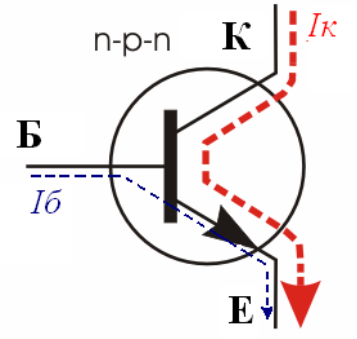
Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

З. А. Ніконова,
О. Ю. Небеснюк

ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

Методичні рекомендації до лабораторних занять
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності
G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
освітньо-професійної програми
«Мікро- та наносистемна техніка»



Обговорено та ухвалено на засіданні кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Протокол № 17 від 08.05.2026

Запоріжжя
2026

УДК 621.315.592
Н153

Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю. Твердотільна електроніка : методичні рекомендації до лабораторних занять для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2026. 42 с.

Методичні рекомендації до лабораторних занять розроблені як для роботи із фізично існуючими стендами так і при віртуальній симуляції певних твердотільних структур. Допоможе надати студентам уяви про фізику роботи, конструкцію та принцип дії напівпровідникових приладів і інтегральних схем; вплив факторів на параметри та характеристики пристроїв і систем мікро- та наносистемної техніки; види технологій і їх застосування; характеристики та параметри активних приладів мікро- та наносистемної техніки, методи вдосконалення їх функціональних можливостей та технологічних особливостей виготовлення, методи розрахунку та вдосконалення характеристик, параметрів та конструкцій елементів твердотільної та оптичної електроніки, наноелектроніки.

Видання призначене для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» », які навчаються за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наносистемна техніка».

Рецензент
В. Л. Коваленко, доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю. М. Потебні ЗНУ.

Відповідальний за випуск
Т. В. Критська, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри електроніки, мікроелектронних систем та програмного забезпечення ІННІ ім. Ю. М. Потебні ЗНУ.

Зміст

Вступ 4
Лабораторна робота №1 5
Дослідження вольт-амперної характеристики діода 5
Лабораторна робота №2 9
Дослідження механізмів пробою в діодах 9
Лабораторна робота №3 15
Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора 15
Лабораторна робота №4 19
Дослідження характеристик польового транзистора з керуючим p-n переходом 19
Лабораторна робота №5 23
Розрахунок параметрів та характеристик біполярного транзистора 23
Лабораторна робота № 6 28
Розрахунок параметрів та характеристик тиристора 28
Лабораторна робота № 7 33
Визначення параметрів пасивних компонентів мікроелектроніки 33
Приклад тестових завдань контролю знань студентів 35
Література, інформаційні джерела 39

Вступ

Метою викладання дисципліни «Твердотільна електроніка» є надання студентам уяви про фізику роботи, конструкцію та принцип дії напівпровідникових приладів і інтегральних схем; вплив факторів на параметри та характеристики пристроїв і систем мікро- та наносистемної техніки; види технологій і їх застосування; характеристики та параметри активних приладів мікро- та наносистемної техніки , методи вдосконалення їх функціональних можливостей та технологічних особливостей виготовлення.

Основними **завданнями** вивчення дисципліни «Твердотільна електроніка» є: ознайомлення студентів з принципами: функціонування основних приладів і систем мікро- та наносистемної техніки; сучасної електроніки; фізичними та математичними моделями приладів при різних умовах роботи; основними способами та видами методик для дослідження пристроїв і систем мікро- та наносистемної техніки; методами розрахунку та вдосконалення характеристик, параметрів та конструкцій елементів твердотільної та оптичної електроніки, наноелектроніки.

Впровадження віртуальної форми навчання з кредитно-модульною системою в освітньому полі України є об’єктивною вимогою у галузі підготовки кваліфікаційних фахівців та формування громадського суспільства.

Підвищення частки самостійної роботи студентів при вивченні навчальних дисциплін та поширення можливостей освіти за допомогою Internet зумовило необхідність розробки методичних рекомендацій з фундаментальної дисципліни «Твердотільна електроніка».

Існує можливість змоделювати на екрані монітора будь-який технологічний процес, пристрій або прилад. Інтерактивний практикум виконаний у вигляді схем, таблиць з введенням даних, графічних об’єктів, виконаних з використанням широкої палітри кольорів, текстової інформації, розрахункових формул, відео зображень, з супроводом пояснення особливостей тої чи іншої структури, в результаті чого отримано нову якість та потужний інструмент, котрий дозволить зробити процес навчання більш наглядним та цікавим.

Лабораторна робота №1

Дослідження вольт-амперної характеристики діода

Метою виконання роботи є дослідження механізму проходження струму в діоді

Щоб розпочати виконання роботи необхідно спочатку отримати допуск, відповівши на три запитання (рис. 1.1). У разі вірних відповідей студент матиме змогу перейти до виконання поставленої задачі.

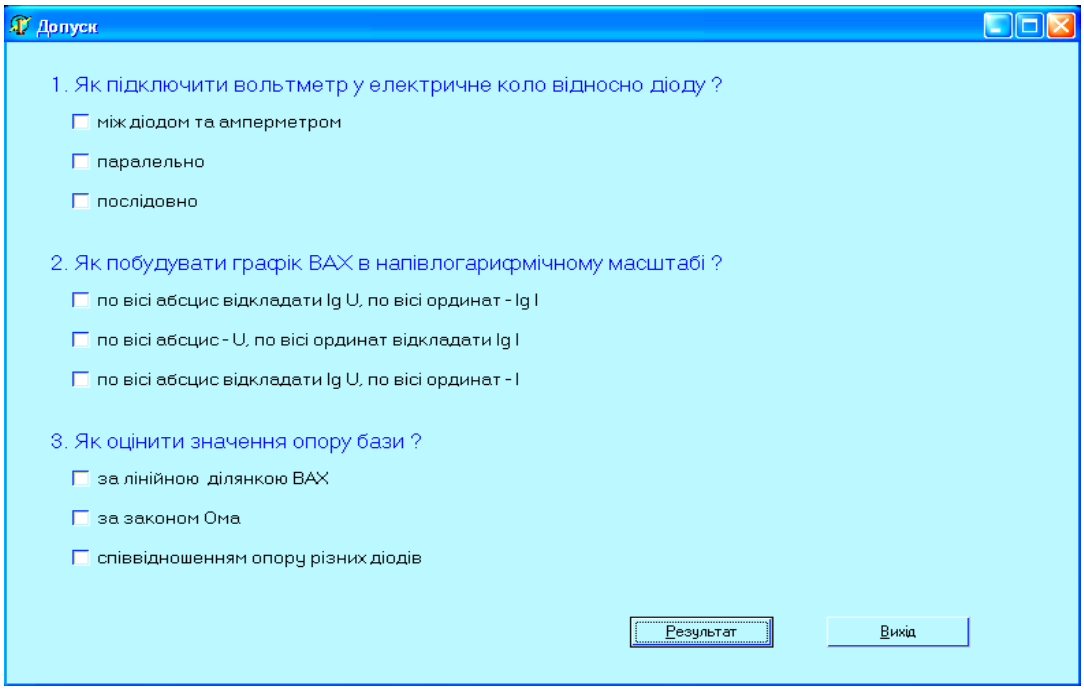


Рисунок 1.1 – Стартове вікно програми для отримання допуску

Порядок виконання лабораторної роботи

Першочергово на екрані з’являється вікно введення початкових параметрів певної напівпровідникової структури (рис.1.2).

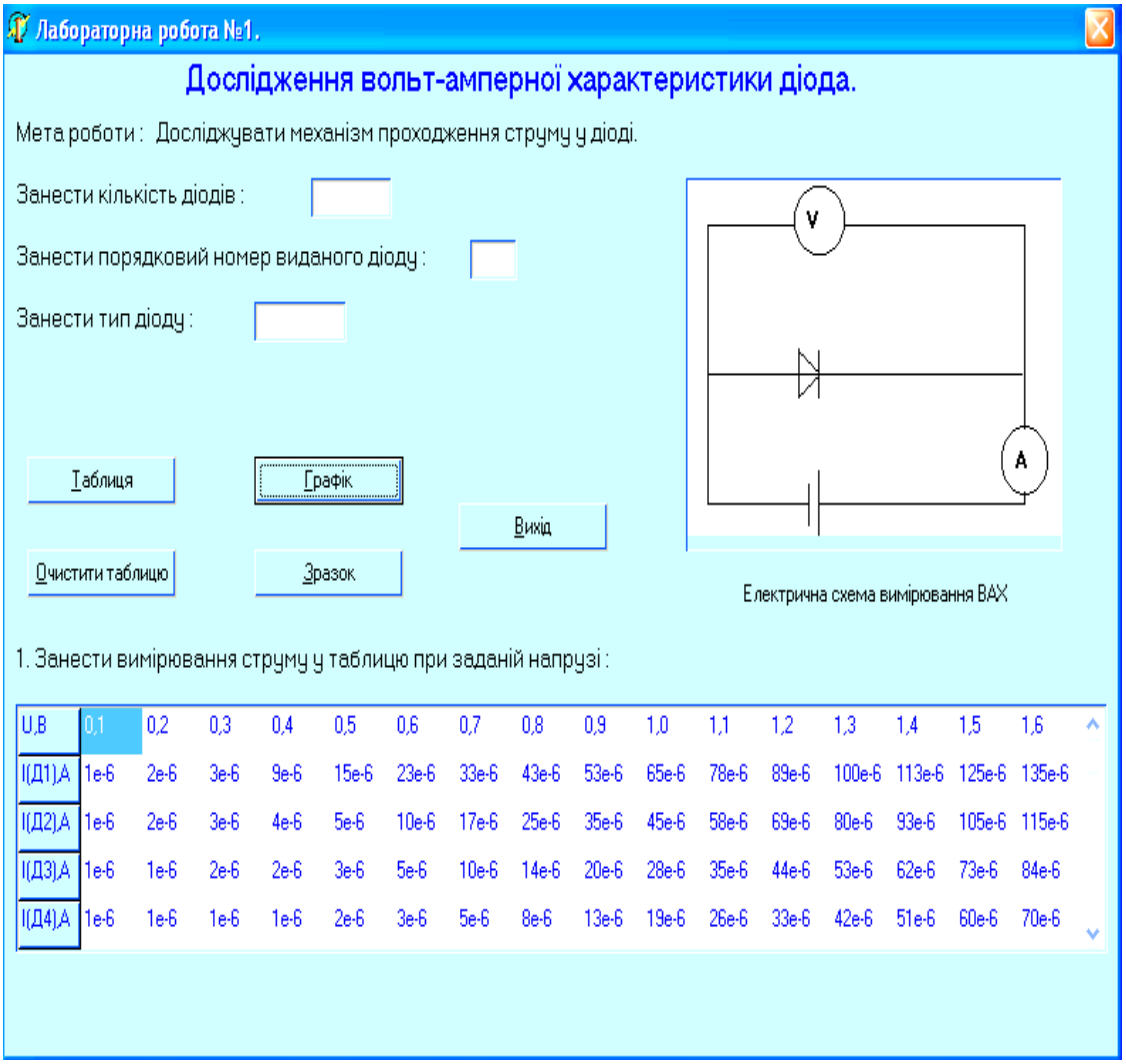


Рисунок 1.2 – Початкові дані для розрахунку

Після введення початкових параметрів програма розраховує необхідні величини і виводить їх у вигляді таблиць та графіків (рис. 1.3).

Для розрахунку струму діода з короткою та довгою базами взяти параметри кремнієвої структури :

T- абсолютна температура в градусах Кельвіна $T_w = 300K$;

k - постійна Больцмана $k = 1.38\times10^{-23}$ Дж/К;

U- пряма напруга діода;

D_p, D_n – коефіцієнти дифузії дірок та електронів ;

$D_p = 12.42$ см^2/с ;

$D_n = 21.85$ см^2/с ;

L_p, L_n – дифузійна довжина дірок та електронів;

$L_p = 8,3$ м$^{-6}$;

$L_n = 10,2$ м$^{-6}$;

W – ширина бази, 0,5мкм;

Заряд електрона $q = 1.6\times 10^{-19}$Кл.

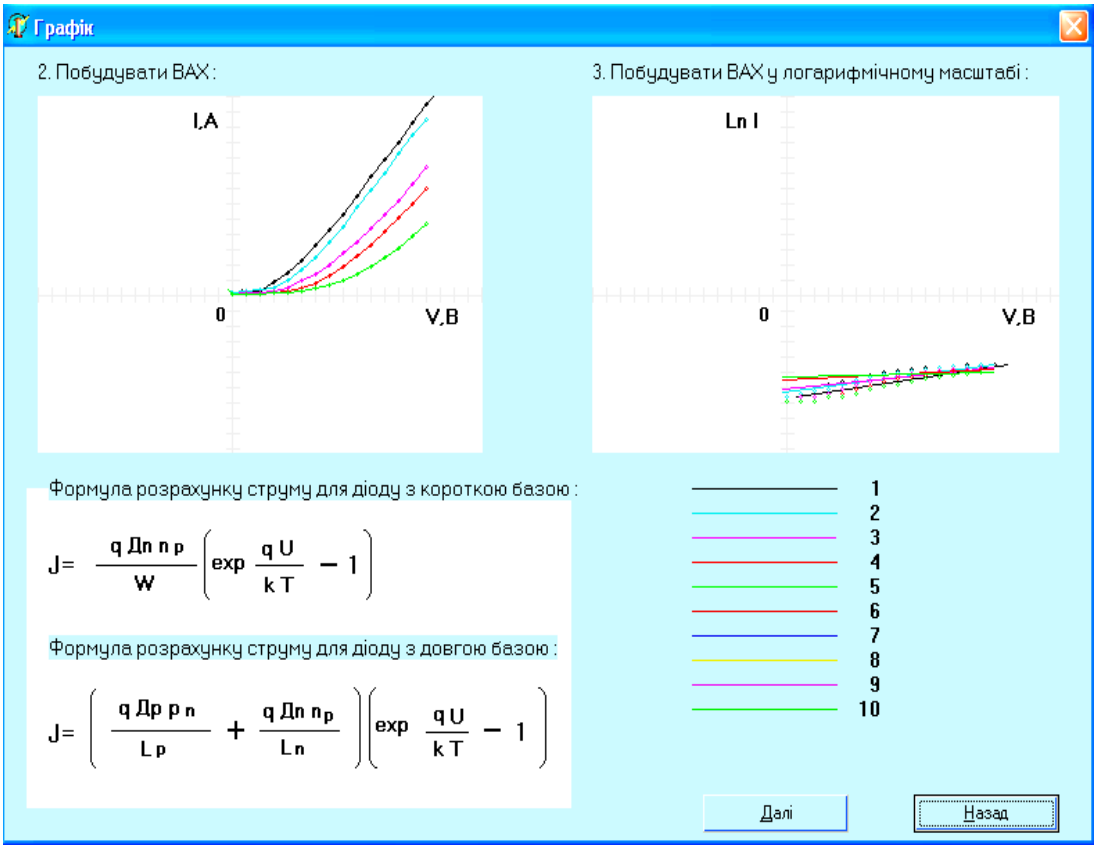


Рисунок 1.3 – Результати розрахунку у вигляді графіків

Дослідження прямої гілки ВАХ діода може бути проведено за допомогою схеми рис.1.5. Вона складається з джерела струму I, міліамперметра A, діода VD і вольтметра V для вимірювання напруги на діоді.

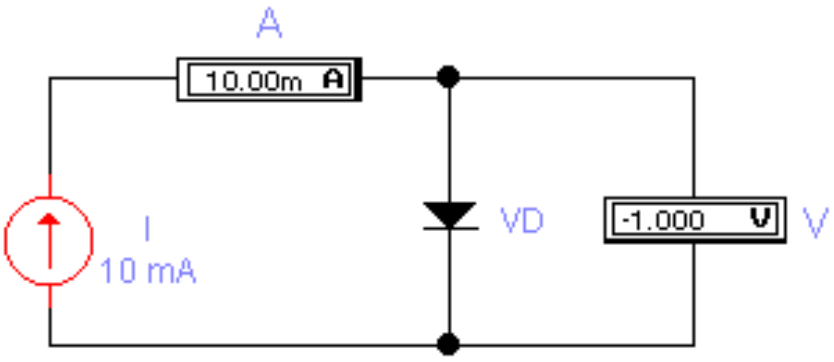


Рисунок 1.5 – Дослідження прямої гілки ВАХ діода

ВАХ можна побудувати після вимірювання значень напруги та струму. Для наочного зображення ВАХ можна використовувати схему на рис.1.6.

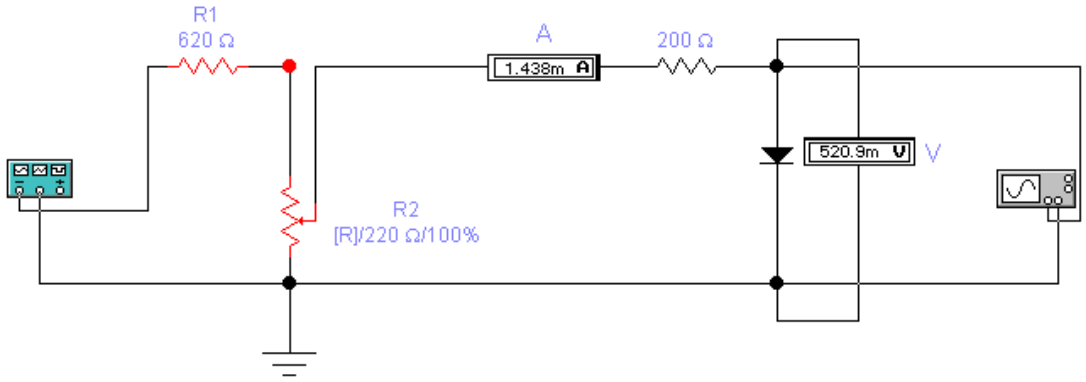


Рисунок 1.6 – Схема для визначення прямої гілки ВАХ

Після отримання результатів необхідно захистити роботу. Захист практичної проходить у вигляді тестування на комп'ютері після чого студентові зараховується або не зараховується робота. Вигляд вікна тестування показано на рис.1.7.

.

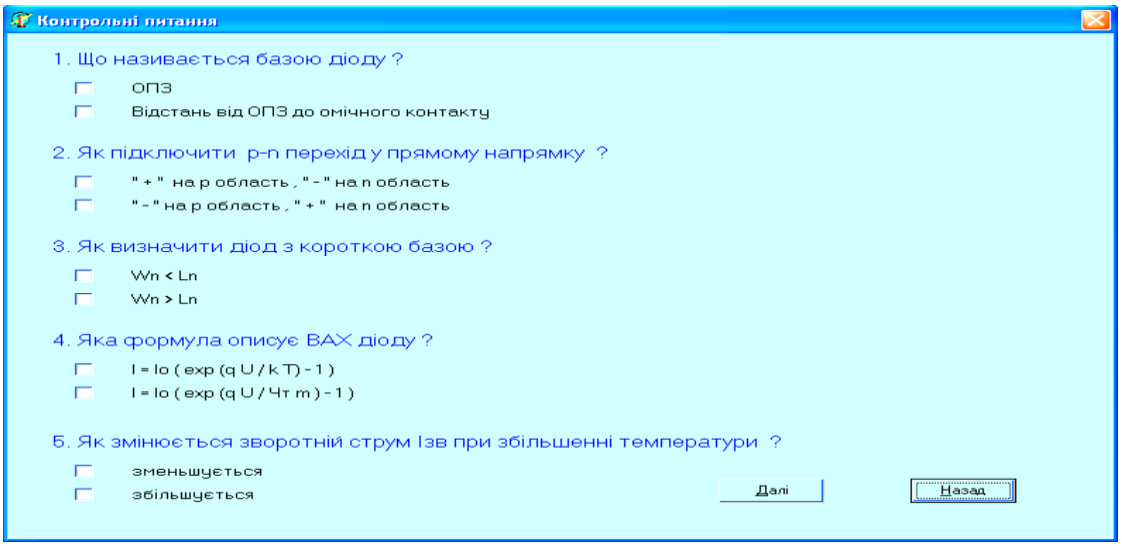


Рисунок 1.7 – Вигляд вікна для тестування студентів

При остаточному тестуванні допускається для зарахування роботи не 100% правильних відповідей, а допускається кількість правильних відповідей від 70% та вище. Та ця цифра може змінюватися за бажанням викладача.

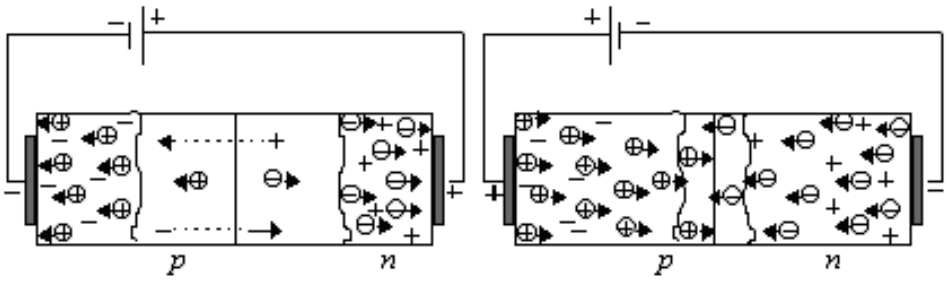
Лабораторна робота №2

Дослідження механізмів пробою в діодах

Метою роботи є дослідження механізмів електричного пробою

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним p-n переходом та двома зовнішніми виводами, в якому використовують ті чи інші властивості p-n переходу.

Малопотужні діоди відрізняються від інших значенням теплового опору $R_т$ (100- 130 ^oC/Вт) та середнім значенням струму, що випрямляється за період $I_{впр}$ < 400мА.



а) б)

а)зворотня напруга,
б) пряма напруга

Рисунок 2.2 - Принцип роботи p-n переходу

У більшості діодів малої та середньої потужності допустимий прямий струм, як правило, не перевищує точку інверсії, а у силових потужних діодів допустимий струм може бути вище цієї точки [1].

Хід виконання лабораторної роботи

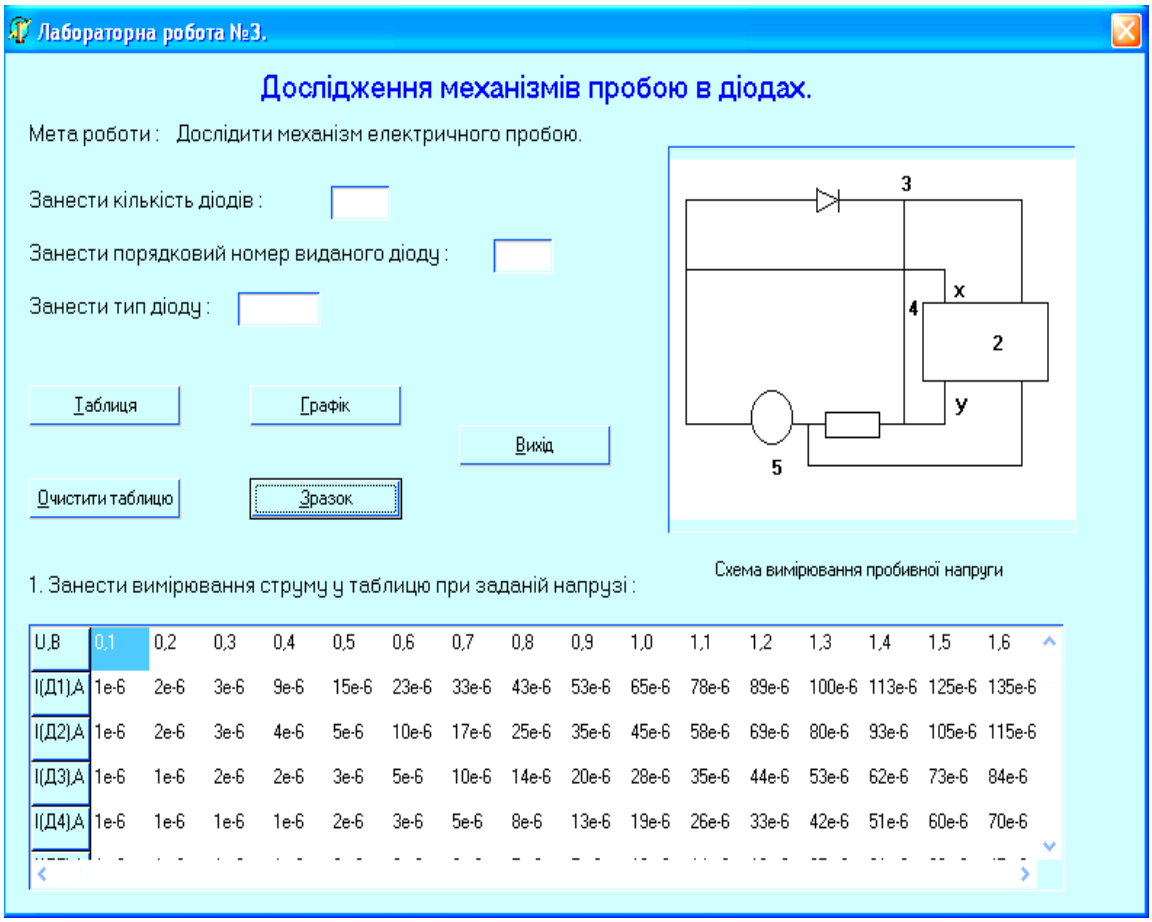
Як приклад, розглянуто розрахунок параметрів та характеристик малопотужного кремнієвого діода.

Вихідні дані:

- Коефіцієнт теплової дифузії D_0 =10,5 $см^2/с$
- Енергія іонізації акцепторів $\Delta E_{akt} = 3.66 \times 1.6 \times 10^{-19}$ Дж
- Постійна Больцмана $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К
- Питомий опір ρ_n = 4.2 Ом× см
- Градієнт концентрації $a = 2.886 \times 10^{19} см^{-3}$
- Рухливість дірок μ_p = 480 $см^2$/Вс
- Кімнатна температура T_w = 300K

- Концентрація електронів у власному напівпровіднику n_i = 1.6 $\times 10^{10}$см$^{-3}$
- Заряд електрона q = 1.6$\times$ 10^{-19}Кл
- Діелектрична постійна ε_0 = 8,85$\times$ 10^{-12} Ф/м
- Ширина забороненої зони ΔE_g = 1.11$\times$1.6$\times$ 10^{-19} Дж
- Діелектрична проникливість 11,8
- Площа перерізу напівпровідника A_{per}= 0.283 мм^2

  φ_t = 0.0259 В



Напруга пробою плавного p-n переходу

$$U_{np} = 60 \cdot \left(\frac{\Delta E_g}{1{,}1 \cdot q \cdot} \right)^{1,2} \cdot \left(\frac{a}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4} \qquad (2.1)$$

$$U_{пр} = 154{,}73 \text{ В}$$

Максимальна зворотня напруга плавного p-n переходу:

$$U_{max} = 0.5\ U_{np} \qquad (2.2)$$

$$U_{max} = 77.36 \text{ В}$$

Контактна різниця потенціалів плавного p-n переходу:

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \left(1.61 \cdot Log\left(\frac{3\varepsilon\varepsilon_0.\varphi_t \cdot a^2}{q{n_i}^3} \right) + 0.8 \right) \quad (2.3)$$

$$\varphi_k = 0.604 \text{ В}$$

Ширина ОПЗ при U_{max} і при нульовій U_0:

$$\delta(U) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_k - U)}{q \cdot a}} \quad (2.4)$$

$$\delta(- U_{max}) = 5.959 \times 10^{-6} \text{м}$$

$$\delta(0) = 1{,}179 \times 10^{-6} \text{м} .$$

Бар'єрна ємність при U_{max} :

$$C_{бар} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A_{per}}{\delta(-U_{\max})} \quad (2.5)$$

$$C_{бар} = 4{,}95 \text{ пФ} .$$

Побудуємо ВАХ діода .

Зворотня гілка ВАХ:

- Коефіцієнт дифузії неосновних носіїв D_p заряду та їх час життя τ_p:

$$D_p = \frac{k \cdot T_w}{q} \cdot \mu_p \quad (2.6)$$

$$D_p = 12.42 \text{ см}^2/\text{с} .$$

$$\tau_p = \frac{{L_p}^2}{D_p} \quad (2.7)$$

$$\tau_p = 8.052 \times 10^{-6} \text{с} .$$

- Струм насичення:

$$I_s = q \cdot {n_i}^2 \cdot \frac{D_p \cdot A_{per}}{C_b L_p} \tag{2.8}$$

$I_c = 1.199 \times 10^{-13}$.

- Генераційний стум:

$$I_g(U) = \frac{A_{per} \cdot q \cdot n_i}{2\tau_p} \cdot \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_k - U)}{q \cdot a}} \tag{2.9}$$

$I_g = 2{,}68 \times 10^{-16}$ A .

- Загальний зворотній струм:

$$I_1(U) = I_s\left(\exp\left(\frac{U}{\varphi_t}\right) - 1\right) - I_g(U) \tag{2.10}$$

- Загальна зворотня щільність струму:

$$J_1(U) = \frac{I_1}{A_{per}} \tag{2.11}$$

За формулою (2.10) побудувати зворотню гілку ВАХ.

Таблиця 2.1 - Дані вольт-амперної характеристики

U(V)	0	-10	-20	-30	-40	-50
I(mkA)	0	-0,761	-0,929	-1,046	-1,139	-1,217

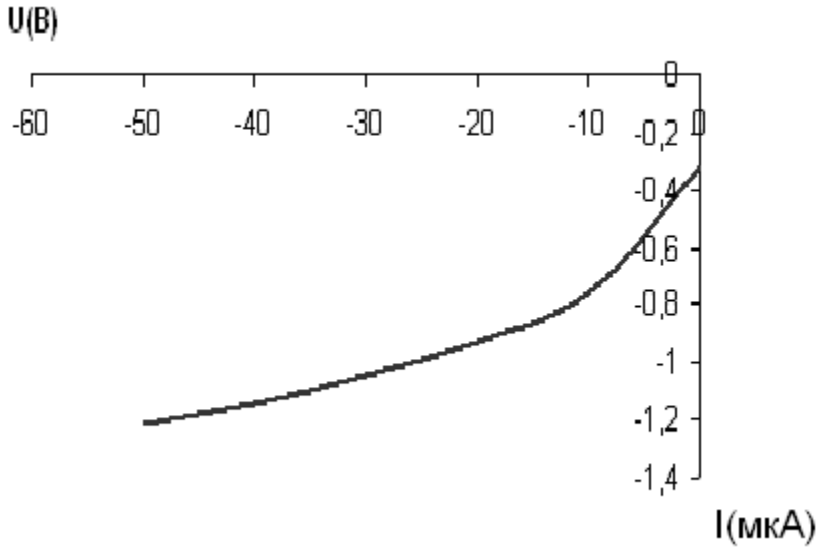


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика діода (зворотня гілка)

Для дослідження зворотної гілки ВАХ діода можна використовувати схему на рис. 2.4. В ній замість джерела струму використовується U_i із запобіжним резистором R_z для обмеження струму через діод у разі його пробою.

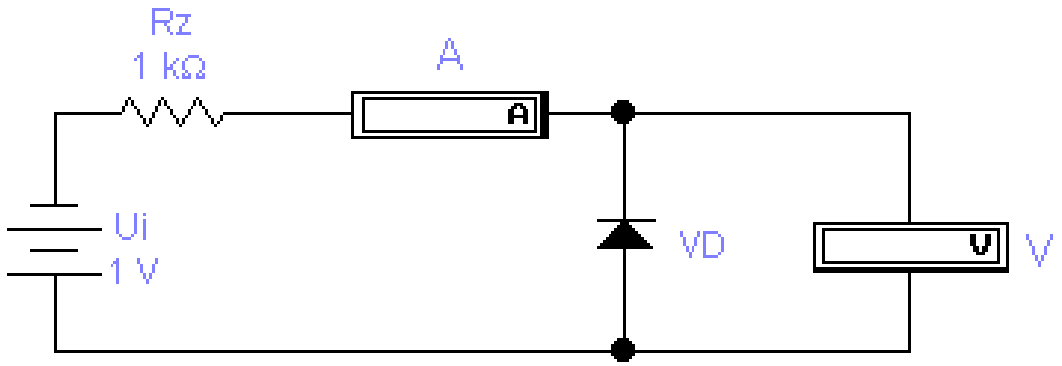


Рисунок 2.4 – Дослідження зворотної гілки ВАХ діода

Після вимірювання значень напруги та струму будується ВАХ. Для наочного зображення ВАХ можна використовувати схему на рис.2.5.

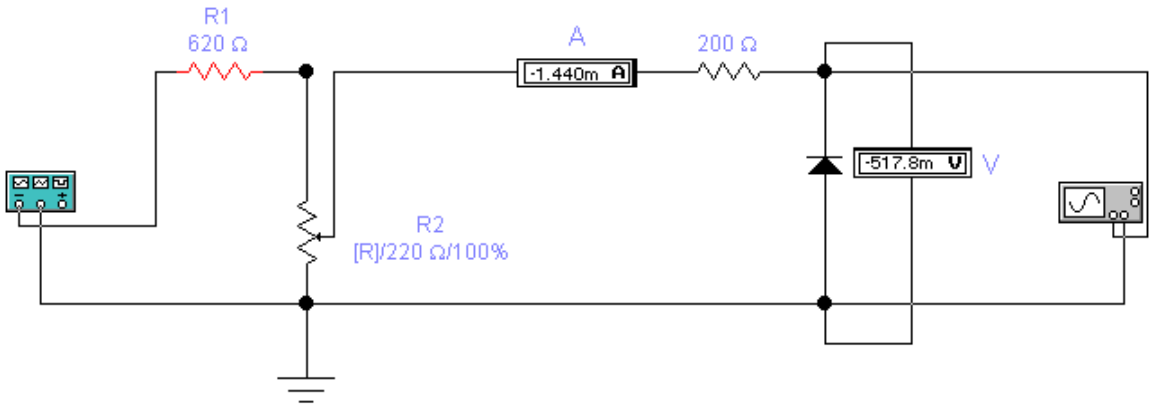


Рисунок 2.5 – Схема для визначення зворотної гілки ВАХ

Після отримання результатів необхідно написати висновок та захистити роботу.

Лабораторна робота №3

Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора

Метою виконання роботи є дослідити залежність струму колектора біполярного транзистора від напруги на колекторі, струму емітера від напруги на емітері

Біполярні транзистори (БТ)- це напівпровідникові прилади, які призначені підсилювати сигнал та мають три виводи або більше. Транзистори можуть мати різне число переходів між областями з різною електропровідністю. Найбільш поширені транзистори з двома р-п переходами. Ці транзистори називають біполярними, тому що їх робота пов'язана з використанням носіїв заряду обох знаків.

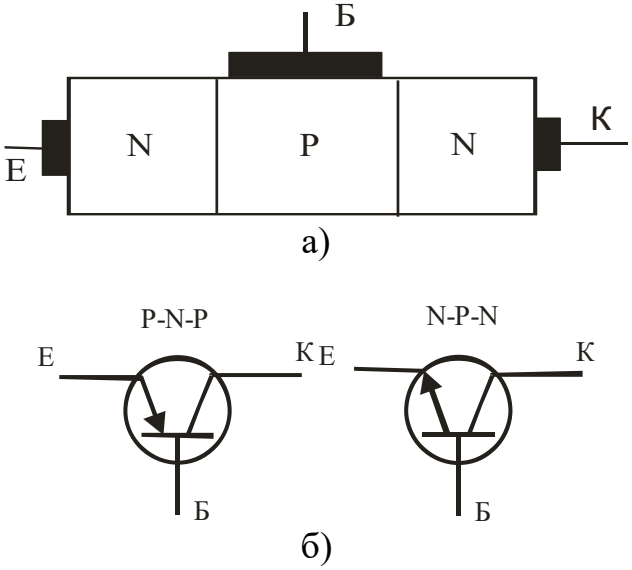


Рисунок 3.1 -Схематичне зображення плоского транзистора:а) умовне, б) на схемах

Середня область транзистора називається базою, одна крайня область - емітером, друга - колектором. Таким чином, транзистор має два р-п переходи емітерний - між емітером і базою та колекторний - між базою і колектором. Відстань між ними повинна бути мала, не більше одиниць мікрометрів, тобто область бази повинна бути дуже тонкою. Окрім цього, концентрація домішок в базі завжди значно менша, ніж у колекторі та емітері. Це являється умовою для стабільної роботи транзистора [1, 3, 4].

Хід виконання лабораторної роботи

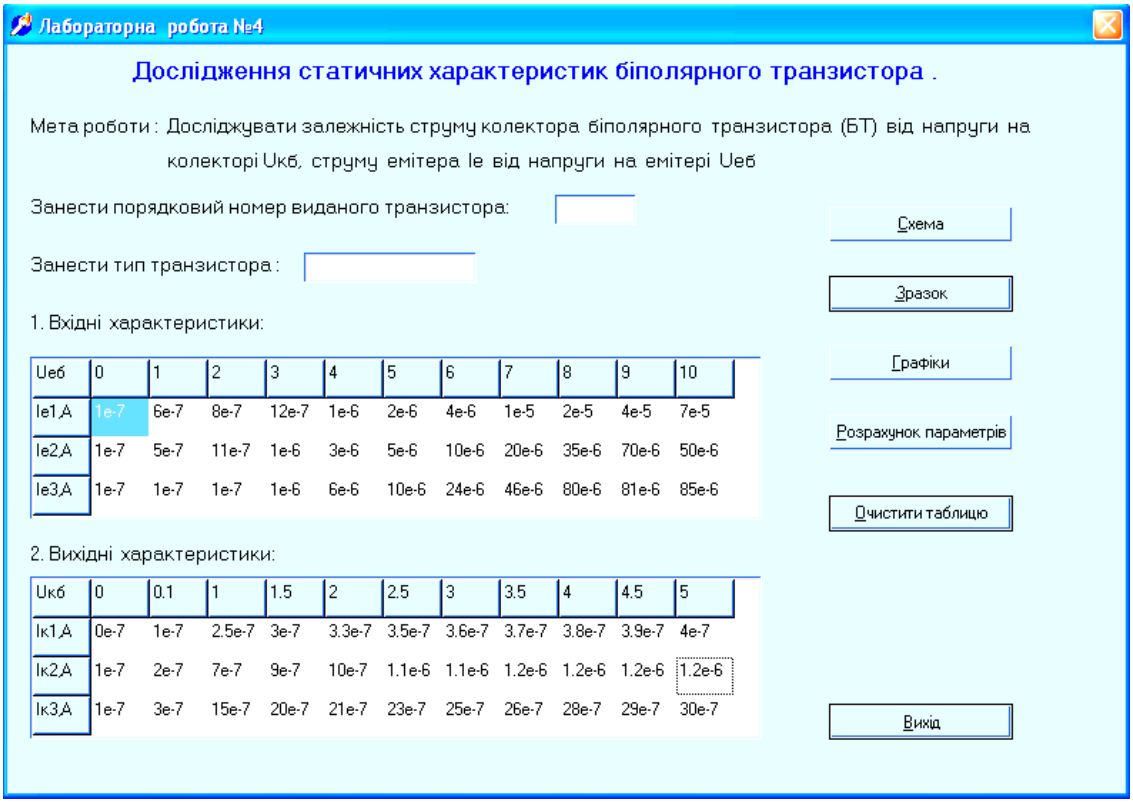


Рисунок 3.2– Початкові дані для розрахунку

Моделювання біполярного транзистора, увімкненого за схемою зі спільним емітером (СЕ) можна проводити за схемою рис.3.3.

- Скласти схему біполярного транзистора (рис.3.3), увімкненого за схемою зі СЕ без навантаження:
- Задаючи струм, що поступає на базу, за допомогою приладів фіксуються зміни вхідної напруги. Дослідження проводяться для фіксованої напруги на виході.
- Змінивши напругу на виході (Ek) повторно, змінити вхідний струм і зафіксувати показання приладів.
- Необхідно виконати досліди приблизно для 5-7 змін вихідної напруги.
- Показання приладів заносяться до таблиці.

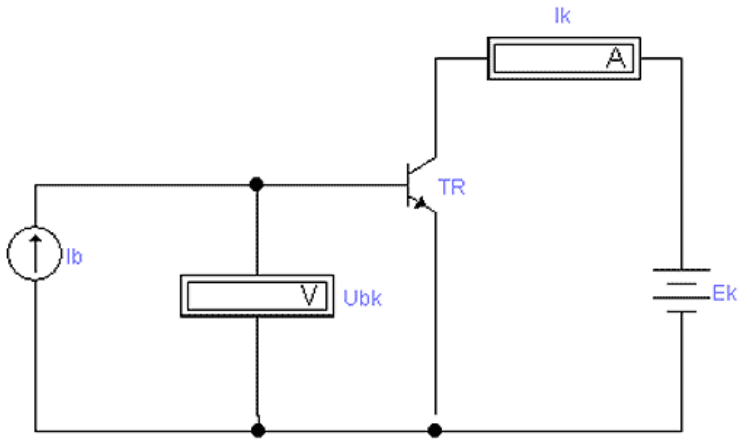


Рисунок 3.3- Схема БТ зі СЕ без навантаження

Моделювання біполярного транзистора, увімкненого за схемою зі спільною базою (СБ) можна проводити за схемою рис.3.4.

- Скласти схему біполярного транзистора (рис.3.4), увімкненого за схемою зі СБ без навантаження.
- Задаючи зміни струму, що проходить через емітер, за допомогою приладів фіксуються зміни вхідної напруги. Досліди проводять для фіксованої напруги на виході. Примітка: вхідний струм змінюють у межах від 0,001мА до 0,01мА.
- Змінивши напругу на виході (Ek) повторно, змінюється вхідний струм і фіксуються показання приладів. Межі зміни струму залишаються колишніми.
- Необхідно провести досліди приблизно для 5-7 змін вихідної напруги.
- Показання приладів заносяться у таблицю.

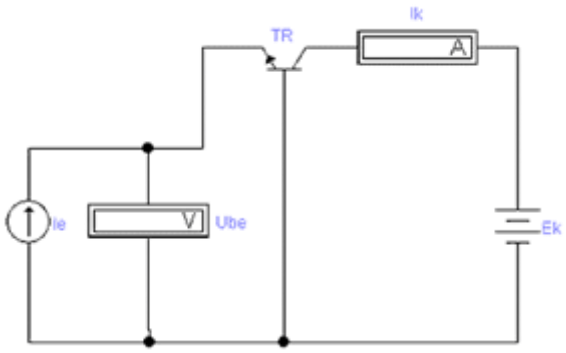


Рисунок 3.4- Схема БТ зі СБ без навантаження

- Далі, задаючи зміни напруги на виході (у межах від 100Вдо 100кВ) при незмінному вхідному струмі, за допомогою приладів фіксуються зміни вихідного струму й напруги.

- Зміна струму на вході (у межах від100мкА до 500мА) (Ie), приводить до зміни вихідної напруги (у тих же межах), при цьому фіксуються показання приладів.
- Необхідно провести дослідження приблизно для 3-5 змін вхідного струму.
- Показання приладів заносяться до таблиці.

Моделювання біполярного транзистора, увімкненого за схемою зі спільним колектором (СК) можна проводити за схемою рис.3.5.

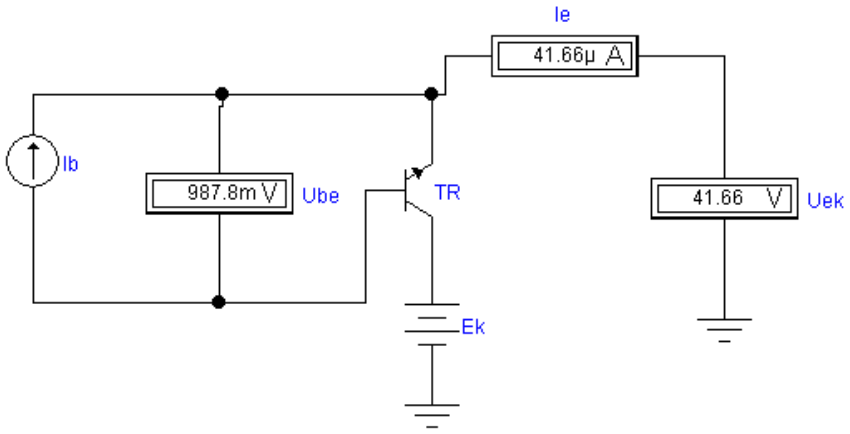


Рисунок 3.5- Схема БТ зі СК без навантаження

- Задаючи зміни струму на базі (рис.4.20) (у межах від 1мкА до 50мкА), за допомогою приладів фіксуються зміни вхідної напруги. Дослідження проводяться для фіксованої напруги живлення (Ек)(у межах від 1В до 10В).
- Потім, зі зміною напруги живлення (Ek) (її можна змінювати від 1В до 10В) повторно, змінюється вхідний струм і фіксуються показання приладів.
- Необхідно провести дослідження приблизно для 5-7 змін вихідної напруги.
- Показання приладів заносяться до таблиці.

Після отримання результатів необхідно побудувати графіки вхідної та вихідної характеристик приладу, написати висновок та захистити роботу.

Лабораторна робота №4

Дослідження характеристик польового транзистора з керуючим p-n переходом

Метою виконання роботи є ознайомленняз принципом дії польового транзистора з керуючим p-n переходом

МДН - транзистор - польовий транзистор з ізолюючим затвором, в якому ізоляційний шар поміж кожним металевим затвором та каналом є діелектрик.

Існують два різновиди МДН - транзисторів: з індуцированим каналом і з вбудованим каналом. В МДН - транзисторах з індуцированим каналом провідний канал між сильнолегованими областями витоку і стоку не існує, отже помітний струм стоку з'являється тільки при визначеній полярності та при визначеній величині напруги на затворі відносно витоку, яку називають пороговою напругою [1-5].

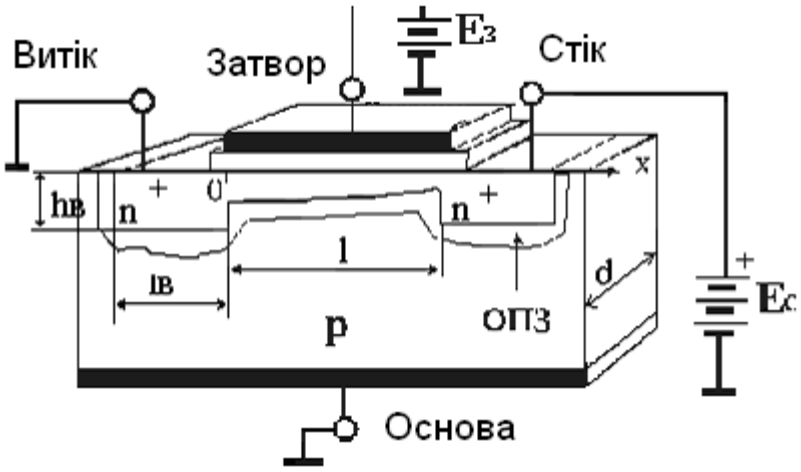


Рисунок 4.1 - МДН транзистор з індукованим n каналом

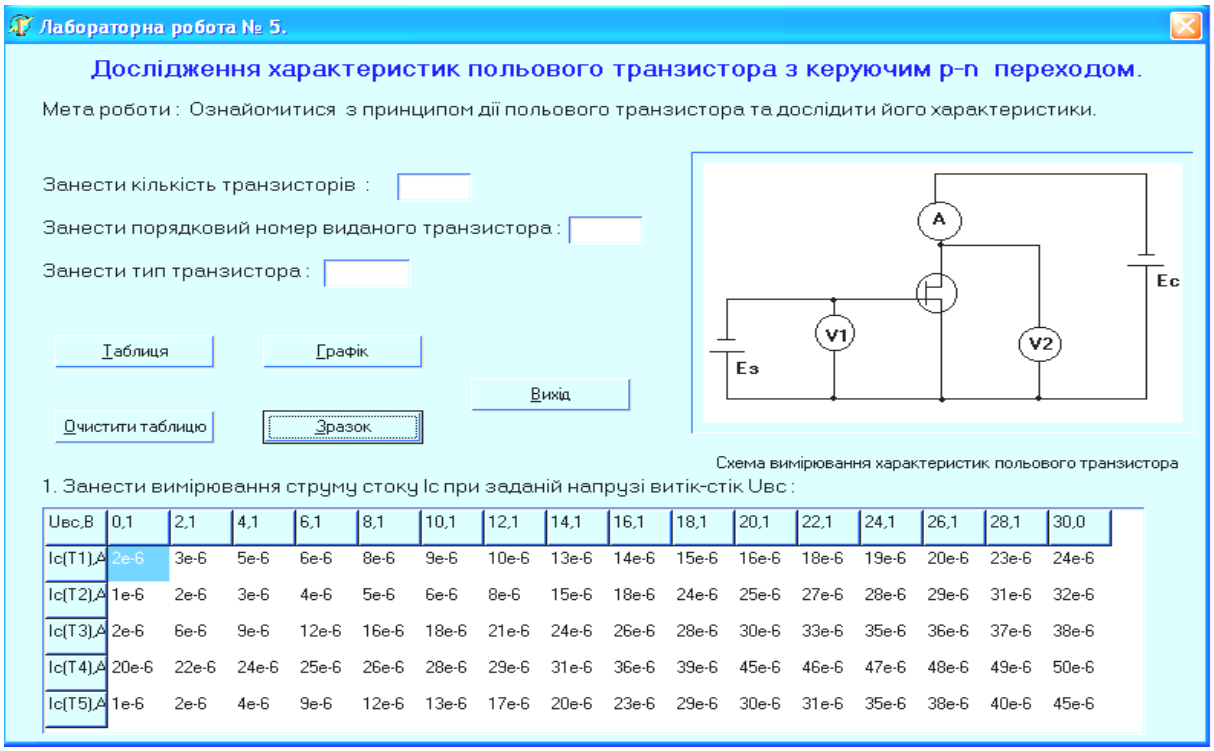
Польовий транзистор з керуючим p-n переходом

Польовий транзистор з керуючим p-n переходом являє собою тонку пластину напівпровідникового матеріалу з двома p-n переходами в центральній частині і з омічними контактами по краях.

Чинність цього приладу основана на залежності товщини p-n переходу від доданої до нього напруги. Оскільки збіднений шар майже повністю позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність практично дорівнює нулю. Обмежуючи з бокових сторін струмопровідний канал (напівпровідником пластини), збіднений шар, що утвориться завдяки цьому визначає перетин або

ефективну товщину. У залежності від електропровідності напівпровідника канал може бути n- типу або p- типу [2-4].

Хід виконання лабораторної роботи



Uвс,В	0,1	2,1	4,1	6,1	8,1	10,1	12,1	14,1	16,1	18,1	20,1	22,1	24,1	26,1	28,1	30,0
Ic(T1),A	2e-6	3e-6	5e-6	6e-6	8e-6	9e-6	10e-6	13e-6	14e-6	15e-6	16e-6	18e-6	19e-6	20e-6	23e-6	24e-6
Ic(T2),A	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	6e-6	8e-6	15e-6	18e-6	24e-6	25e-6	27e-6	28e-6	29e-6	31e-6	32e-6
Ic(T3),A	2e-6	6e-6	9e-6	12e-6	16e-6	18e-6	21e-6	24e-6	26e-6	28e-6	30e-6	33e-6	35e-6	36e-6	37e-6	38e-6
Ic(T4),A	20e-6	22e-6	24e-6	25e-6	26e-6	28e-6	29e-6	31e-6	36e-6	39e-6	45e-6	46e-6	47e-6	48e-6	49e-6	50e-6
Ic(T5),A	1e-6	2e-6	4e-6	9e-6	12e-6	13e-6	17e-6	20e-6	23e-6	29e-6	30e-6	31e-6	35e-6	38e-6	40e-6	45e-6

Рисунок 4.2 – Початкові дані для розрахунку

Розглянуто, як приклад, розрахунок деяких параметрів МДН - транзистора.

Вихідні дані:

- Довжина каналу $l = 5\times10^{-6}$ м
- Ширина каналу $d = 5\times10^{-4}$ м
- Товщина шару діелектрика $d_0 = 1.2\times10^{-7}$ м
- Рухливість дірок $\mu_n = 4\times10^{-2}$ м^2/Вс
- Порогова напруга $U = -1.8$ В
- Напруга на стоці $U = 4$ В
- Напруга на затворі -5.6…-15.6 В, шаг 0,5 В
- Діелектрична проникливість $\varepsilon = 4$ Ф/м
- Діелектрична постійна $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}$ Ф/м

Розрахунок крутизни вольт амперної характеристики $I_c(U_з)$ в області насичення проводиться за формулою:

$$S_{нас} = \frac{\varepsilon_д \varepsilon_0 \mu d}{d_0 l}\left(U_з - U_п\right) = 2{,}1 \cdot 10^{-3}\ \frac{A}{B} \tag{4.1}$$

Ємність затвору відносно витоку і стоку:

$$C_з = \frac{\varepsilon_д \varepsilon_0 l d}{d_0} = 7.38 \cdot 10^{-9}\ Ф \tag{4.2}$$

Частотна межа:

$$f_{макс} = \frac{S_{нас}}{2\pi C_З} = 4{,}58 \cdot 10^{8}\ Гц \tag{4.3}$$

Постійна часу заряду ємності затвору:

$$\tau = \frac{C_з}{S_{нас}} = 6{,}25 \cdot 10^{-11} c \tag{4.4}$$

Розрахунок значення струму I_c при значеннях напруги на затворі від -5,6В до -15,6 з шагом 0,5В проводиться за формулою:

$$I_c = \frac{\varepsilon_д \varepsilon_0 \mu d}{d_0 l}\left(\left(U_з - U_п\right)U_c - \frac{{U_c}^2}{2} \right) \tag{4.5}$$

Як приклад, розглянуто розрахунок деяких параметрів польового транзистора.

Вихідні дані:

- Концентрація домішки, $N = 1.5 \times 10^{16}$ см$^{-3}$
- Рухливість електронів, $\mu_n = 500$ см^2/В×с
- Заряд електрона, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ Кл
- Діелектрична проникливість, $\varepsilon = 11{,}8$
- Діелектрична постійна, $\varepsilon = 8{,}85 \times 10^{-12}$ Ф/м
- Постійна Больцмана $k = 8{,}62 \times 10^{-5}$ еВ
- Термін переходу, $t_{пер} = 0{,}8$ мкс
- Напруга на затворі, $U_З = 39$ В
- Розміри напівпровідникового транзистора:
  Товщина, W = 23 мкм
  Довжина, l = 12 мкм
  Ширина, d = 3 мкм

Розрахунок опору каналу проводиться за формулою:

$$R_k = \frac{l}{e\mu_n WdN} = 4.83 \cdot 10^2 \, Ом \tag{4.6}$$

Питомий опір:

$$\rho = e\, n\, \mu_n = 3{,}6 \text{ Ом} \times \text{см} \tag{4.7}$$

Розрахунок напруги відсічки:

$$U_{від} = \frac{\mathrm{W}^2}{\varepsilon\, \rho\mu_n l} = 85{,}4B \tag{4.8}$$

Граничну частоту визначено за формулою:

$$f_{гр} = \frac{1}{2\pi t_{пер}} = 2{,}01 \times 10^5 \, Гц \tag{4.9}$$

Розрахунок струму стоку при напрузі на стоці 20 В за формулою:

$$I_c = \frac{1}{R_k}\left(U_c + \frac{U_c^{2/3} + U_з^{3/2}}{U_{отс}}\right) \tag{4.10}$$

Крутизну розраховано за формулою:

$$S = \frac{1}{R_k}\left(\frac{1}{3}U_{отс} - U_з\left(1 - \frac{2}{3}\sqrt{\frac{U_з}{U_{отс}}}\right)\right) = \\ = 6{,}71 \cdot 10^{-4} \, A/B \tag{4.11}$$

Розраховано струм насичення за формулою:

$$U_{нас} = \frac{1}{R_k}\left(\frac{1}{3}U_{отс} - U_з\left(1 - \frac{2}{3}\sqrt{\frac{U_з}{U_{отс}}}\right)\right) \tag{4.12}$$

Після отримання результатів необхідно побудувати вихідну характеристику приладу, написати висновок та захистити роботу.

Лабораторна робота №5

Розрахунок параметрів та характеристик біполярного транзистора

Метою виконання роботи є розрахувати та побудувати структуру біполярного транзистора за індивідуальним проєктом.

Хід виконання лабораторної роботи

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку планарного транзистора

Позначення параметра	Назва та одиниця вимірювання параметра	Значення
$U_{кбmax}$	Максимальна напруга колектор-база, В	28
$U_{кб}$	Напруга колектор-база, В	14
$X_{ік}$	Глибина колекторного переходу, м	$2 \cdot 10^{-6}$
N_{as}	Концентрація домішок на поверхні пасивної бази, $см^{-3}$	$1{,}5 \cdot 10^{19}$
$U_{еб}$	Напруга емітер-база, В	7
$U_{ебmax}$	Максимальна напруга емітер-база, В	3,5
$C_к$	Ємність колектора, Ф	$4 \cdot 10^{-9}$
$\omega_к$	Ширина колектора, м	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
$P_{кmax}$	Максимальна потужність колектора, Вт	$26 \cdot 10^{-3}$
$I_{кmax}$	Максимальний струм колектора, А	$22 \cdot 10^{-3}$
$I_е$	Струм емітера, А	$2 \cdot 10^{-3}$
ε_r	Діелектрична проникність у напівпровіднику, Ф/м	11,7
ε_0	Діелектрична проникність в вакуумі, Ф/м	$8{,}85 \cdot 10^{-12}$
$U_{ебо}$	Мінімальна напруга емітер-база, В	4,4
$N_{ае}$	Концентрація акцепторів, $см^{-3}$	$4 \cdot 10^{18}$
$N_{дк}$	Концентрація донорів, $см^{-3}$	$4 \cdot 10^{16}$
μ_n	Рухливість носіїв заряду-електронів, $см^2/В \cdot С$	1250
μ_p	Рухливість носіїв заряду-дірок, $см^2/В \cdot С$	500
$\varphi_т$	Тепловий потенціал, В	0,03
n_i	Концентрація власних носіїв заряду в кремнії, $см^{-3}$	10^{10}
$\omega_{бо}$	Розмір технологічної бази, м	10^{-6}
$X_с$	Глибина епітаксійного шару, м	$20 \cdot 10^{-6}$
α	Мінімальна відстань між контактами, м	$9 \cdot 10^{-6}$
в	Мінімальна ширина контактів, м	$4 \cdot 10^{-6}$
$\omega_{ба}$	Активна ширина бази, м	$0{,}64 \cdot 10^{-6}$

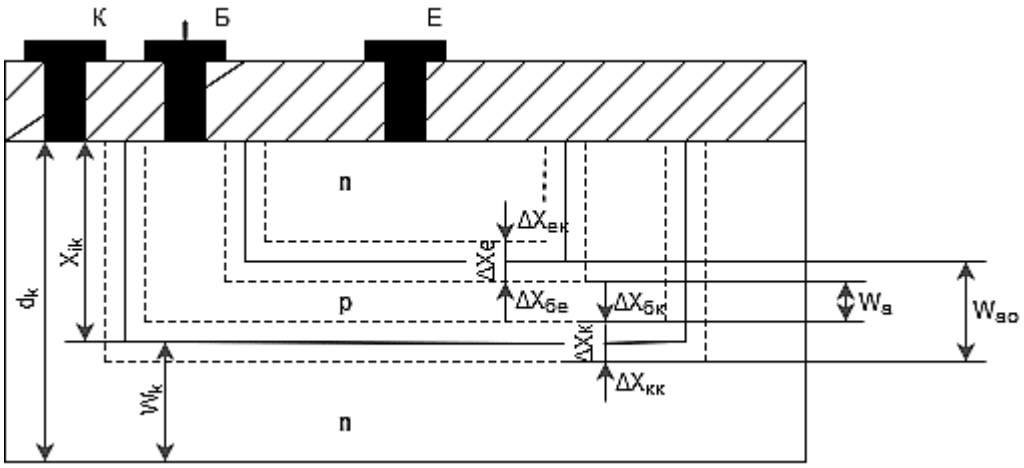


Рисунок 5.1 – Структура планарного транзистора

1. Визначити максимально допустиму пробивну напругу, В

$$U_{кб0} = 1{,}2 * U_{кбmax} \tag{5.1}$$

$$U_{кб0} = 1{,}2 * 28 = 33{,}6$$

2. Визначити питомий опір колекторного переходу при t = 300 К, Ом·см

$$\rho_к = [q * \mu_n * N_{дк}]^{-1} \tag{5.2}$$

$$\rho_к = [1{,}6 * 10^{-19} * 1250 * 4 * 10^{16}]^{-1} = 0{,}125$$

3. Визначити характеристичну довжину домішок, м

$$L_a = \frac{X_{ik}}{\ln\frac{Nas}{N_{дк}}} \tag{5.3}$$

$$L_a = \frac{2 * 10^{-6}}{\ln\frac{1{,}5 * 10^{19}}{4 * 10^{16}}} = 3{,}37 * 10^{-7}$$

$$L_Д = \frac{1}{4} * L_a \tag{5.4}$$

$$L_Д = \frac{1}{4} * 3{,}37 * 10^{-7} = 8{,}44 * 10^{-8}$$

4. Визначити напругу на колекторному переході, В

$$U_0 = \frac{q * N_{дк} * L_a^2}{\varepsilon_r * \varepsilon_0} \tag{5.5}$$

$$U_0 = \frac{1{,}6 * 10^{-19} * 4 * 10^{16} * (3{,}37 * 10^{17})^2}{11{,}7 * 8{,}85 * 10^{-12}}$$

5. Визначити контактну різницю потенціалів на колекторному переході, В

$$\varphi_к = \varphi_T * \ln\left(\frac{N_{дк}}{n_i}\right)^2 \quad (5.6)$$

φ_T – тепловий потенціал (φ_T = 0,026 В);

n_i – власна концентрація носіїв заряду в напівпровіднику ($n_i = 10^{10}$ см)

$$\varphi_к = 0{,}026 * \ln\left(\frac{4 * 10^{16}}{10^{10}}\right)^2 = 0{,}79$$

Контактна різниця потенціалів емітера, В

$$\varphi_e = \varphi_T * \ln\left(\frac{N_{as}}{n_i}\right)^2 \quad (5.7)$$

$$\varphi_e = 0{,}026 * \ln\left(\frac{1{,}5 * 10^{19}}{10^{10}}\right)^2 = 1{,}099$$

6. Визначити ширину області p-n переходу в сторону бази, м

$$\Delta X_к = L_a \ln\left[1 + \sqrt{1 + 2 * \frac{\varphi_к + U_{кбmax}}{U_0}}\right] \quad (5.8)$$

$$\Delta X_к = 3{,}37 * 10^{-7} * \ln\left[1 + \sqrt{1 + 2 * \frac{0{,}79 + 28}{7{,}02 * 10^{-6}}}\right] = 2{,}68 * 10^{-6}$$

$$\Delta X_{кб} = L_a \ln\left[1 + \sqrt{1 + 2 * \frac{\varphi_к + U_{кб}}{U_0}}\right] \quad (5.9)$$

$$\Delta X_{кб} = 3{,}37 * 10^{-7} * \ln\left[1 + \sqrt{1 + 2 * \frac{0{,}79 + 14}{7{,}02 * 10^{-6}}}\right] = 2{,}57 * 10^{-6}$$

$$\Delta X_{кк} = \Delta X_к - \Delta X_{кб} \quad (5.10)$$

$$\Delta X_{кк} = 2{,}68 * 10^{-6} - 2{,}57 * 10^{-6} = 0{,}11 * 10^{-6}$$

7. Вибираємо ширину технологічної бази, м

$$W_{ao} = 1 * 10^{-6}$$

8. Визначити повну товщину колекторного шару, м

$$d_к = W_к + X_{iк} \quad (5.11)$$

$$W_к \approx \Delta X_{кк}$$

$$d_к = 0{,}11 * 10^{-6} + 1 * 10^{-6} = 1{,}12 * 10^{-6}$$

9. Визначити концентрацію акцепторів на емітерному переході, см$^{-3}$

$$N_a = N_{\text{дк}} * \exp\left(\frac{W_{ao}}{L_a}\right) \tag{5.12}$$

$$N_a = 4 * 10^{16} * \exp\left(\frac{10^{-6}}{3{,}37 * 10^{-7}}\right) = 11{,}87 * 10^{16}$$

10. Визначити товщину емітерного переходу, м

$$\Delta X_{\text{е}} = \sqrt{\frac{2 * \varepsilon_r * \varepsilon_0 * (\varphi_e + U_{\text{еб}max})}{q * N_{as}}} \tag{5.13}$$

$$\Delta X_{\text{е}} = \sqrt{\frac{2 * 11{,}7 * 8{,}85 * 10^{-12} * (0{,}79 + 3{,}5)}{1{,}6 * 10^{-19} * 1{,}5 * 10^{25}}} = 3{,}7 * 10^{-16}$$

11.Визначити розміри колекторної області, тобто площу колектора, м^2

$$S_{\text{к}} = \frac{\text{С}_{\text{к}}}{\varepsilon_r * \varepsilon_0} * \sqrt{\frac{2 * \varepsilon_r * \varepsilon_0 * U_{\text{кб}}}{q * N_{\text{дк}}}} \tag{5.14}$$

$$\text{С}_{\text{к}} = 0{,}8 * 10^{-12}\ \Phi$$

$$S_{\text{к}} = \frac{0{,}8 * 10^{-12}}{11{,}7 * 8{,}85 * 10^{-12}} * \sqrt{\frac{2 * 11{,}7 * 8{,}85 * 10^{-12} * 14}{1{,}6 * 10^{-19} * 4 * 10^{22}}} = 5{,}2 * 10^{-9}$$

12. Визначити максимальну напругу на емітерному p-n переході, В

$$U_{emax} = \frac{P_e}{I_e} \tag{5.15}$$

$$P_e = 25 * 10^{-3}\ \text{Вт}$$

$$U_{emax} = \frac{25 * 10^{-3}}{2 * 10^{-3}} = 12{,}5$$

13. Визначити густину струму емітера, при якому транзистор знаходиться в режимі насичення, А

$$I_{\text{екр}} = \frac{U_{\text{еб}max} - \varphi_e}{\rho_{\text{к}} * d_{\text{к}}} \tag{5.16}$$

$$I_{\text{екр}} = \frac{3{,}5 - 0{,}79}{0{,}125 * 10^{-2} * 1{,}12 * 10^{-6}} = 1{,}935 * 10^{9}$$

14. Визначити площу емітера, м^2

$$S_e = \frac{I_e}{I_{\text{екр}}} \tag{5.17}$$

$$S_e = \frac{2 * 10^{-3}}{1{,}935 * 10^{9}} = 1{,}034 * 10^{-12}$$

15. Визначити повну площу транзистора, м^2

$$S_{\text{тр}} = (2 * X_c + 6 * \alpha + 4 * \delta) * (\text{в} + 2 * X_c + 4 * \alpha) \qquad (5.18)$$

$$S_{\text{тр}} = (2 * 3{,}49 * 10^{-16} + 6 * 9 * 10^{-6} + 4 * 2{,}64 * 10^{-6}) * (4 * 10^{-6} + 2 * 3{,}49 * 10^{-16} + 4 * 9 * 10^{-6}) = 2{,}58 * 10^{-9}$$

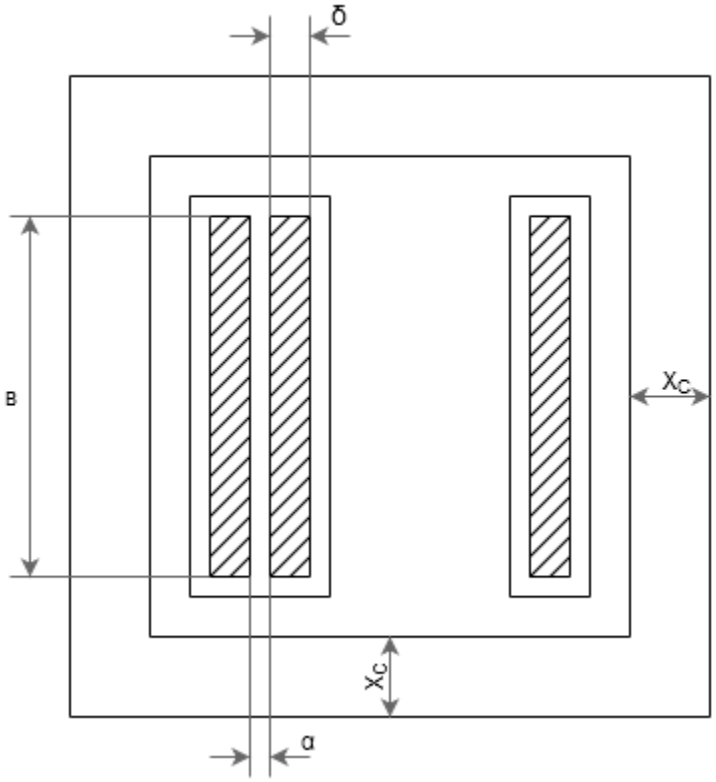


Рисунок 5.2 – Ескізне проєктування планарного транзистора

Після отримання результатів необхідно написати висновок та захистити роботу.

Лабораторна робота № 6

Розрахунок параметрів та характеристик тиристора

Метою виконання роботи є дослідити механізм зміни провідності структури при напрузі переключення

Тиристор – це напівпровідниковий пристрій з двома стійкими станами: стан з низькою провідністю та з високою провідністю.

Тиристори знайшли застосування у різноманітних пристроях автоматики і обчислювальній техніці. Вони можуть виконувати функції перетворювача струму будь-якої форми, ключа генератора і як запам'ятовуючий пристрій.

До параметрів тиристора відносяться:

- Повторююча напруга $U_{повт}$ ($\approx 0{,}75\ U_{проб}$);
- Напруга включення $U_{вкл}$ (від 10 до 2500 В);
- Струм включення $I_{вкл}$;
- Відпираючий струм управління $I_{у\ вип.}$;
- Час затримки $t_З$;
- Час включення $t_{вкл}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямої напруги (dU/dt)max;
- Максимально допустима швидкість наростання прямого струму (dI/dt)max.

Повторююча напруга визначається за формулою:

$$U_{повн} = k \inf(U_{пер}, U_{проб}),$$
$$Uпроб = 120\ В \qquad (6.1)$$

де inf - менше із значень $U_{пер}$ і $U_{проб}$;
k = 0,8 для вітчизняних силових пристроїв.

Знаючи $U_{повт}$, можна визначити напругу переключення при max допустимій температурі структури тиристора (125^0C):

$$U_{пер} = \frac{U_{повт}}{0{,}8}. \qquad (6.2)$$

Для визначення товщини підкладки необхідно розрахувати ширину об'ємного заряду W_{no} при напрузі пробою:

$$W_{no} = 0{,}52\sqrt{\rho U}, \qquad (6.3)$$

де U -напруга;
ρ - питомий опір, 4 Ом·см.

Отже:

$$S_м = 0{,}1S_a\ , \qquad S_a = 102 \text{ мкм} \tag{6.4}$$

Площа структури $S_{стр}$ з урахуванням шунтировки та зони керування:

$$S_{стр} = S_a + S_{упр} + S_м\ , \quad S_{кер} = 21\text{мкм} \tag{6.5}$$

Діаметр цієї структури: h- 7 мкм -висота структури

$$d = 2\sqrt{\frac{S_{стр}}{Г}} \tag{6.6}$$

Г – об'єм

Тиристор має S – образну ВАХ.

$$I = f(E_{пр}) \tag{6.7}$$

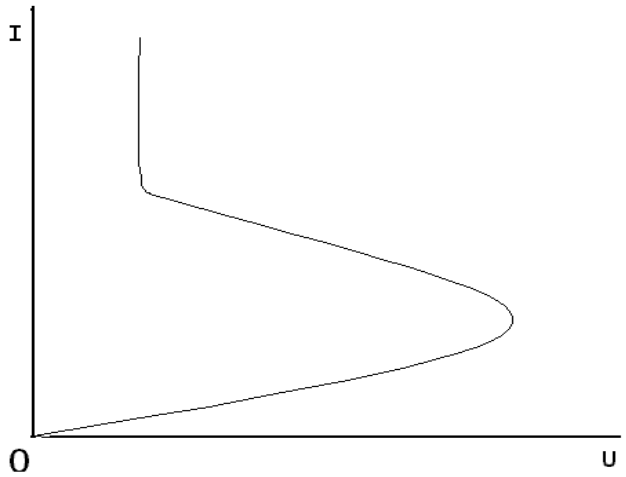


Рисунок 6.1 – Теоретична вольт-амперна характеристика тиристора

Розрахунок характеристик проводиться за формулою:

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3\ , \quad U_1 = 720\text{В},\ U_2 = 134\text{В}, \tag{6.8}$$

Хід виконання лабораторної роботи

Таблиця 6.1- Дані для побудови характеристики тиристора

$U_{КЕР}$ =0В	$U_{ПР}$.В	0	100	150	195	120	100
	$I_{ПР}$.мА	0	50	80	135	140	180
$U_{КЕР}$=7В	$U_{ПР}$.В	0	100	150	195	120	100
	$I_{ПР}$.мА	0	70	100	150	165	180

Дослідження прямої гілки ВАХ тиристора можна проводити з використанням схеми (рис.6.2), де показані джерела вхідної напруги U_i і напруги керування U_y із захисними резисторами R_{zt}, R_{zy}. Вимір ВАХ здійснюється при вимірюванні U_i від нуля до U_{drm} +50 при фіксованому значенні U_y, наприклад, у трьох точках 0,5V_d, V_d і l,5V_d. При дослідженні зворотної гілки ВАХ змінюється тільки полярність U_i.

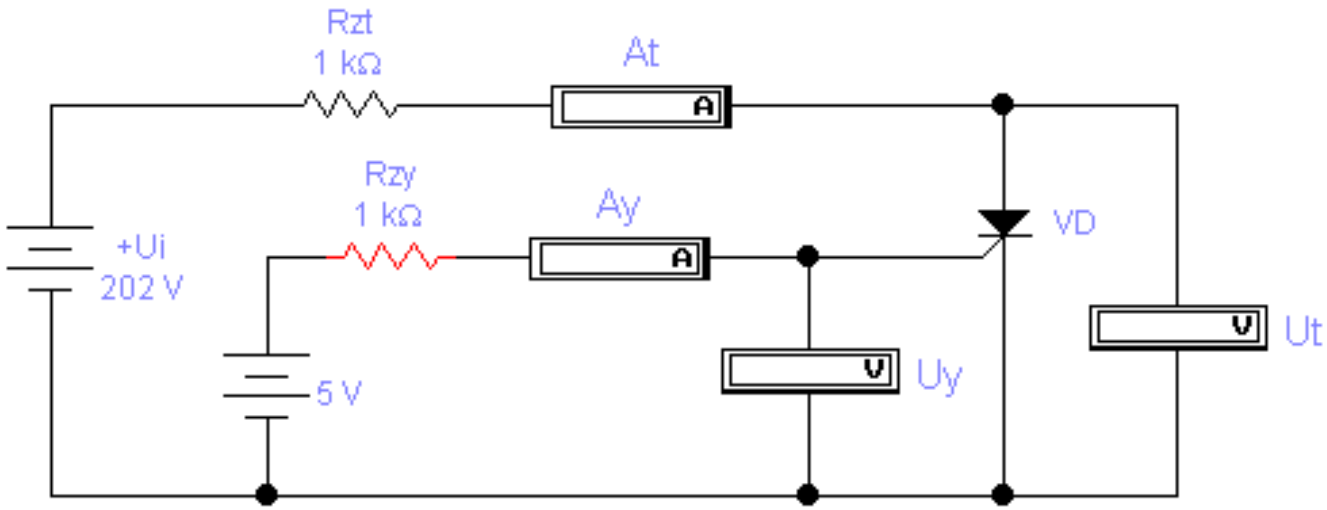


Рисунок 6.2- Схема дослідження тиристорів

Слід відзначити, що зняття ВАХ перемикаючих діодів може бути здійснене також і в режимі заданих струмів у силовому і керуючому ланцюзі. Дослідження інших параметрів тиристорів можливе за допомогою схем рис. 6.3- 6.5.

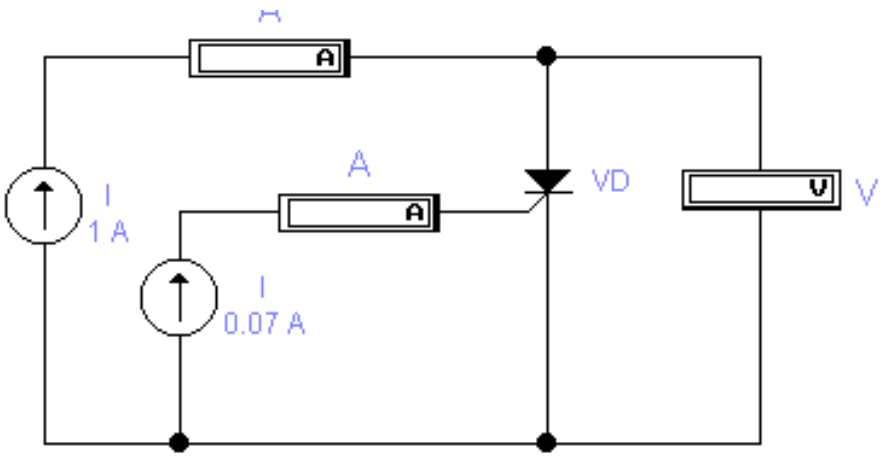


Рисунок 6.3- Схема для дослідження прямої гілки ВАХ тиристора при постійному струмі

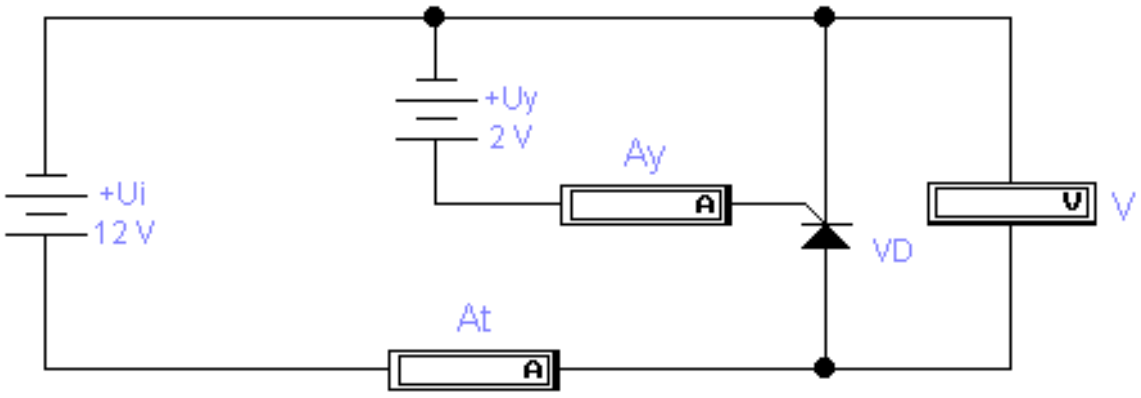


Рисунок 6.4- Схема для дослідження зворотної гілки ВАХ тиристора

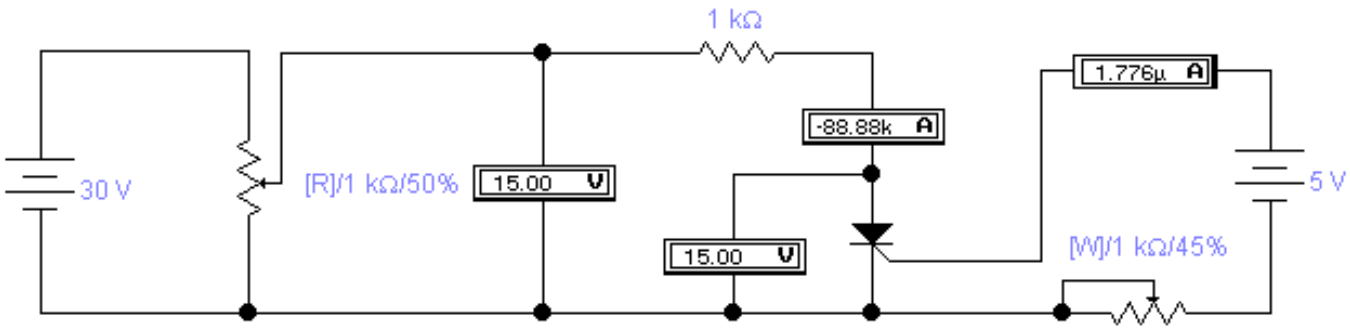


Рисунок 6.5- Схема для дослідження тринистора

Після отримання результатів необхідно написати висновок та захистити роботу.

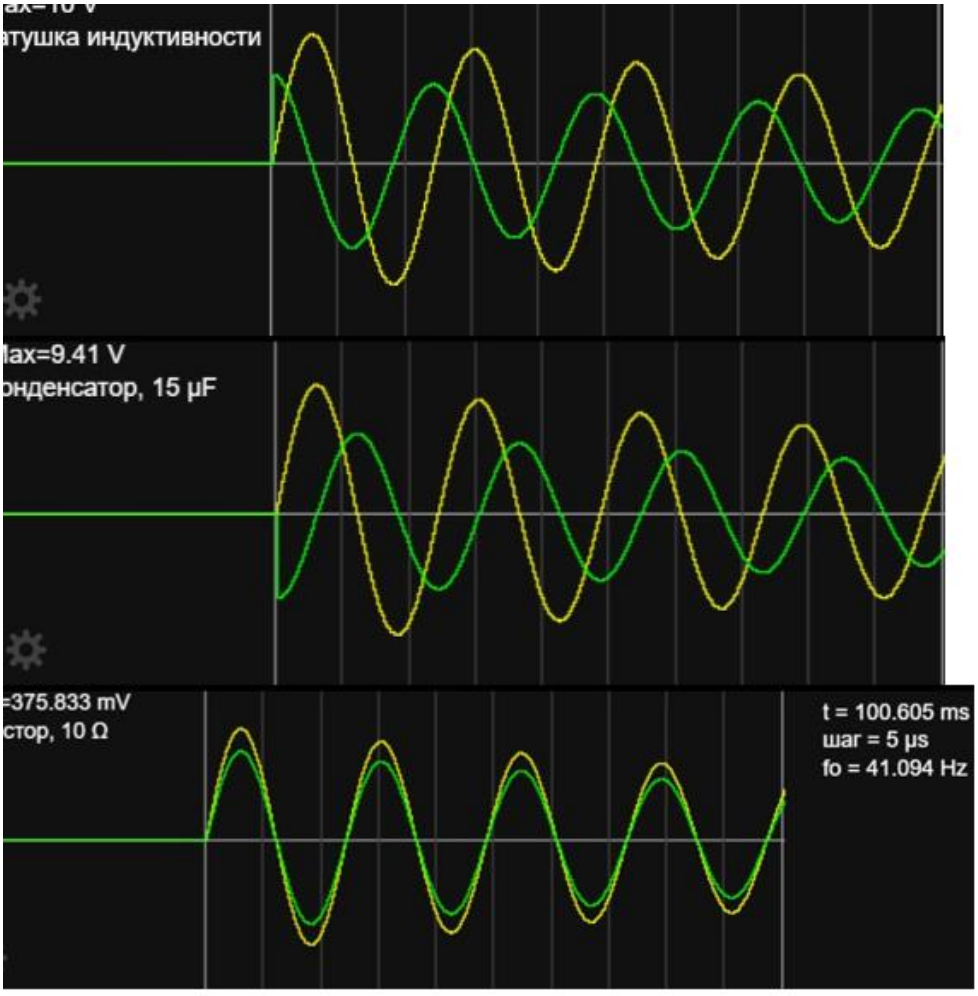
Лабораторна робота № 7

Визначення параметрів пасивних компонентів мікроелектроніки

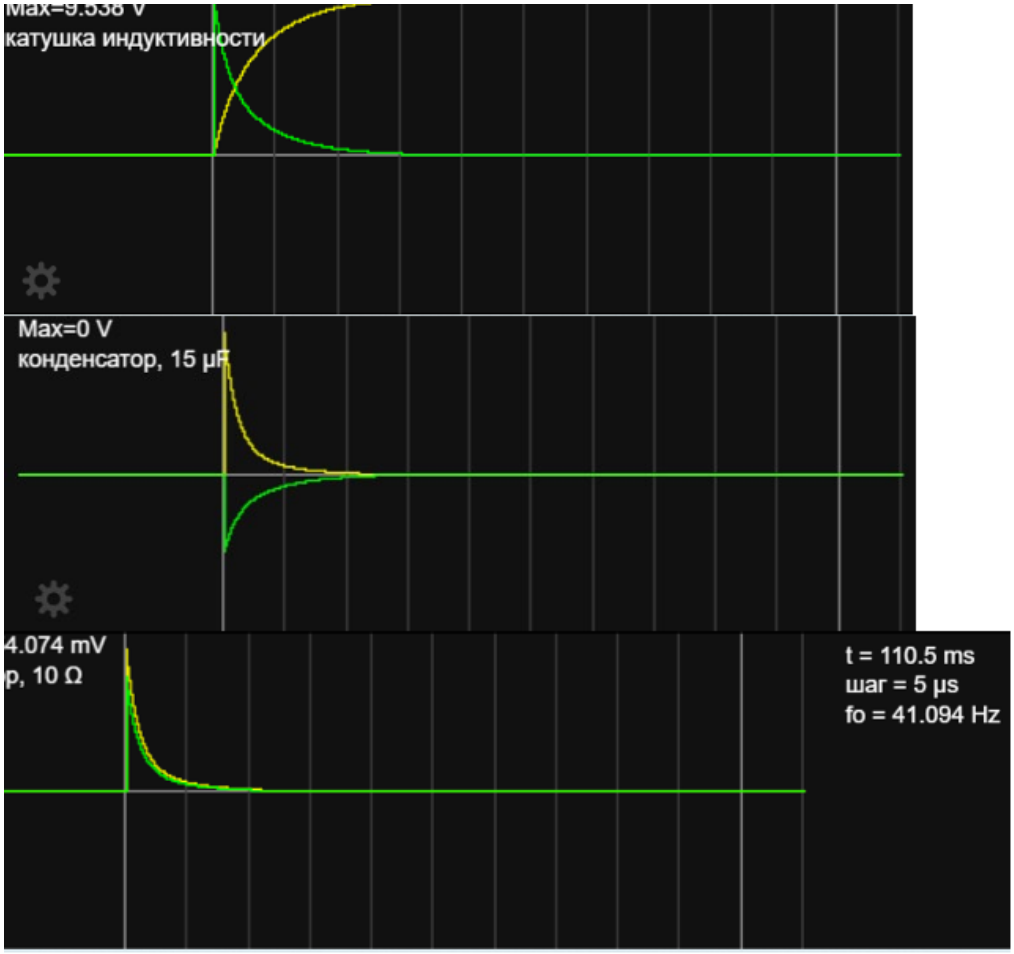
Метою виконання роботи є дослідити вплив вхідного сигналу на параметри пасивних компонентів

Хід виконання лабораторної роботи

1. Відкрити симуляцію https://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html
2. Визначити мінімальне та максимальне значення опору, ємності конденсатора та індуктивності котушки електричної схеми при постійному вхідному сигналі.
3. Замалювати форму сигналу.



4. Замкнути електричне коло, підключивши опір 100 Ом.
5. Визначити параметри елементів схеми, замалювати форму сигналу.
6.



7. Розрахувати потужність при мінімальному та максимальному значенні струму і напруги.
8. Змінюючи форму вхідного сигналу, повторити пункти 2-5.

Після отримання результатів необхідно написати висновок та захистити роботу.

Приклад тестових завдань контролю знань студентів

Модуль1. Напівпровідникові діодні структури

1. Яке фізичне явище називається генерацією?

Зникнення пари електрон-дірка в напівпровіднику
Виникнення пари електрон-дірка в напівпровіднику
Створення нейтрального атому
Розрив ковалентних зв’язків
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

3. Яке фізичне явище називається рекомбінацією?

Створення збиткової концентрації в напівпровіднику
Створення нейтрального атомуВиникнення нерівноважних носіїв заряду
Перехід електронів в заборонену зону
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

3. Що називається базою діода?

Відстань від p-n переходу до омічного контакту
Область простінкового заряду
p-n перехід
Відстань від технологічного контакту до виводу
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

4. Як змінюється диференційований опір зі збільшенням сили струму?
Збільшується
Зменшується
Не змінюється
Спочатку збільшується, потім зменшується
Спочатку зменшується, потім збільшується
Тут немає правильної відповіді

5. Як змінюється диференційований опір з підвищенням температури?
збільшується
зменшується
Не змінюється
Спочатку збільшується, потім зменшується
Спочатку зменшується, потім збільшується

Тут немає правильної відповіді

6. Як змінюється диференційований опір зі збільшенням частоти?
збільшується
зменшується
Не змінюється
Спочатку збільшується, потім зменшується
Спочатку зменшується, потім збільшується
Тут немає правильної відповіді

7. Скільки методів використовується для визначення диференціального опору?
1
2
3
4
5
6

8. Як підключити вольтметр у електричне коло відносно діоду?
Між діодом та амперметром
Паралельно
Послідовно
Після амперметру
Перед діодом
Інша відповідь

9. Як побудувати графік вольт-амперної характеристики в напівлогарифмічному масштабі?
По вісі абсцис відкладати lgU, по вісі ординат lgI
По вісі абсцис U, по вісі ординат lgI
По вісі абсцис відкладати lgU, по вісі ординат I
По вісі абсцис відкладати lgI, по вісі ординат lgU
По вісі абсцис відкладати U, по вісі ординат lgI
По вісі абсцис відкладати U, по вісі ординат I

10. В яких одиницях вимірюється електрична ємність?
Канделах
Фарадах
Теслах
Кулонах
Барах
Інша відповідь

11. Як змінюється зі збільшенням площі p-n переходу бар'єрна ємність?

збільшується
зменшується
Не змінюється
Спочатку збільшується, потім зменшується
Спочатку зменшується, потім збільшується
Інша відповідь

12. Яка швидкодія у тунельного діода?
10^{-1}-10^{-2} с
10^{-2}-10^{-3} с
10^{-3}-10^{-5} с
10^{-4}-10^{-5} с
10^{-5}-10^{-6} с
10^{-6}-10^{-7} с

13. Як підключити діод в прямому напрямку?
+ на n область, - на p область
- на n область, + на p область
+ на n область, + на p область
- на n область, - на p область
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

14. Як підключити діод в зворотньому напрямку?
+ на n область, + на p область
- на n область, - на p область
+ на n область, - на p область
- на n область, + на p область
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

15. Які носії заряду називаються нерівноважними?
Електрони в n-напівпроводнику
Дірки в n-напівпроводнику
Електрони і дірки створені під дією зовнішнього фактору
Нейтральні атоми
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

16. За скількома ознаками визначають діоди з короткою та довгою базою?
1
2
3
4
7

10

17. Скільки типів пробоїв виникає в діодах?
1
2
3
4
5
6

18. Який тип пробою характерний для широкозонних напівпровідників?
Тунельний
Лавинний
Тепловий
Змикання p-n переходів
Вторинний
Інша відповідь

19. Що є причиною виникнення теплового пробою?
Різке збільшення температури
Різке збільшення прямої напруги
Різке збільшення зворотньої напруги
Різке збільшення струму
Інша відповідь
Немає правильної відповіді

20. Як змінюється ОПЗ при підключенні діода в зворотньому напрямку?
Зменьшується
Не змінюється
Збільшується
Спочатку збільшується потім зменьшується
Спочатку зменьшується потім збільшується
Немає правильної відповіді

Для тестування знань студентів використовуються програмне забезпечення, створене за допомогою мови програмування рівня Delphi 7

Для тестування розроблені та використовуються питання для інших модулів контролю знань:
Модуль 2. НВЧ діодні структури.
Модуль 3. Біполярні транзистори.
Модуль4. МОН та МДН-транзистори.

Література, інформаційні джерела

Перелік використаної літератури

1. Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю. Твердотільна електроніка : метод. вказівки до практ. занять з дисципліни «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2018. 35 с.
2. Ніконова З. А. Твердотільні компоненти мікро– та наноелектроніки : конспект лекцій «Твердотільні компоненти мікро– та наноелектроніки» для студентів спец. 153 «Мікро– та наносистемна техніка». Запоріжжя : ІННІ ЗНУ, 2020. 95 с.
3. Ніконова З. А. Твердотільна електроніка. Інтерактивний лабораторний практикум з твердотільної електроніки. Запоріжжя : 2013. 95 с.
4. Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю., Ніконова А. О. Твердотільна електроніка : навч. посіб. до курс. проекту з дисципліни «Твердотільна електроніка». Запоріжжя : 2011. 100 с.
5. Ніконова З. А., Небеснюк О. Ю. Твердотільна електроніка : конспект лекцій «Твердотільна електроніка». Запоріжжя : 2014. 95 с.

Перелік рекомендованої літератури

1. Філяшкін М. К. Мікроелектронні інформаційні системи : навч. посіб. Київ : НАУ, 2019. 276 с.
2. Бутенко Т. А., Сирий В. М. Інформаційні системи та технології : навч. посіб. Харків : ХНАУ ім. В. В. Докучаєва, 2020. 207 с.
3. Розорінов Г. М, Соловйов Д. О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв’язку : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і допов. Київ : Кафедра, 2020. 344 с.
4. Інформаційні системи та технології : підручник / за заг. ред. В. Б. Вишні. Дніпро : Дніпропетров. держ. ун-т внутр. справ, 2021. 280 с.
5. Методологія інформаційних систем та баз даних: теоретичний і практичний підходи : навч. посіб. / уклад. Ю. О. Ушенко. Чернівці : ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 240 с.
6. Баранський П. І. Напівпровідникова електроніка : довідник. Київ : Наукова думка, 2018. 358 с.
7. Матвійків М. Д. Елементна база електронних апаратів : підручник. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2017. 428 с.
8. Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А. Мікроелектронний діагностично-терапевтичний комплекс для рефлексотерапії. *International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects*. Tbilisi, Georgia : Georgian Aviation University, 2023. С. 873-889.

9. Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А., Тимошенко А. В. Розробка моделі комплексу для контролю параметрів напівпровідникових структур. *Modern research in world science : Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine, 29-31 January 2023*. Львів : SPC “Sci-conf.com.ua”, 2023. С. 463-467.
10. Ніконова З. А., Бондаренко М. О., Гурін М. Р. Розробка дистанційного аналізатора повітря. *Modern research in world science : Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine, 29-31 January 2023*. Львів : SPC “Sci-conf.com.ua”, 2023. С. 347-351.
11. Ніконова З. А., Небеснюк В. О. Розпізнавання математичних виразів в графічному представленні даних. *Modern research in world science : Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine, 29-31 January 2023*. Львів : SPC “Sci-conf.com.ua”, 2023. С. 413-417.
12. Ніконова З. А., Ніконова А. О., Марченко І. С. Мікроелектронна охоронна система. *Modern research in world science : Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference, Lviv, Ukraine, 29-31 January 2023*. Львів : SPC “Sci-conf.com.ua”, 2023. С. 404-409.
13. Ніконова З. А., Небеснюк В. О., Рябко Д. В. Electrical stimulation in diagnosis and treatment of eye pathology. *The 1st International scientific and practical conference “Modern problems of science, education and society”*. Київ : SPC “Sci-conf.com.ua”, 2023. С. 246-249.
14. Перловський О. М., Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А. Модуль телеметричного каналу даних для ЕКГ– телеметрії. *І Международная научно-практическая конференция «TOPICAL ISSUES OF MODERN SCIENCE, SOCIETY AND EDUCATION»*. Харків : SPC ―Sci-conf.com.ua, 2021. С. 277-283.
15. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки : навч. посіб. / уклад.: П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола та ін. Львів : Магнолія, 2019.225 с.
16. Готра З. Ю. Фізичні основи електронної техніки : підручник. Львів : Бескид Біт, 2019. 111 с.

Перелік інформаційних джерел

1. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: https://library.znu.edu.ua (дата звернення: 01.04.2026).
2. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: https://moodle.znu.edu.ua/course/view.php?id=8576 (дата звернення: 01.04.2026).
3. Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66 (дата звернення: 01.04.2026).
4. Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Радіотехнічний факультет.

URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/61(дата звернення: 01.04.2026).
5. Інституційний репозитарій Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя. URL: http://ehttps://elartu.tntu.edu.ua (дата звернення: 01.04.2026).

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Ніконова Зоя Андріївна,
Небеснюк Оксана Юріївна

ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

Методичні рекомендації до лабораторних занять
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності
G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
освітньо-професійної програми
«Мікро- та наносистемна техніка»

Рецензент *В. Л. Коваленко*
Відповідальний за випуск *Т. В. Критська*
Коректор *О. Ю. Небеснюк*