,8	-9,6	x	x	-5	x	1,2	-2,2	x	x
I_1	мА	x	x	x	0,2	-	-	0,005	-	x	0,2
I_2		x	x	-	-	x	x	-	x	-	-
I_3		x	x	x	x	x	0,05	x	0,02	x	x
K_{U33}		-	-	-50	x	-100	-120	x	x	-110	x

2) вказати, чи правильно позначені на рис. 8 та рис. 9 напрями проходження струмів;

3) тип та потужність резисторів пристрою.

Також необхідно навести електричну принципову схему каскаду з вказанням заданих та отриманих за результатами

розрахунку номінальних значень опорів, величину напруги і струмів, напрямів проходження останніх.

Методичні вказівки до виконання завдання та приклад розрахунку

Наведемо приклад розрахунку інвертувального підсилювача на ОП для наступних вхідних даних: $R_1 = 1 \text{ кОм}$; R_3 – відсутнє; $R_4 = 2 \text{ кОм}$; $U_1 = 0,15 \text{ В}$; $U_3 = -3 \text{ В}$.

З аналізу вихідних даних видно, що ми маємо справу з інвертувальним підсилювачем, розрахункова схема якого наведена на рис. 10.

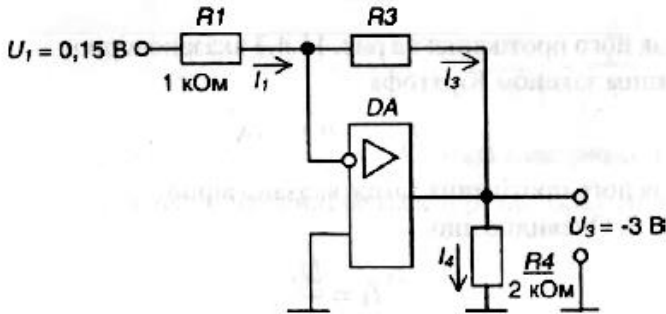


Рисунок 10 - Розрахункова схема інвертувального підсилювача на ОП

Необхідно визначити:

- 1) опір резистора R_3
- 2) величини струмів I_1 , I_3 , I_4 ,
- 3) коефіцієнт підсилення $K_{U_{33}}$;
- 4) правильність позначення на рис. 10 напрямів проходження струмів;
- 5) тип та потужність резисторів каскаду.

Порядок розрахунку

За формулою (27) маємо:

$$K_{U33} = \frac{U_3}{U_1} = -\frac{R_3}{R_1},$$

Тобто

$$K_{U33} = \frac{-3}{0,15} = -20,$$

Тоді

$$R_3 = -K_{U33}R_1,$$

$$R_3 = -(-20) \cdot 1 = 20 \text{ кОм.}$$

Оскільки потенціал інвертувального входу ОП для схеми інвертувального підсилювача дорівнює нулю, маємо:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1},$$
$$I_1 = \frac{0,15}{1 \cdot 10^3} = 0,15 \text{ мА,}$$

і напрям його проходження на рис. 10 вказано вірно.
За першим законом Кірхгофа

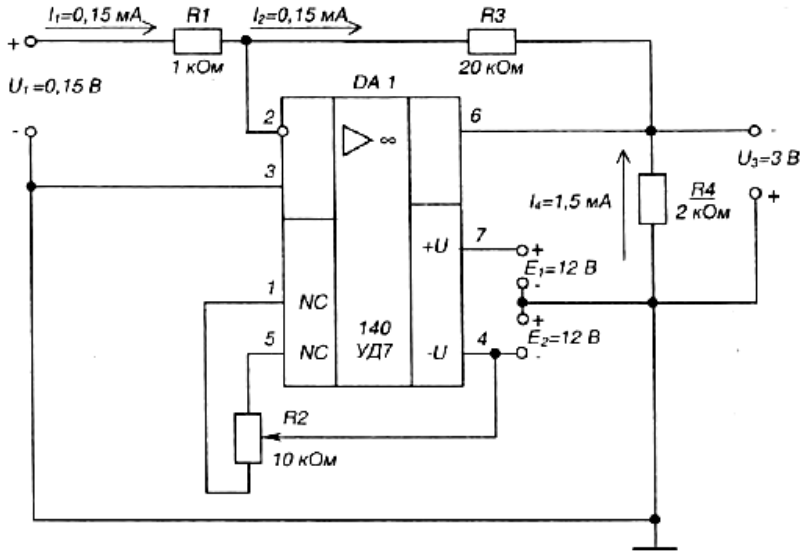
$$I_3 = I_1 = 0,15 \text{ мА,}$$

і напрям його протікання також вказано вірно.
Очевидно, що

$$I_4 = \frac{U_3}{R_4},$$
$$I_4 = \frac{-3}{2} = -1,5 \text{ мА}$$

і напрям його проходження є зворотнім до вказаного.

Електрична принципова схема інвертувального підсилювача з параметрами, отриманими за даними розрахунку і побудованого на ОП 140УД7, наведена на рис. 11.



$$K_{узз} = -20$$

Рисунок 11. Інвертувальний підсилювач на ОП. Схема електрична принципова

Зауважимо: оскільки підсилювач призначений для підсилення сигналу напруги постійного струму, то коригуючий конденсатор не встановлюється.

Потужність, що виділяється в резисторах підсилювача, становить

$$P_R = RI^2.$$

Отже

$$P_{R1} = 1 \cdot 10^3 (0,15 \cdot 10^{-3})^2 = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ Вт},$$

$$P_{R3} = 20 \cdot 10^3 (0,15 \cdot 10^{-3})^2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт},$$

$$P_{Rd} = 2 \cdot 10^3 (0,15 \cdot 10^{-3})^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

За довідниковими даними вибираємо резистори типу С2-33 з номінальною потужністю 0,125 Вт.

5. ДОВІДНИКОВИЙ МІНІМУМ

5.1. Основні формули, що використовуються у КР

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3}$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3}$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$n = N_c \exp^{E_F/kT}$$

$$p = N_v \exp^{-(E_g + E_F)/kT}$$

$$np = n_i^2(T)$$

$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}$$

$$d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k \pm U)}{q^2 N_d}}$$

– ефективна густина станів у зоні провідності напівпровідника;

– ефективна густина станів у валентній зоні напівпровідника,

де m_n , m_p – ефективні маси електронів і дірок; k – стала Больцмана;

T – температура; h – стала Планка;

– концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику,

де E_g – ширина забороненої зони матеріалу;

– концентрація носіїв заряду у електронному напівпровіднику;

концентрація носіїв заряду у дірковому напівпровіднику, де E_F – положення рівня Фермі;

– закон діючих мас

– U_k – контактна різниця потенціалів на p - n – переході;

N_d , N_a – концентрації донорних та акцепторних домішок у матеріалі;

q – заряд електрона

– температурний потенціал;

– ширина збідненої області на переході з боку електронного матеріалу; U – прикладена зовнішня напруга

$$d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_k \pm U)}{q^2 N_a}}$$

$$E(x) = -\frac{qN_d}{\varepsilon\varepsilon_0}(d_n - x)$$

$$E(x) = -\frac{qN_a}{\varepsilon\varepsilon_0}(d_p + x)$$

$$E_{max} = \frac{qN_a d_p}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{qN_d d_n}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$\varphi_1(x) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon\varepsilon_0}(x - d_n)^2$$

$$\varphi_2(x) = -\frac{qN_a}{2\varepsilon\varepsilon_0}(x + d_p)^2$$

$$W_0 = qU_k$$

$$C_6 = S \left(\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_d N_a}{2(N_a + N_d)(\varphi_k + U)}} \right)$$

$$C_6 = S \left(\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_d}{2(\varphi_k + U)}} \right)$$

$$j = j_s (\exp^{qU/2kT} - 1)$$

$$j_s = q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right)$$

$$j = j_s (\exp^{qU/AkT} - 1)$$

$$j_s = j_0 (\exp^{-qU_k/AkT})$$

- ширина збідненої області на переході з боку діркового матеріалу;

- розподіл напруженості електричного поля вдовж переходу, n - область

- розподіл напруженості електричного поля вдовж переходу, p - область

- максимальне значення напруженості електричного поля на p - n переході

- розподіл потенціалу електричного поля вдовж переходу, n - область

- розподіл потенціалу електричного поля вдовж переходу, p - область

- зв'язок між потенціальною енергією та контактною різницею потенціалів на переході

- бар'єрна ємність p - n переходу

- бар'єрна ємність несиметричного переходу

- вольт-амперна характеристика ідеалізованого діоду на p - n -переході

- густина теплового струму через ідеальний гомоперехід

- вольт-амперна характеристика реального гетеропереходу

- густина струму насичення гетеропереходу,

$A \neq 2$

$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$	- дифузійна довжина вільного пробігу електронів
$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$	- дифузійна довжина вільного пробігу дірок
$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}$	- фактор заповнення ВАХ сонячного елемента
$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF I_{sc} U_{oc}}{P_s}$	- ККД фотоперетворювача

5.2. Основні константи, що використовуються у КР

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К	- стала Больцмана
$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл	- заряд електрона
$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	- електрична стала
$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	- стала Планка
$m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ Кг	- маса електрону
$c = 2,999 \cdot 10^8$ м/с	- швидкість світла у вакуумі
$\epsilon = 16,0$	- відносна діелектрична проникність германію ($T = 300$ К)
$\epsilon = 11,7$	- відносна діелектрична проникність кремнію ($T = 300$ К)
$\epsilon = 12,9$	- відносна діелектрична проникність GaAs ($T = 300$ К)
$\Delta E_{gGe} = 0,72$ еВ	- ширина забороненої зони германію
$\Delta E_{gSi} = 1,12$ еВ	- ширина забороненої зони кремнію
$\Delta E_{gGaAs} = 1,44$ еВ	- ширина забороненої зони GaAs
$\mu_n = 3800$ см ² /В·с	- рухливість електронів у германії при $T = 300$ К
$\mu_n = 3000$ см ² /В·с	- рухливість електронів у кремнії при $T = 300$ К

$\mu_n = 8500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	- рухливість електронів у GaAs при $T = 300 \text{ К}$
$\mu_p = 1820 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	- рухливість дірок у германії при $T = 300 \text{ К}$
$\mu_p = 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	- рухливість дірок у кремнії при $T = 300 \text{ К}$
$\mu_p = 420 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	- рухливість дірок у GaAs при $T = 300 \text{ К}$
$m_{n1} = 0,22 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в германії
$m_{n2} = 1,06 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в кремнії
$m_{n3} = 0,067 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в арсеніді галію
$m_{p1} = 0,39 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в германії
$m_{p2} = 0,56 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в кремнії
$m_{p3} = 0,45 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в арсеніді галію

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ
до виконання розрахунково-графічних робіт
з дисципліни "Твердотільна електроніка"
для студентів спеціальностей
"Електронні системи". "Електронні прилади та пристрої".
"Фізична та біомедична електроніка"
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск А.С. Опанасюк
Редактор Н.А. Гавриленко
Комп'ютерне верстання Я.В. Знаменщиков

Підп. до друку 6.09.2014.. поз.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2.79. Обл.-вид. арк. 2.02.
Тираж 50 пр. Зам. № Собівартість вид.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет.
вул. Р.- Корсакова. 2. м. Суми. 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007.