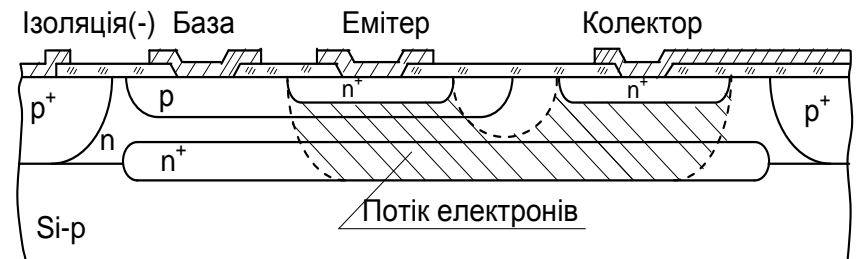


## Методичні вказівки

до виконання курсової роботи  
з дисципліни «*Основи мікроелектроніки та  
функціональної електроніки*»

для студентів спеціальності  
«Електронні пристрої та системи»



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки**

*до виконання курсової роботи  
з дисципліни «Основи мікроелектроніки та  
функціональної електроніки»*

для студентів спеціальності  
“Електронні пристрої та системи”

Вінниця  
ВНТУ  
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 18 грудня 2014 р.)

Рецензенти:

**О. В. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**О. О. Дрючин**, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Основи мікроелектроніки і функціональної електроніки» для студентів спеціальності «Електронні пристрої та системи» / Уклад. Ю. С. Кравченко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 19 с.

Вказівки підготовлені згідно з навчальним планом підготовки бакалаврів зі спеціальності – «Електронні пристрої та системи». Наведено основні вимоги щодо організаційних питань підготовки курсової роботи, її оформлення та захисту, а також структура курсової роботи з дисципліни «Основи мікроелектроніки та функціональної електроніки», необхідні довідкові дані.

## ВСТУП

Чинні методичні вказівки розроблено відповідно до навчального плану підготовки бакалаврів з електроніки за спеціальністю – «Електронні пристрої та системи».

Мета даної розробки – допомогти студентові методично правильно організувати свою роботу при виконанні курсової роботи та надати практичну допомогу з організаційних питань, забезпечення виконання вимог щодо її оформлення та захисту.

### **1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ. СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ**

Самостійна робота студентів в межах дисципліни «Основи мікроелектроніки та функціональної електроніки» є обов'язковою складовою навчального плану підготовки бакалаврів з електроніки за напрямом «Електронні пристрої та системи», яка проводиться з метою безпосереднього практичного засвоєння студентами теоретичних знань із визначення параметрів та характеристик приладів мікроелектроніки та функціональної електроніки, набуття ними навичок роботи з комп'ютерного моделювання структур таких приладів.

Оснoву самостійної роботи студентів з дисципліни «Основи мікроелектроніки та функціональної електроніки» становить курсова робота, яка виконується студентами у восьмому навчальному триместрі одночасно з вивченням ними теоретичного матеріалу.

Тематика курсових робіт з даної дисципліни розробляється кафедрою ЕНС і пропонується студентам за принципом вільного вибору, носить різноманітний характер і охоплює практично всі напрямки розвитку мікроелектроніки та функціональної електроніки.

**1. Напівпровідникові мікросхеми.** Розробка конструкції і технології компонентів інтегральної схеми і всієї схеми в цілому, дослідження параметрів мікросхеми та їх зв'язку з конструкцією та технологією, машинний аналіз функціонування інтегральної схеми, створення макетних зразків.

**2. Прилади функціональної мікроелектроніки.** Розробка та дослідження приладів акустоелектроніки, магнітоелектроніки, молекулярної електроніки, біоелектроніки, кріоелектроніки, хемотроніки, приладів з використанням термоелектронних, акустоелектронних та гальваноманітних явищ.

**3. Оптикоелектронні прилади та схеми.** Розробка та дослідження напівпровідникових джерел та приймачів електромагнітного випромінювання, приладів оптикоелектроніки і лазерної техніки, аналіз

використання їх в електронних пристроях автоматики та обчислювальної техніки.

**4. Мікроелектронні прилади НВЧ-діапазона.** Розробка та дослідження твердотільних генераторних та підсилювальних приладів надвисокої частоти, мікросмушкових ліній, детекторів, інших елементів НВЧ-систем.

**5. Мікросхеми надвисокого ступеня інтеграції.** Розробка, дослідження та впровадження спеціальних технологічних процесів, які використовуються при виготовленні НВІС і забезпечують субмікронні розміри їх елементів (процеси електронної та іонної літографії, плазмохімічні методи обробки матеріалів тощо).

**6. Напівпровідникові і мікроелектронні датчики і сенсори.** Розробка, дослідження та впровадження в виробництво спеціальних електронних пристроїв для контролю температури, тиску, світлового потоку, електричних і магнітних полів з використанням електронної та мікроелектронної технології.

Якщо ж тематика курсової роботи збігається з тематикою наукової роботи студента або є складовою частиною його майбутньої бакалаврської дипломної роботи, то тема курсової роботи може бути запропонована самим виконавцем, але структура, обсяг і графік виконання роботи обов'язково узгоджуються з викладачем. Оформлення текстової частини курсової роботи повинно відповідати вимогам державного стандарту (ДСТУ 3008-95 Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення).

Структура курсової роботи містить такі обов'язкові елементи: титульний аркуш, форма якого визначається відповідним Положенням про курсове проектування у ВНТУ, а приклад конкретного виконання подається у додатку А до чинних методичних вказівок; індивідуальне завдання на курсову роботу (додаток Б); анотацію, де у стислій, лаконічній формі подається зміст та основні результати, які отримано під час виконання даної курсової роботи (обсяг анотації, яка друкується на окремому аркуші і розміщується зразу ж після індивідуального завдання, не повинен перевищувати 10 – 12 рядків тексту), основну частину роботи, яка повинна містити вступ; аналіз стану питання (перший розділ) щодо розробки та використання приладів мікроелектроніки та функціональної електроніки аналогічних тим, що запропоновані для курсового проектування, розрахунковий розділ (другий розділ), де наводиться методика та результати розрахунків відповідної напівпровідникової структури, третій розділ, де подаються результати досліджень заданої транзисторної структури щодо можливості покращення її експлуатаційних чи конструктивно-технологічних параметрів; висновки по роботі, список цитованої літератури і додатки.

Щодо обсягу курсової роботи, то він може бути рекомендований у межах 30 сторінок з використанням стандартних аркушів білого паперу

формату А4 (210×297 мм). Мова – українська. Для друкування застосовувати текстовий редактор MS WORD for WINDOWS, використавши шрифт Times New Roman (Cyr), 14 pt, через один інтервал між рядками. Нумерація сторінок (починаючи з четвертої) – в правому верхньому куті. Формули: full – Times New Roman, 16 pt.

У **вступі** слід, насамперед, сформулювати **актуальність** розробки чи дослідження (актуальність теми). Потім, виходячи з актуальності, визначають **мету** роботи, яка може полягати у покращенні якихось параметрів чи характеристик приладу, що досліджується, (наприклад, «підвищення коефіцієнта передачі струму», «розширення частотного діапазону», «зменшення габаритних розмірів структури транзистора» тощо). Задекларована мета передбачає формулювання конкретних практичних **завдань (або задач) дослідження**, виконання яких дозволить досягнути необхідних результатів, визначених метою дослідження або розробки. Задачі дослідження формулюються відповідно до змісту курсової роботи. Окрім зазначених (актуальності, мети, задач дослідження) у вступі необхідно показати, що є **предметом дослідження** (зазвичай, це, насамперед, характеристики і параметри досліджуваного приладу) і **об'єктом дослідження** (наприклад, процес перетворення оптичного випромінювання в електричний інформаційний сигнал), які **методи дослідження** були використані під час підготовки даної роботи, в чому полягає **практична цінність** проведеного дослідження чи розробки.

**Перший розділ** рекомендується побудувати як аналіз стану питання, тобто на основі залучення якомога ширшого наявного літературного матеріалу (підручники, навчальні посібники, наукові монографії та статті з наукових журналів, описи патентів на винаходи тощо) критично висвітлити, в якому стані знаходиться об'єкт вашого дослідження, наскільки він поширений, де використовується, чи достатня теоретична база для аналізу та проектування даних приладів, які є шляхи покращення конструктивних чи експлуатаційних параметрів таких приладів (виключно відповідно до заявленої мети).

При аналізі стану питання обов'язковим є не тільки критичне висвітлення певної інформації про об'єкт дослідження, але й коректне ставлення до самих джерел інформації, про що свідчить наявність чи відсутність у тексті вашої роботи відповідних цифр у квадратних дужках, кожна з яких відповідає номеру того чи іншого видання зі списку використаної літератури, що обов'язково подається в кінці курсової роботи. Оформляти цей список необхідно з дотриманням сучасних правил бібліографічного опису документів. При цьому не слід забувати, що **бібліографічний опис** того чи іншого документа подається тільки **мовою оригіналу**.

**Другий розділ**, як правило, присвячується розрахункам конкретної напівпровідникової структури з наперед заданими параметрами. При виконанні цього розділу курсової роботи слід використати всю наявну

теоретичну базу, враховуючи як лекційний матеріал, так і рекомендовану вам спеціальну літературу. Якщо тема курсової роботи була запропонована самим її виконавцем, то структура і обсяг відповідних розрахунків повинні бути обов'язково погоджені з керівником вашої курсової роботи і відповідним чином зафіксовані в індивідуальному завданні на КР.

Індивідуальне завдання може передбачати і елементи конструкторської роботи, а саме: відтворення у вигляді креслень розрахованих вами структур або зовнішнього вигляду (складального креслення) відповідних приладів. Такі креслення подаються як додаток до курсової роботи і оформляються відповідно до вимог ЄСКД («Єдиної системи конструкторської документації»).

**Третій розділ** не є обов'язковим. Цей розділ є елементом наукової роботи, основна мета якої – дослідження можливості суттєвого покращення конструктивних, технологічних або експлуатаційних параметрів чи характеристик транзисторної структури, що покладена в основу даної курсової роботи.

Методи такого дослідження можуть носити як експериментальний, так і теоретичний характер із залученням методів математичного і комп'ютерного моделювання. Результати таких досліджень, як правило, мають елементи наукової новизни або нового технічного рішення, які необхідно формально захистити або у вигляді наукової публікації (доповідь на науковій конференції, наукова стаття у фаховому журналі), або у вигляді заявки на відповідний патент.

**Висновки** по роботі, якими завершується будь-яка робота даного кваліфікаційного рівня, повинні чітко (по пунктах) відповісти, що конкретно зроблено в цій роботі і які конкретні результати отримано. Прикладом такого запису може бути:

«1. Показано, що в інтегральному транзисторі з діодом Шоттки в режимі насичення при одних і тих же значеннях струмів бази і колектора пряма напруга на колекторному переході зменшується на 60 мВ, що призводить до зменшення струму інжекції і пропорційно цьому струмові надлишкового заряду приблизно в 10 разів.

2. Показано, що за заданих умов формування структури MeH-транзистора внаслідок зменшення відстаней виток – затвор і стік – затвор крутизна характеристики транзистора може бути підвищена до значень порядку  $S/b = 250$  мСм/мм».

**Список використаної літератури** оформлюється з урахуванням сучасних вимог до бібліографічного опису інформаційних джерел (ДСТУ ГОСТ 7.1:2006) у кінці курсової роботи (після висновків). Список складається за чергою посилань у тексті (а не за абеткою).

У тексті курсової роботи посилання ставляться в квадратні дужки (наприклад, [1, 2]).

Приклади бібліографічного опису інформаційних джерел наведені нижче.

Для книжок (підручники, навчальні посібники, монографії).

1. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі структур з від'ємним опором / Осадчук О. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 303 с.

2. Васильєва Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник / Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003. – 388 с.

Для наукових статей.

3. Орликовский А. А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: Современное состояние и ближайшие перспективы. Часть IV / А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов // Микроэлектроника. – 2001. – Т.30. – № 6. – С.403 – 433.

4. Curtis В. J. Optical End-Point Detection for the Plasma Etching of Aluminium / В. J. Curtis // Solid State Technology. – 1980. – V. 23. – № 4. – P.129 – 132.

Для патентів.

5. Патент України № 26976, H01L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / Кравченко С. Ю., Кравченко Ю. С., Осадчук В. С., Осадчук О. В. – 2007. – Бюл. 16.

Для електронних джерел інформації.

6. Аверкин С. Н. Зондовая диагностика плазмы ВЧ и СВЧ источников в иммерсионном ионном имплантере [Электронный ресурс] / С. Н. Аверкин, А. П. Ершов, А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов // XXX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конференция, 24 – 28 февр. 2003 г.: тезисы докл., 2003.

Режим доступу: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXX/Pt/ru/AZ-Sukhanov.doc>

**Додатки** до курсової роботи з основ мікроелектроніки та функціональної електроніки подаються як продовження роботи на подальших її аркушах.

Кожен додаток повинен починатися з нової сторінки. Він повинен мати заголовок, надрукований вгорі малими літерами з першої великої симетрично відносно тексту сторінки. Посередині рядка над заголовком малими літерами з першої великої повинно бути надруковано слово «Додаток \_» і велика літера що позначає додаток.

Додатки слід позначати послідовно літерами української абетки, за винятком літер Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь, наприклад, «Додаток А», «Додаток Б».

**Ілюстрації (рисунок) і таблиці** в тексті курсової роботи оформлюються відповідно до затверджених норм і вимог.

Ілюстрації можуть бути розміщені як по тексту курсової роботи, так і в її додатках.



Всі ілюстрації нумерують в межах розділу і порядкового номера ілюстрації, розділених крапкою, наприклад: Рисунок 1.1, Рисунок 1.2. Посилання на ілюстрації дають так: «... на рис. 1.1 ...». Посилання на раніше згадувані рисунки дають зі скороченням слова «дивись», наприклад: «див. рис. 3.2».

Всі рисунки повинні мати назву і пояснювальні дані (підрисунковий текст), наприклад, «Рисунок 3.1 – Вихідні характеристики біполярного транзистора» (крапка в кінці назви рисунка не ставиться).

Цифровий матеріал, як правило, оформлюють у вигляді таблиць. Кожна таблиця повинна мати назву, яку треба виконувати малими літерами (перша велика) над таблицею (над лівим верхнім кутом), наприклад, «Таблиця 2.4 – Параметри МДН-структури з полісиліцієвим заслоном» (без крапки у кінці).

Графу «№ п/п» в таблицю не вносять.

Якщо розміри таблиці виходять за формат листа, то таблицю ділять на частини, які в залежності від особливості таблиці переносять на інші листи або розташовують на одному листі, наприклад, одна під одною.

Слово «Таблиця \_», назва і порядковий номер таблиці вказують один раз над першою частиною таблиці, над наступними частинами пишуть слова «Продовження таблиці \_» із зазначенням її номера.

Всі таблиці, якщо їх в роботі більше, ніж одна, нумерують в межах розділу і порядкового номера таблиці, розділених крапкою.

## **2 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ДЕЯКИХ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ**

Загальні теоретичні відомості і методика розрахунку основних компонентів інтегрованої схеми, яка виготовляється за планарно-епітаксійною технологією, наведені в методичних вказівках до самостійної роботи студентів [1]. Якщо ж робота, яка пов'язана з курсовим проектуванням, потребує певних додаткових знань нижче наводяться деякі основні теоретичні відомості щодо розрахунків окремих параметрів компонентів інтегрованої схеми (діодів, біполярних і польових транзисторів).

### **2.1 Діоди**

#### **2.1.1 Діоди з *p-n*-переходом**

Діоди інтегрованих мікросхем створюють на *p-n*-переходах біполярних транзисторів (рис. 2.1). Переходи на *p-n*-переходах біполярних транзисторів можуть бути ступінчастими чи плавними. Якщо діод створено на *p-n*-переході база – емітер, то для нього досить точною буде модель ступінчатого переходу. Для діода на основі *p-n*-переходу база – колектор близькою буде модель плавного лінійного переходу.

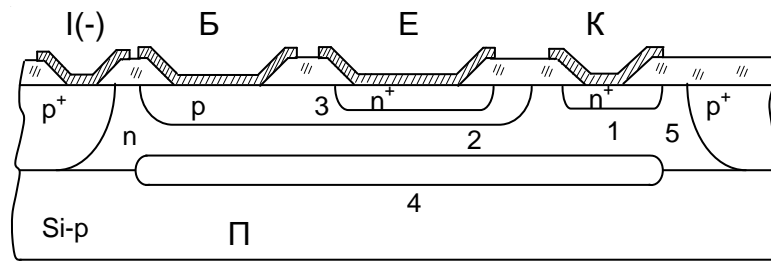


Рисунок 2.1 – Електронно-діркові переходи у структурі біполярного транзистора: 1 –  $n^+-n$ ; 2 – БК –  $p-n$ ; 3 – БЕ –  $p-n^+$ ; 4 – КП –  $n^+-p$ ; 5 – ІК –  $p^+-n$

Плавні лінійні  $p-n$ -переходи виникають в мікросхемах за умови, що різниця між концентрацією акцепторів і донорів (або навпаки) підпорядковується лінійному закону

$$N_a - N_d = -k_2 x, \quad (2.1)$$

де  $k_2$  – градієнт різниці концентрацій акцепторної та донорної домішок.

Переходи поділяють на симетричні та несиметричні. Для симетричних  $N_a \cong N_d$ , проте їх застосовують рідко, оскільки є труднощі їх виготовлення. Несиметричні  $p-n$ -переходи мають різницю в концентраціях у 10–1000 разів.

Концентрацію неосновних носіїв на межі області просторового заряду за умов прямого зміщення визначають за законом  $p-n$ -переходу

$$n_p(-x_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right); \quad p_n(x_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right), \quad (2.2)$$

де  $U$  – напруга прямого зміщення  $p-n$ -переходу.

**Електричне поле у ступінчатому  $p-n$ -переході.** Напруженість електричного поля в  $p$ -області ступінчатого  $p-n$ -переходу визначають за виразом

$$E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon\varepsilon_0}(x + x_p), \quad -x_p \leq x \leq 0, \quad (2.3)$$

де  $N_a$  – концентрація акцепторної домішки в  $p$ -області  $p-n$ -переходу;

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність матеріалу ( $\varepsilon_{Si} = 12$ ,  $\varepsilon_{Ge} = 16$ ,  $\varepsilon_{GaAs} = 10,9$ );

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму ( $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

Напруженість електричного поля в точці  $x = 0$  ступінчатого  $p$ - $n$ -переходу розраховують за формулою

$$E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon\varepsilon_0}x_p. \quad (2.4)$$

Напруженість електричного поля в  $n$ -області  $p$ - $n$ -переходу отримують за рівнянням

$$E(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon\varepsilon_0}(x - x_n), \quad 0 \leq x \leq x_n. \quad (2.5)$$

**Товщина області просторового заряду в ступінчатому  $p$ - $n$ -переході.** Товщину області просторового заряду в  $p$ -області переходу визначають за виразом

$$x_p = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{eN_a(1 + N_a/N_d)} \right]^{1/2}, \quad (2.6)$$

де  $\varphi_k$  – контактна різниця потенціалів на  $p$ - $n$ -переході;

$U$  – зовнішня напруга зміщення.

Товщину області просторового заряду в  $n$ -області переходу визначають як

$$x_p = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{eN_d(1 + N_d/N_a)} \right]^{1/2}. \quad (2.7)$$

Загальну товщину області просторового заряду в  $p$ - $n$ -переході розраховують за формулою

$$l = |x_p| + |x_n|. \quad (2.8)$$

Для однобічних ступінчатих  $p$ - $n$ -переходів товщина переходу визначається товщиною області просторового заряду, яка менше легована. Для переходу  $n^+$ - $p$  ( $N_d \gg N_a$ )

$$l = x_p = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{eN_d} \right]^{1/2}. \quad (2.9)$$

Для переходу  $p^+-n$  ( $N_a \gg N_d$ )

$$l = x_a = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{eN_a} \right]^{1/2}. \quad (2.10)$$

За умов симетричного ступінчатого переходу або у випадку, коли концентрації в кожній області відрізняються в кілька разів, товщину області просторового заряду визначають за формулою

$$l = x_a = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{e} \left( \frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.11)$$

Електричне поле у плавному  $p$ - $n$ -переході. Напруженість електричного поля  $E(x)$  в області просторового заряду розраховується за формулою

$$E(x) = \frac{ek_z}{2\varepsilon\varepsilon_0} (x^2 - x_p^2). \quad (2.12)$$

За координати  $x = 0$  напруженість поля має максимальне значення

$$E(0) = \frac{ek_z x_p^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (2.13)$$

**Товщина області просторового заряду в плавному  $p$ - $n$ -переході.** Товщину області просторового заряду для лінійного  $p$ - $n$ -переходу визначають за виразом

$$l = \left[ \frac{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k + U)}{ek_z} \right]^{1/3}. \quad (2.14)$$

**Ємність  $p$ - $n$ -переходу.** Питому ємність  $p$ - $n$ -переходу визначають за рівнянням

$$C_{j0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{l}. \quad (2.15)$$

Для ступінчатого одnobічного  $p$ - $n$ -переходу за умов зовнішнього зміщення і  $N_d \gg N_a$  ємність переходу визначають за формулою

$$C_j = S \left[ \frac{eN_a \varepsilon \varepsilon_0}{2(\varphi_k + U)} \right]^{1/2}. \quad (2.16)$$

Для плавного переходу за умов зовнішнього зміщення

$$C_j = S \left[ \frac{ek_z (\varepsilon \varepsilon_0)^2}{12(\varphi_k + U)} \right]^{1/3}. \quad (2.17)$$

**Струм діода.** Густину повного струму діода і «товстих областей»  $p$ - і  $n$ -типу  $W_n > L_p$  і  $W_p > L_n$  можемо записати так:

$$J = e \left( \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n p_p}{L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.18)$$

де  $U$  – напруга зміщення діода;

$D_p, D_n$  – коефіцієнти дифузії дірок і електронів;

$p_n, n_p$  – концентрації неосновних носіїв заряду в напівпровідниках  $n$ - та  $p$ -типу;

$L_p, L_n$  – дифузійні довжини дірок і електронів;

$W_n, W_p$  – товщина областей  $n$ - і  $p$ -типу.

Для діода, в якого одна з областей «тонка» (наприклад, область  $p$ -типу), тобто  $W_p < L_n$  (дифузійна довжина  $L_n$  більша ніж товщина області  $W_p$ ) струм крізь  $p$ - $n$ -перехід визначається за формулою

$$J = \left( \frac{eD_p p_n}{L_p} + \frac{eD_n p_p}{L_n} \operatorname{ch} \frac{W_p - x_p}{L_n} / \operatorname{sh} \frac{W_p}{L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.19)$$

Струм крізь діод зі ступінчастим  $p$ - $n$ -переходом ( $N_a \gg N_d$  і  $|x_p| \ll |x_n|$ ) розраховують за виразом

$$J = \left( \frac{eD_p p_n}{L_p} + \frac{eD_n p_p}{L_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.20)$$

Якщо обидві нейтральні області тонкі, то густину повного струму діода з  $p$ - $n$ -переходом визначають за формулою

$$J = \left( \frac{eD_p p_n}{L_p} \operatorname{cth} \frac{W_n}{L_p} + \frac{eD_n p_p}{L_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{L_n} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.21)$$

### 2.1.2 Діоди Шотткі. Контакт метал – напівпровідник

Висота потенціального бар'єра на межі між напівпровідником і металом за умов рівноваги розраховують за формулою

$$U_0 = e\varphi_0 = e\varphi_{MH} - \left( \frac{E_g}{2e} - \varphi_F \right), \quad (2.22)$$

де  $U_0 = e\varphi_0$  – висота потенціального бар'єра;

$e\varphi_{MH}$  – потенціальний бар'єр контакту метал – напівпровідник;

$E_g$  – ширина забороненої зони напівпровідника *p*-типу;

$E_F$  – енергія Фермі в напівпровіднику.

Товщину області просторового заряду за умов рівноваги визначають так:

$$x_{n0} = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d} e\varphi_0 \right)^{1/2}. \quad (2.23)$$

За прямого зміщення переходу

$$x_n = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d} (e\varphi_0 + U) \right]^{1/2}. \quad (2.24)$$

Потік електронів із металу в напівпровідник за умов рівноваги розраховують за формулою

$$j_{MH} = \frac{m_n^* (kT)^2}{h^3} \exp\left(-\frac{eU_{MH}}{kT}\right), \quad (2.25)$$

де  $m_n^*$  – ефективна маса електрона;

$k$  – стала Больцмана;

$h$  – стала Планка

$eU_{MH}$  – висота потенціального бар'єра.

Густину струму для діода Шотткі визначають за виразом

$$J_{MH} = e \frac{m_n^* (kT)^2}{h^3} \exp\left(-\frac{eU_{MH}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.26)$$

Значення висоти потенціального бар'єра контакту метал – кремній *n*-типу для деяких металів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Висота потенціального бар'єра контакту метал – кремній

Метал	Mo	W	Ni	Al	Cu	PtSi	Au
$e\varphi_{MH}$ , eВ	0,59	0,67	0,68	0,76	0,77	0,82	0,84

У рівнянні (2.26) вираз  $A^* = e \frac{m_n^*(kT)^2}{h^3}$  називають сталою Річардсона.

Величина  $A^*$  є однією з найважливіших сталих у теорії контакту метал – напівпровідник і залежить від напівпровідника й типу його провідності. Теоретичні значення відношення  $A^* / A_e^*$ , де  $A_e^*$  – стала Річардсона для термоелектронної емісії в вакуум ( $A_e^* = 1,2 \cdot 10^6$  А / (м<sup>2</sup> · К<sup>2</sup>)) наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Відношення  $A^* / A_e^*$  для різних напівпровідників

Напівпровідник	Тип напівпровідника		
	$p$	$n$ (111)	$n$ (110)
Si			
GaAs			

Струм діода Шоттки з урахуванням сталої Річардсона і площі діода  $S$  визначають за виразом

$$I_{MH} = A^* T^2 S \exp\left(-\frac{eU_{MH}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.27)$$

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники / Степаненко И. П. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 496 с.
2. Аваев Н. А. Основы микроэлектроники. Учебное пособие для ВУЗов / Аваев Н. А., Наумов Ю. Е., Фролкин В. Т. – М. : Радио и связь, 1991. – 288 с.
3. Прищепа М. М. Мікроелектроніка. В 3-х ч. Ч. 1. Елементи мікроелектроніки : навч. посіб. / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк – К. : Вища. шк., 2004. – 431 с.
4. Прищепа М. М. Мікроелектроніка. Елементи мікросхем. Збірник задач : навч. посіб. / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк – К. : Вища. шк., 2005. – 167 с.
5. Щука А. А. Электроника : уч. пособие / Щука А. А. – С-Пб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
6. Осадчук В. С. Основи функціональної мікроелектроніки / Осадчук В. С. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 245 с.
7. Кравченко О. П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки / Кравченко О. П. – К. : Либідь, 1993. – 213 с.
8. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисциплін «Твердотільна електроніка» та «Основи мікроелектроніки і функціональної електроніки» щодо виконання розрахунків і проектування елементів інтегрованих схем для студентів напрямів «Мікро- та наноелектроніка» і «Електронні пристрої та системи» / Уклад. Ю. С. Кравченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 35 с.



## Додаток А

Зразок титульної сторінки курсової роботи

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра електроніки та наносистем

### КУРСОВА РОБОТА

«Основи мікроелектроніки та функціональної електроніки»  
на тему: «МІКРОСХЕМА АВТОГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТНОГО  
ПЕРЕТВОРЮВАЧА»

студента 3 курсу групи ЕП-136  
спеціальності  
«Електронні пристрої та системи»

ІВАНОВА М. Ю.

Керівник: к.ф.-м.-н., професор КРАВЧЕНКО Ю. С.

Національна шкала \_\_\_\_\_  
Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Члени комісії

_____	_____	
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
		_____
	(підпис)	_____ (прізвище та ініціали)
		_____
	(підпис)	_____ (прізвище та ініціали)

м. Вінниця 2017 рік

**Додаток Б**

Зразок індивідуального завдання на курсову роботу

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕНС

Й. Й. Білинський

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**

**на курсову роботу**

з дисципліни «Основи мікроелектроніки та функціональної електроніки»

студенту 3 курсу гр. ЕП-13б Іваненку М. Ю.

на тему: «МІКРОСХЕМА АВТОГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА»

*1. Пропонується: провести аналіз стану питання щодо дослідження, розробки та використання автогенераторів частотних перетворювачів.*

*2. На основі проведеного аналізу запропонувати структурну та електричну принципову схему автогенератора частотного перетворювача.*

*3. Розробити мікросхему автогенератора частотного перетворювача та розрахувати її параметри.*

*Основні вихідні дані:*

---

---

---

---

Дата попереднього захисту роботи «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Завдання видав:

Керівник КР \_\_\_\_\_ Кравченко Ю. С., к.ф.-м.н., професор  
каф. ЕНС

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Завдання отримав:

студент \_\_\_\_\_ Іваненко М. Ю.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

## Додаток В

### Довідкові дані

Таблиця В.1 – Основні фізичні сталі

Стала Планка, $h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с $4,14 \cdot 10^{-15}$ еВ · с
Стала Больцмана, $k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К $0,86 \cdot 10^{-4}$ еВ /К
Маса електрона, $m_e$	$9,106 \cdot 10^{-31}$ кг
Заряд електрона, $e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0$	$8,86 \cdot 10^{-14}$ Ф/см
Магнітна проникність вакууму, $\mu_0$	$1,257 \cdot 10^{-8}$ Гн/см
Швидкість світла, $c$	$2,99778 \cdot 10^{10}$ см/с

Таблиця В.2 – Фізичні властивості напівпровідникових матеріалів

Параметр	Одиниця виміру	Ge	Si	GaAs
Атомний номер	-	32	14	-
Атомна (молекулярна) маса	-	72,59	28,08	144,64
Концентрація атомів, $N$	ат./м <sup>3</sup>	$4,4 \cdot 10^{28}$	$5,0 \cdot 10^{28}$	$1,3 \cdot 10^{28}$
Стала ґратки, $d$ (за 300 К)	м <sup>-10</sup>	5,65	5,43	5,65
Температура плавлення, $T$	°С	936,0	1412,0	1238,0
Діелектрична проникність, $\epsilon$	-	16	12	10,9
Ширина забороненої зони, $E_g$ :	еВ			
0 К		0,785	1,21	1,52
300 К		0,67	1,11	1,43
Концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику $n_i$ (300 К)	м <sup>-3</sup>	$2,1 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{16}$	$8,9 \cdot 10^{12}$
Рухливість носіїв заряду за 300 К:	м <sup>2</sup> /(В·с)			
електронів $\mu_n$		0,39	0,135	0,85
дірок $\mu_p$		0,18	0,048	0,04
Коефіцієнт дифузії за 300 К:	м <sup>2</sup> /с			
електронів $D_n$		$9,3 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
дірок $D_p$		$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

*Навчальне видання*

**Методичні вказівки  
до виконання курсової роботи  
з дисципліни «Основи мікроелектроніки та  
функціональної електроніки»  
для студентів спеціальності  
«Електронні пристрої та системи»**

Редактор В. Дружиніна  
Коректор З. Поліщук

Укладач Юрій Степанович Кравченко

Оригінал-макет підготовлено Ю. Кравченком

Підписано до друку 26.05.2017 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,28.  
Наклад 40 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2017-158.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 59-85-32, 59-81-59,  
**press.vntu.edu.ua,**  
*E-mail: kivc.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.