

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни «Електронний захист»  
для студентів денної форми навчання  
спеціальності «Електроніка, електронні комунікації,  
приладобудування та радіотехніка»  
Частина 1

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою,  
протокол №2 від 26.06.2025 р.

Харків  
НТУ «ХП»  
2025

**Методичні вказівки** до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електронний захист» для студентів денної форми навчання за спеціальністю «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» Частина 1 / уклад.: Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко, К.О. Мінакова, А.І. Доброжан. – Харків: НТУ «ХП», 2025. – 85 с.

Укладачі: Р.В. Зайцев,  
М.В. Кіріченко,  
К.О. Мінакова,  
А.І. Доброжан

Рецензент проф. Г.С. Хрипунов

Кафедра мікро- та наноелектроніки

## ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з розділів «Дослідження властивостей і параметрів напівпровідникових структур за їх темновими вольт-амперними та амплітудно-часовими характеристиками», «Дослідження властивостей і параметрів напівпровідникових структур за їх вольт-фарадними характеристиками» й «Методи дослідження параметрів фотоелектричних перетворювачів» дисципліни «Фізичні властивості та сучасні методи дослідження мікро- та нанорозмірних напівпровідникових структур» стосуються чотирьох лабораторних робіт: «Визначення електронних параметрів діодних структур з анізотипним й ізотипним гомопереходами за їх темновими вольт-амперною та вольт-фарадною характеристиками», «Визначення часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в опромінюваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах», «Дослідження впливу умов опромінювання та магнітного поля на фотострум і вихідні параметри багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комірками», «Визначення області переважної рекомбінації в багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах з вертикальними діодними комірками за коефіцієнтом ідеальності їх діодної структури».

Діодні напівпровідникові структури (ДНС) є базовими для більшості мікро- та наноелектронних приладів і пристроїв, серед яких вкрай затребуваними є, наприклад, фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) сонячної енергії. Їх практично важливі вихідні параметри суттєво залежать від часу життя і дифузійної довжини нерівноважних неосновних носіїв заряду (ННЗ), пов'язаних переважно з рекомбінаційними процесами усередині ДНС, та від швидкості поверхневої рекомбінації ННЗ. Тому дослідження цих електронних параметрів і рекомбінаційних процесів, а також можливості керованого впливу на них зовнішніх факторів (наприклад, опромінювання і магнітного

поля), є вкрай актуальним. Запропоновані чотири лабораторні роботи забезпечують комплексне практичне ознайомлення студента з сучасними, досить інформативними і доступними за реалізацією методами відповідних досліджень.

Після вивчення теоретичної частини та отримання індивідуального завдання, яке визначає викладач, студент має приступати до виконання кожної лабораторної роботи згідно з пунктом “Порядок дій”. По завершенню роботи студент складає звіт, зміст якого визначено у відповідному пункті, та захищає його, відповідаючи на запитання викладача.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальностей фізико-технічного і метрологічного профілів університетів.

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДНИХ СТРУКТУР  
З АНІЗОТИПНИМ Й ІЗОТИПНИМ ГОМОПЕРЕХОДАМИ  
ЗА ЇХ ТЕМНОВИМИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЮ ТА ВОЛЬТ-ФАРАДНОЮ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Мета роботи – навчитися визначати час життя нерівноважних неосновних носіїв заряду (ННЗ) у анізотипному р-п гомопереході монокристалічних приладових діодних структур, що входять до складу, наприклад, кремнієвих фотоелектричних перетворювачів, та швидкість поверхневої рекомбінації ННЗ з боку ізотипного гомопереходу на границі їх базової області й омичного контакту за результатами вимірювання і аналітичного опрацювання темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик.

**1.1 Загальні відомості**

**1.1.1 Місце діодних структур з анізотипним й ізотипним переходами у виробках сучасної електронної техніки**

Базовими об'єктами сучасної електроніки є переважно приладові напівпровідникові структури з декількох спряжених шарів, що мають різні електрофізичні характеристики і геометрію, та хоча б одному з них притаманні мікронні або субмікронні розміри, наприклад, стосовно товщини [1-3]. На основі зазначених приладових структур, до складу яких входять монокристалічні шари, вже зараз існує багато виробів електронної техніки, котрі ключовим чином сприяють життєздатності й подальшому розвитку багатьох провідних галузей розвинутих країн. До таких виробів належать, наприклад, тиристори, транзистори, світлодіоди, напівпровідникові лазери, фотодіоди, фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії та інші. Їхні

шарові структури утворюють один або декілька анізотипних випрямляючих гомо- чи гетеропереходів ( $p-n$ ,  $n-p$  або  $p-n-p$ ,  $n-p-n$ ,  $p-n-p-n$ ...,  $n-p-n-p$ ...) та ізотипні переходи ( $p-p^+$ ,  $n-n^+$ ), котрі використовуються, наприклад, для спрощення технології виготовлення омичних контактів. Серед деяких зазначених виробів є різновиди з випрямляючими переходами на основі бар'єрів Шоттки, що утворюються при контакті напівпровідникового шару  $p$ - чи  $n$ -типу провідності з металом, який підбирається для цього згідно зі спеціальними критеріями, існуючими у фізиці напівпровідників і напівпровідникових приладів. Але до складу й цих виробів зазвичай входить не менше двох спряжених напівпровідникових шарів для реалізації вищезгаданого ізотипного переходу. Тому тематика, мета та задачі цієї й решти трьох лабораторних робіт, до яких укладено методичні вказівки, є вкрай актуальними з точки зору практичної підготовки фахівців відповідної спеціальності.

### **1.1.2 Фізичні передумови можливості визначення досліджуваних електронних параметрів зазначених діодних структур за їх темновими вольт-амперною і вольт-фарадною характеристиками**

Можливість визначення часу життя  $\tau_{HHZ}$  нерівноважних неосновних носіїв заряду у анізотипному  $p-n$  гомопереході монокристалічних приладових діодних структур та швидкості  $S_{HHZ}$  поверхневої рекомбінації HHZ з боку ізотипного гомопереходу на границі їх базової області й омичного контакту за темновими вольт-амперною характеристикою (ВАХ) та вольт-фарадною характеристикою (ВФХ) впливає з наступного.

Відповідно до [4, 5] ці параметри є ключовими складовими у співвідношенні, що аналітично описує у двохдіодному наближенні темнову ВАХ таких діодних структур з тонкою базою ( $X/L < 1$  – пояснення щодо  $X$  і  $L$  наведено нижче) при їх зміщенні у прямому напрямку. Вказане співвідношення має вигляд:

$$I = I_{D1} + I_{D2} + I_{Ш} = I_{01} \left[ \exp \frac{q_e (U - IR_{П})}{A_1 kT} - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp \frac{q_e (U - IR_{П})}{A_2 kT} - 1 \right] + \frac{U}{R_{Ш}}, \quad (1.1)$$

де у випадку діодної структури, наприклад,  $n^+p$  типу, яка з боку  $p$ -бази має тиловий омичний контакт:

$$I_{01} = J_{01} S = \left[ \frac{q_e D_n n_i^2}{L_n N_A} \right] \cdot \left[ \operatorname{sh} \left( \frac{X_p}{L_n} \right) + \frac{S_n L_n}{D_n} \operatorname{ch} \left( \frac{X_p}{L_n} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{X_p}{L_n} \right) + \frac{S_n L_n}{D_n} \operatorname{sh} \left( \frac{X_p}{L_n} \right) \right]^{-1} S, \quad (1.2)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{kT \mu_n \tau_n / q_e}, \quad (1.3)$$

$$I_{02} = J_{02} S = \frac{q_e n_i W}{2 \tau_i} S, \quad (1.4)$$

$I$  – повний струм у діодній структурі;  $I_{D1}$  – дифузійна компонента діодного струму;  $I_{D2}$  – рекомбінаційна компонента діодного струму;  $I_{Ш}$  – компонента струму у діодній структурі, обумовлена її шунтувальним опором  $R_{Ш}$ ;  $U$  – напруга на діодній структурі;  $I_{01} = J_{01} S$ ;  $I_{02} = J_{02} S$ ;  $J_{01}$  – густина дифузійної компоненти діодного струму насичення;  $J_{02}$  – густина рекомбінаційної компоненти діодного струму насичення;  $S$  – площа  $n^+p$  переходу;  $q_e$  – абсолютне значення заряду електрона;  $A_1 = 1$ ;  $A_2 = 2$ ;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $R_{П}$  – послідовний опір діодної структури;  $n_i$  – концентрація електронів у випадку власної провідності напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлено діодну структуру;  $N_A$  – концентрація повністю іонізованої простої акцепторної домішки у  $p$ -базі;  $X_p$  – товщина  $p$ -бази;  $W$  – ширина області збіднення  $n^+p$  переходу;  $L_n$  – дифузійна довжина НЗ - електронів у  $p$ -базі;  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів у  $p$ -базі;  $\mu_n$  – рухливість електронів у  $p$ -базі;  $\tau_n$  – час їх життя у  $p$ -базі;  $\tau_i$  – час життя НЗ у  $n^+p$  переході;  $S_n$  – швидкість поверхневої рекомбінації НЗ - електронів з боку тилового омичного контакту; для діодної структури  $p^+n$  типу  $N_A$  у співвідношенні (1.2)

має бути замінено на  $N_D$  - концентрація повністю іонізованої простої донорної домішки у  $n$ -базі, а нижні індекси « $n$ » і « $p$ » у співвідношеннях (1.2) та (1.3) мають бути зміненими на « $p$ » і « $n$ ».

Згідно з [5, 6]  $\tau_{n,p}$  - час життя ННЗ у базі таких діодних структур може бути порівняно просто визначено за спадом напруги (так званої – післяінжекційної електрорушійної сили) на діоді після раптового припинення дії на нього джерела інжекції ННЗ в напрямку бази. Але для визначення часу життя ННЗ саме у анізотипному переході та швидкості їх поверхневої рекомбінації з боку омічного тилового контакту необхідно експериментально досліджувати і аналітично опрацьовувати темнову ВАХ, використовуючи наведені вище співвідношення.

Задача з визначення величини  $S_{ННЗ}$  лише за темною ВАХ діодних структур, про які йшлося вище, вирішується без зайвих ускладнень у випадку, коли

$$0,01 < \frac{S_{n,p} L_{n,p}}{D_{n,p}} < 100, \quad (1.5)$$

який є найбільш практично поширеним. Відповідно до [5] при виконанні подвійної нерівності (1.5) співвідношення (1.2) суттєво спрощується і для діодної структури  $n^+p$  типу приймає стосовно  $J_{01}$  вигляд:

$$J_{01} \approx \frac{q_e n_i^2 S_n}{N_A}, \quad (1.6)$$

котрий за зазначеною вище технікою маніпулювання нижніми індексами при  $S$  й  $N$  легко пристосовується і до випадку діодної структури  $p^+n$  типу, яка з боку  $n$ -базиса має тильовий омічний контакт. Таким чином, для знаходження електронного параметру  $S_{ННЗ}$  достатньо за експериментальною темною ВАХ визначити величину

$$J_{01} = I_{01}/S, \quad (1.7)$$

після чого шуканий параметр розраховується за формулою:

$$S_{n,p} \approx \frac{J_{01} N_{A,D}}{q_e n_i^2}, \quad (1.8)$$

де використовувані величини  $N_{A,D}$  та  $n_i$  мають бути заздалегідь відомими для досліджуваної діодної структури. Наприклад, для монокристалічних кремнієвих приладових діодних структур ці величини в залежності відповідно від питомого опору  $\rho$  і температури кремнію наведено у [4].

У випадках, коли приладові діодні структури поряд з анізотипним переходом мають ізотипний перехід (діодні структури  $n^+ - p - p^+$  та  $p^+ - n - n^+$  типу) відповідно до [5] величина  $S_{HHZ}$  зменшується у порівнянні з її значенням за відсутністю ізотипного переходу і визначається співвідношенням:

$$S_{n,p}^+ \approx \frac{S_{n,p} N_{A,D}}{N_{A,D}^+}, \quad (1.9)$$

де:  $N_{A,D}^+$  - концентрація простої акцепторної або донорної домішки у сильно легованому шарі ізотипного переходу.

Враховуючи співвідношення (1.9), легко показати, що для приладових  $n^+ - p - p^+$  та  $p^+ - n - n^+$  діодних структур співвідношення (1.8) перетворюється у таке:

$$S_{n,p}^+ \approx \frac{J_{01} N_{A,D}^2}{q_e n_i^2 N_{A,D}^+}. \quad (1.10)$$

Як впливає зі співвідношення (1.4), для визначення  $\tau_i$  – часу життя ННЗ у анізотипному переході - окрім визначення за експериментальною темною ВАХ величини  $I_{02}$  необхідно знати чисельне значення параметру  $W$ , котре можна експериментально визначити за темною ВФХ досліджуваної діодної структури. Відповідно до [4] цей параметр пов'язаний з її бар'єрною ємністю співвідношенням:

$$C(U) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{W(U)}, \quad (1.11)$$

де:  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність напівпровідникового матеріалу;  $U$  – постійна складова вимірювальної напруги на діодній структурі, яка за полярністю відповідає зворотному зміщенню анізотипного випрямляючого переходу.

Зі співвідношення (1.11) випливає, що параметр  $W$  може бути знайдено за результатами вимірювання темної ВФХ досліджуваної діодної структури за формулою:

$$W(U) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C(U)}. \quad (1.12)$$

Знайдене таким чином чисельне значення  $W$  надає можливість визначення  $\tau_i$  використовуючи рішення співвідношення (1.4) стосовно цього шуканого параметру при  $U = 0$ , яке має вигляд:

$$\tau_i = \frac{q_e n_i W_0}{2J_{02}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon q_e n_i S}{2I_{02} C_0}, \quad (1.13)$$

де:  $W_0$  і  $C_0$  – відповідно значення  $W$  і  $C$  досліджуваної діодної структури при  $U = 0$ .

## **1.2 Вимірювання і аналітичне опрацювання темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик**

### **1.2.1 Вимірювання темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик**

Техніка вимірювання статичної й динамічної темнових ВАХ двополюсників, до яких належать і діодні напівпровідникові структури, що розглядаються у цій лабораторній роботі, досить докладно викладена у методичних вказівках до попередніх лабораторних робіт [7, 8], де йшлося про методи визначення питомого опору базового напівпровідникового матеріалу для приладових структур та їх діодних параметрів. Вона має бути практично опанованою при виконанні зазначених лабораторних робіт, котрі згідно з навчальною програмою відповідної дисципліни виконуються до цієї лабораторної роботи. Між тим, щодо останньої, необхідно прийняти до уваги наступне.

Для вимірювання як статичної, так і динамічної темнових ВАХ застосовуються: у першому випадку – метод амперметра-вольтметра на постійному струмі, у другому випадку – метод характеристографа на змінному струмі. У цій лабораторній роботі останній використовується для початкової візуалізації темної ВАХ досліджуваної діодної структури, що дозволяє експресно визначити область безпечних режимів (ОБР) [6] її функціонування за силою струму  $I$  і величиною напруги  $U$ . Після визначення ОБР у діапазоні безпечних значень  $I$  і  $U$  здійснюється детальне вимірювання статичної темної ВАХ діодної структури у прямому ( $U > 0$ ) та зворотному ( $U < 0$ ) напрямках методом амперметра-вольтметра на постійному струмі. Саме її подальше аналітичне опрацювання надає можливість визначення зазначених у меті роботи електронних параметрів досліджуваної діодної структури.

Техніка вимірювання темної ВФХ діодної структури також докладно викладена у методичних вказівках до однієї з лабораторних робіт [9], котра згідно з навчальною програмою відповідної дисципліни передусім цій лабораторній роботі і має бути практично опанованою при виконанні зазначеної попередньої лабораторної роботи.

### 1.2.2 Аналітичне опрацювання вимірних темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик

Для вирішення задачі цієї лабораторної роботи з визначення електронних параметрів  $\tau_{HH3}$  і  $S_{HH3}$  аналітичне опрацювання вимірної статичної темної ВАХ необхідно починати зі встановлення величин послідовного й шунтувального опорів досліджуваної діодної структури, які входять до співвідношення (1.1), оскільки оперування кількісними значеннями цих діодних параметрів є необхідною передумовою стосовно можливості визначення  $J_{01}(S_{HH3})$  й  $J_{02}(\tau_{HH3})$  на наступній стадії аналітичного опрацювання статичної темної ВАХ за співвідношенням (1.1). Між тим, визначення величин  $R_{II}$  та  $R_{III}$  шляхом аналітичного опрацювання прямої гілки темної ВАХ за співвідношенням (1.1) пов'язане з невиправданими ускладненнями. Тому більш раціональним є встановлення величин зазначених діодних параметрів шляхом аналітичного опрацювання вимірної статичної темної ВАХ у одnodіодному наближенні, відповідно до якого вона аналітично описується співвідношенням [8]:

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{q_e (U - IR_{II})}{AkT} - 1 \right] + \frac{U}{R_{III}}, \quad (1.14)$$

де:

$$A_1 \leq A \leq A_2; \quad (1.15)$$

$$I_0 = C_1 I_{01} + C_2 I_{02}; \quad (1.16)$$

$A$  – коефіцієнт ідеальності діода;  $I_0$  – сила діодного струму насичення;  $C_1$  і  $C_2$  – вагові коефіцієнти внесків величин  $I_{01}$  і  $I_{02}$ , відповідно, до величини  $I_0$ .

Досить прості методи аналітичного опрацювання у однодіодному наближенні за співвідношенням (1.14) зворотної гілки темної ВАХ (при  $U < 0$ ) для визначення  $R_{III}$  і її прямої гілки (при  $U > 0$ ) для визначення  $R_{II}$  викладено у [8]. Однак, треба мати на увазі, що визначення величини  $R_{II}$  здійснюється за методикою, викладеною у [8], при аналітичному опрацюванні не самої експериментально вимірної прямої гілки ВАХ, а її складової, яка не залежить від  $R_{III}$ . Останню може бути легко виділено аналітично (застосовуючи існуюче належне програмне забезпечення) або графічно з експериментально вимірної прямої гілки ВАХ, що описується співвідношенням (1.14), шляхом операції:

$$I_d(U) = I(U) - I_{III}(U) = I(U) - \frac{U}{R_{III}}, \quad (1.17)$$

де:  $I_{III}$  – сила струму у шунтувальному опорі.

Тобто, ця операція зводиться до віднімання ординат лінійної функції  $I_{III}(U)$  від ординат функції  $I(U)$  при усіх значеннях  $0 < U < \varphi_d$  [4, 5], де  $\varphi_d$  – дифузійний потенціал, який для діодних структур з анізотипним гомопереходом не перевищує величини  $E_g/q_e$ , а  $E_g$  – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу діодної структури.

Акцентована вище операція є актуальною не тільки стосовно правильного визначення величини  $R_{II}$ , але й для можливості подальшого визначення величин  $J_{01}(S_{HHZ})$  і  $J_{02}(\tau_{HHZ})$ , оскільки

$$I_d(U) = I_{d1}(U) + I_{d2}(U), \quad (1.18)$$

а це співвідношення є неявною формою опису відповідної компоненти сили струму у співвідношенні (1.1) в залежності від  $U$ . При переході до явної форми опису залежності  $I_D$  від  $U$  у двохдіодному наближенні співвідношення (1.18) перетворюється у таке:

$$I_D(U) = I_{D1}(U) + I_{D2}(U) = I_{01} \left[ \exp \frac{q_e(U - I_D R_{II})}{A_1 k T} - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp \frac{q_e(U - I_D R_{II})}{A_2 k T} - 1 \right]. \quad (1.19)$$

Згідно з [5] при

$$0 < U < \varphi_d \quad (1.20)$$

темнова ВАХ, що описується співвідношенням (1.19), має вигляд у напівлогарифмічних координатах  $(\lg I_D, U - I_D R_{II})$ , схематично показаний на рисунку 1.1.

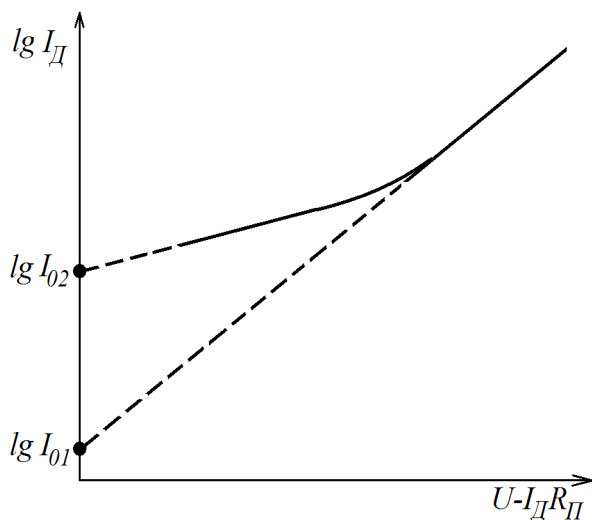


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення темної ВАХ при  $0 < U < \varphi_d$ , яка описується співвідношенням (1.19)

Відповідно до [5], наприклад, у випадку монокристалічних кремнієвих діодних структур  $n^+ - p - p^+$  або  $p^+ - n - n^+$  типу при  $3kT/q_e \leq U < 15kT/q_e$  має місце нерівність  $I_{D2} \gg I_{D1}$ , у зв'язку з чим

$$I_D \left( \frac{3kT}{q_e} \leq U \leq \frac{15kT}{q_e} \right) \approx I_{D2} \left( \frac{3kT}{q_e} \leq U \leq \frac{15kT}{q_e} \right) = I_{02} \left[ \exp \frac{q_e (U - I_D R_{II})}{A_2 kT} - 1 \right], \quad (1.21)$$

а при  $15kT/q_e < U \leq 25kT/q_e$  має місце нерівність  $I_{D1} \gg I_{D2}$ , у зв'язку з чим

$$I_D \left( \frac{15kT}{q_e} \leq U \leq \frac{25kT}{q_e} \right) \approx I_{D1} \left( \frac{15kT}{q_e} \leq U \leq \frac{25kT}{q_e} \right) = I_{01} \left[ \exp \frac{q_e (U - I_D R_{II})}{A_1 kT} - 1 \right]. \quad (1.22)$$

Оскільки при  $U > 3kT/q_e$  одиницею у фігурних дужках виразів (1.21) і (1.22) можна знехтувати, то після логарифмування цих виразів десятковим логарифмом для вказаних значень  $U$  маємо

$$\begin{aligned} \lg \left[ I_D \left( \frac{3kT}{q_e} \leq U \leq \frac{15kT}{q_e} \right) \right] &\approx \lg \left[ I_{D2} \left( \frac{3kT}{q_e} \leq U \leq \frac{15kT}{q_e} \right) \right] = \\ &= \lg I_{02} + \left[ \frac{q_e (U - I_D R_{II})}{A_2 kT} \right] \lg e, \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} \lg \left[ I_D \left( \frac{15kT}{q_e} \leq U \leq \frac{25kT}{q_e} \right) \right] &\approx \lg \left[ I_{D1} \left( \frac{15kT}{q_e} \leq U \leq \frac{25kT}{q_e} \right) \right] = \\ &= \lg I_{01} + \left[ \frac{q_e (U - I_D R_{II})}{A_1 kT} \right] \lg e, \end{aligned} \quad (1.24)$$

де:  $e$  – основа натурального логарифму.

З виразів (1.23) і (1.24) виходить, що величини  $I_{01}$  і  $I_{02}$  можуть бути визначені шляхом екстраполяції двох похилих прямолінійних гілок 1 і 2

зображеного на рисунку 1.1 графіка до їхніх перетинів з віссю  $\lg I_D$  при  $U - I_D R_{II} = 0$ .

Для гарантованої мінімізації похибки визначення величини  $C_0$  цей параметр необхідно визначати не шляхом його безпосереднього вимірювання, а за експериментальною темною ВФХ, виміряною при  $U \leq 0$  і перебудованою, як показано на рисунку 1.2, у координатах  $(C^{-\xi}, U)$ , де  $\xi = 2$  у випадку різкого анізотипного гомопереходу [6, 9] і  $\xi = 3$  у випадку плавного анізотипного гомопереходу [6]. При цьому шукана величина  $C_0$  є ординатою точки перетину осі ординат похилим прямолінійним відрізком, показаним на рисунку 1.2

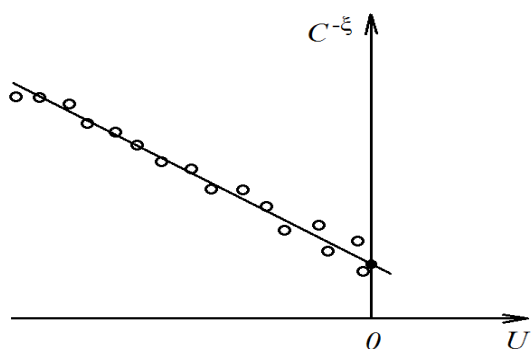


Рисунок 1.2 – Вигляд темної ВФХ діодної структури з анізотипним гомопереходом у координатах  $(C^{-\xi}, U)$ , де точки відповідають експериментальним значенням  $C$  і  $U$ , а похилий відрізок – результат їх усереднення за методом найменших квадратів

### 1.3 Порядок виконання роботи

#### 1.3.1 Завдання для виконання роботи

Послідовно, спочатку за допомогою промислового характерографу, а потім лабораторного стенду для виміру статичних вольт-амперних характеристик і промислового приладу для виміру вольт-фарадних характеристик визначити область безпечних режимів (ОБР) функціонування досліджуваного зразка (наприклад, ФЕП) з монокристалічною кремнієвою діодною структурою  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  типу за силою струму  $I$  і величиною напруги  $U$ , після чого у межах цієї ОБР при прямому ( $U > 0$ ) й зворотному ( $U < 0$ ) напрямках напруги виміряти його статичну темнову ВАХ, а при  $U \leq 0$  - його

темнову ВФХ. За отриманими результатами, користуючись відповідними методами аналітичного опрацювання експериментальних темнових ВАХ і ВФХ, викладеними у пункті 1.2.2, визначити час життя нерівноважних неосновних носіїв заряду у анізотипному  $n^+(p^+)-p(n)$  гомопереході та швидкість їх поверхневої рекомбінації з боку ізотипного гомопереходу  $p(n)-p^+(n^+)$  на його границі з металевим електродом досліджуваного зразка. Усі необхідні для виконання завдання розрахунки і побудову відповідних до них графіків рекомендується виконувати за допомогою програми електронних таблиць.

### 1.3.2 Порядок дій

1. За допомогою наданих інструкцій, котрі знаходяться на робочих місцях біля відповідного вимірювального устаткування, ознайомитись з особливостями використання:

1) промислового характерографа для виміру динамічних вольт-амперних характеристик;

2) лабораторного стенду для виміру статичних вольт-амперних характеристик;

3) промислового приладу для виміру вольт-фарадних характеристик.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного вимірювального устаткування підключити його до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача досліджуваний зразок (наприклад, ФЕП) з монокристалічною кремнієвою діодною структурою  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  типу і вихідні дані щодо її параметрів  $S$ ,  $N_{A,D}$ ,  $N_{A,D}^+$ ,  $\varphi_d$ .

4. За допомогою наданого у використання контактної пристрою підключити зразок до характерографа і визначити область безпечних режимів його функціонування за силою струму  $I$  і величиною напруги  $U$ .

5. Користуючись тим же контактним пристроєм, підключити зразок до лабораторного стенду для виміру статичних вольт-амперних характеристик методом амперметра-вольтметра на постійному струмі та у визначеному діапазоні безпечних значень  $I$  і  $U$  здійснити вимірювання статичної темної ВАХ зразка у прямому ( $U > 0$ ) та зворотному ( $U < 0$ ) напрямках напруги на ньому, змінюючи цю напругу з кроком  $\Delta U$ , запропонованим викладачем.

6 Відповідно до [7] при застосуванні вказаного лабораторного стенду величини  $U$  та  $I$  визначаються за формулами:

$$U = U_K - U_C, \quad (1.25)$$

$$I = I_C = U_C / R_C, \quad (1.26)$$

де:  $U_K$  – напруга, що подається у вимірювальне коло від джерела живлення на зразок і послідовно з'єднаний з ним струмовий резистор;  $U_C$  – напруга на струмовому резисторі;  $I_C$  – сила струму у струмовому резисторі;  $R_C$  – опір струмового резистора.

Тому для подальшої побудови експериментальної темної ВАХ зразка виміряні величини  $U_K$  і  $U_C$  поряд з використовуваними величинами  $R_C$  мають бути занесеними до таблиці 1.1, до якої також слід занести величини  $U$  та  $I$ , розраховані за формулами (1.25) і (1.26), відповідно. Вигляд цієї таблиці запропоновано нижче.

Таблиця 1.1 – Виміряні величини  $U_K$  і  $U_C$  поряд з використовуваними величинами  $R_C$  та розраховані за ними координати точок темної ВАХ досліджуваного зразка

Номер точки	$U_K$ ,	$U_C$ ,	$R_C$ ,	$U$ ,	$I$ ,
-------------	---------	---------	---------	-------	-------

ВАХ	В	В	Ом	В	А

7. Підключити досліджуваний зразок до промислового приладу для виміру вольт-фарадних характеристик і при  $U \leq 0$  у діапазоні безпечних значень  $U$  виміряти його темнову ВФХ подібно до [9], змінюючи напругу з кроком  $\Delta U$ , запропонованим викладачем. Експериментально виміряні значення  $C(U)$  занести до таблиці 1.2, вигляд якої запропоновано нижче.

Таблиця 1.2 – Оцифрована експериментальна темнова ВФХ досліджуваного зразка

Номер точки ВФХ								
$U, В$								
$C, Ф$								

8. Побудувати вимірну статичну ВАХ зразка у звичайних  $I-U$  координатах (яка описується співвідношенням (1.14)), після чого за її зворотною гілкою ( $U < 0$ ) згідно з методикою, викладеною у [8], визначити величину  $R_{III}$ .

9. Далі, за описаною у пункті 1.2.2 методикою шляхом здійснення операції, що регламентується співвідношенням (1.17), з прямої гілки ( $U > 0$ ) експериментальної ВАХ виділити і використовуючи програму електронних таблиць Ексел графічно побудувати у звичайних  $I-U$  координатах її складову  $I_D(U)$ , яка не залежить від  $R_{III}$  і описується співвідношенням (1.19), до якого входить величина  $R_D$ .

10. Для знаходження величини  $R_D$  отриману залежність  $I_D$  від  $U$  опрацювати за відповідною методикою, викладеною у [8]. Оскільки кінцевим етапом такого опрацювання є побудова графіка залежності  $dU/dI_D$  від  $I_D^{-1}$  (з якого величина  $R_D$  визначається за відтинком на осі ординат після екстраполяційного продовження цього прямолінійного похилого графіка до перетину вказаної

координатної осі), то необхідні для побудови такого графіка величини  $dU/dI_D$  і  $I_D^{-1}$ , отримані для декількох точок залежності  $I_D$  від  $U$  (за рекомендацією викладача) мають бути занесеними до таблиці 1.3. Вигляд цієї таблиці запропоновано нижче.

Таблиця 1.3 – Результати диференціювання складової  $I_D(U)$  прямої гілки ВАХ зразка

Номер точки складової $I_D(U)$ ВАХ зразка	$I_D$ , А	$1/I_D$ , 1/А	$dU/dI_D$ , Ом

11. Для побудови графіка залежності  $lgI_D$  від  $U-I_D R_{II}$  (що у таких напівлогарифмічних координатах відповідає співвідношенню (1.19) і графіку, схематично показаному на рисунку 1.1) попередньо доцільно заповнити таблицю 1.4, вигляд якої запропоновано нижче.

Таблиця 1.4 – Вихідні й розрахункові параметри щодо побудови графіка залежності  $lgI_D$  від  $U-I_D R_{II}$  для досліджуваного зразка

Номер точки складової $I_D(U)$ ВАХ зразка	$U$ , В	$I_D$ , А	$U-I_D R_{II}$ , В	$lg(I_D, А)$

12. За відповідними даними з таблиці 1.4 побудувати графік залежності  $lgI_D$  від  $U-I_D R_{II}$  і за методикою, описаною у пункті 1.2.2 та проілюстрованою на рисунку 1.1, після чого визначити за цим графіком величини  $I_{01}$  та  $I_{02}$  для досліджуваного зразка.

13. Для визначення величини  $C_0$  досліджуваного зразка за його темною ВФХ, використовуючи наведені у таблиці 1.2 дані, побудувати подібний до показаного на рисунку 1.2 графік лінеаризованої залежності  $C^{-\xi}$  від  $U$ , для чого

попередньо заповнити таблицю 1.5 ( вигляд якої запропоновано нижче) розрахунковими значеннями  $C^{-2}(U)$  і  $C^{-3}(U)$ . Величину  $C_0$  визначити, користуючись отриманою лінеаризованою залежністю  $C^{-\zeta}$  від  $U$  згідно з відповідною методикою, наведеною у пункті 1.2.2.

Таблиця 1.5 - Розрахункові параметри щодо побудови графіка залежності  $C^{-\zeta}$  від  $U$  для досліджуваного зразка

Номер точки ВФХ	$U, В$	$C^{-2}, \Phi^{-2}$	$C^{-3}, \Phi^{-3}$

14. За відомими значеннями  $S$ ,  $N_{A,D}$ ,  $N_{A,D}^+$  й  $n_i$  і знайденими значеннями  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  та  $C_0$ , користуючись формулами (1.10) й (1.13), розрахувати відповідно шукані величини  $S_{HHZ}$  та  $\tau_i$ . Значення  $S$ ,  $N_{A,D}$ ,  $N_{A,D}^+$ ,  $n_i$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  і  $C_0$  та шукані величини  $S_{HHZ}$  і  $\tau_i$  занести до підсумкової таблиці 1.6, вигляд якої запропоновано нижче.

Таблиця 1.6 – Тип монокристалічної кремнієвої діодної структури ( $Si$ -ДС) досліджуваного зразка, початково відомі та визначенні для нього у лабораторній роботі параметри

Тип	$S$ ,	$N_{A,D}$ ,	$N_{A,D}^+$ ,	$n_i$ ,	$I_{01}$ ,	$I_{02}$ ,	$C_0$ ,	$S_{HHZ}$ ,	$\tau_i$ ,
$Si$ -ДС	$м^2$	$м^{-3}$	$м^{-3}$	$м^{-3}$	А	А	Ф	м/с	с

15. Приступити до оформлення звіту.

### 1.3.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для опису темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик зразка і визначення за цими характеристиками досліджуваних параметрів.
3. Схематичне зображення досліджуваного зразка з його геометричними розмірами.
4. Блок-схема і фотографія лабораторного стенду для виміру статичних вольт-амперних характеристик з зазначенням типів вимірювальних приладів, що входять до його складу.
5. Фотографії з назвами промислового вимірювального устаткування.
6. Копія динамічної вольт-амперної характеристики зразка, візуалізованої за допомогою промислового характерографа.
7. Заповнені таблиці 1.1-1.5 і побудовані за наведеними у них даними графіки, зазначені у пункті 1.3.2.
8. Розрахунки шуканих величин  $S_{HHZ}$  і  $\tau_i$ .
9. Заповнена підсумкова таблиця 1.6.
10. Висновки.

### Запитання для самоперевірки

1. Охарактеризувати місце напівпровідникових діодних структур з анізотипним й ізотипним переходами у виробках сучасної електронної техніки.
2. Що є фізичними передумовами можливості визначення часу життя нерівноважних неосновних носіїв заряду у анізотипному  $n^+(p^+)-p(n)$  гомопереході та швидкості їх поверхневої рекомбінації з боку ізотипного гомопереходу  $p(n)-p^+(n^+)$  на його границі з металевим електродом до монокристалічної кремнієвої  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  діодної структури за її темновими вольт-амперною і вольт-фарадною характеристиками?

3. З яких ключових етапів складається методика визначення швидкості поверхневої рекомбінації нерівноважних неосновних носіїв заряду з боку ізотипного гомопереходу  $p(n)-p^+(n^+)$  на його границі з металевим електродом до монокристалічної кремнієвої  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  діодної структури за її темною вольт-амперною характеристикою?

4. Як концентрація легуючої домішки у високолегованому шарі ізотипного гомопереходу впливає на швидкість поверхневої рекомбінації нерівноважних неосновних носіїв заряду з боку цього гомопереходу на його границі з металевим електродом  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  діодної структури?

5. З яких ключових етапів складається методика визначення часу життя нерівноважних неосновних носіїв заряду у анізотипному  $n^+(p^+)-p(n)$  гомопереході монокристалічної кремнієвої  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  діодної структури за її темними вольт-амперною і вольт-фарадною характеристиками?

6. Які параметри електронної енергетичної структури анізотипного  $n^+(p^+)-p(n)$  гомопереходу монокристалічної кремнієвої  $n^+(p^+)-p(n)-p^+(n^+)$  діодної структури суттєво впливають на час життя нерівноважних неосновних носіїв заряду у ньому?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ І ДИФУЗІЙНОЇ ДОВЖИНИ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В ОПРОМІНЮВАНИХ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ**

Мета роботи – навчитися визначати час життя і дифузійну довжину неосновних носіїв заряду в базових кристалах кремнієвих фотоелектричних перетворювачів при різному спектральному складі випромінювання за

результатами дослідження загасання напруги холостого ходу таких приладів після раптового припинення їх опромінювання.

## 2.1 Загальні відомості

### 2.1.1 Вплив часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в базових кристалах кремнієвих фотоелектричних перетворювачів на їх ККД

Як добре відомо [5, 10], ККД монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (*Si*-ФЕП), котрий є важливим показником ефективності їх роботи, помітно підвищується зі зростанням дифузійної довжини  $L_{n,p}$  нерівноважних неосновних носіїв заряду (ННЗ) в базових кристалах (*Si*-БК) таких приладів, яка збільшується з підвищенням часу життя  $\tau_{n,p}$  цих ННЗ в *Si*-БК.

Зв'язок  $L_{n,p}$  з  $\tau_{n,p}$  в *Si*-БК *p*- або *n*-типу провідності (відповідно  $L_n$  або  $L_p$  і  $\tau_n$  або  $\tau_p$ ) згідно з [5] надається формулою

$$L_{n,p} = \left( kT \mu_{n,p} \tau_{n,p} / q_e \right)^{1/2}, \quad (2.1)$$

де:  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $\mu_{n,p}$  – рухливість електронів ( $\mu_n$ ) або дірок ( $\mu_p$ );  $q_e$  – абсолютне значення заряду електрона.

Залежність ККД вказаних приладів від електронних параметрів їх *Si*-БК -  $\tau_{n,p}$  й  $L_{n,p}$  – наглядно ілюструється, наприклад, відповідними графіками на рисунку 2.1 для одноперехідних (ОП) *Si*-ФЕП з горизонтальною  $n^+ - p - p^+$  (1) і  $n^+ - p$  (2) діодною структурою на основі легованих бором *Si*-БК завтовшки  $X_p \approx 350$  мкм з питомим опором  $\rho_p = 10$  Ом·см при 300 К [10].

Величини  $\mu_{n,p}$  і  $\tau_{n,p}$  суттєво залежать від рівня дефектності атомарної структури *Si*-БК:  $\mu_{n,p} \propto N_{sc}^{-1}$ , а  $\tau_{n,p} \propto N_r^{-1}$ , де  $N_{sc}$  - об'ємна концентрація центрів розсіювання, якими є атоми легуючої домішки;  $N_r$  - об'ємна концентрація центрів рекомбінації, якими є атоми фонової домішки, власні точкові та деякі інші дефекти структури *Si*-БК [5, 10]. З наведеного випливає, що при  $\rho_{n,p} = const$  і  $T = const$  величина  $L_{n,p}$  відповідно до формули (2.1) залежить тільки від  $\tau_{n,p} \propto N_r^{-1}$ , а отже, як і  $\tau_{n,p}$ , має збільшуватись зі зменшенням  $N_r$ .

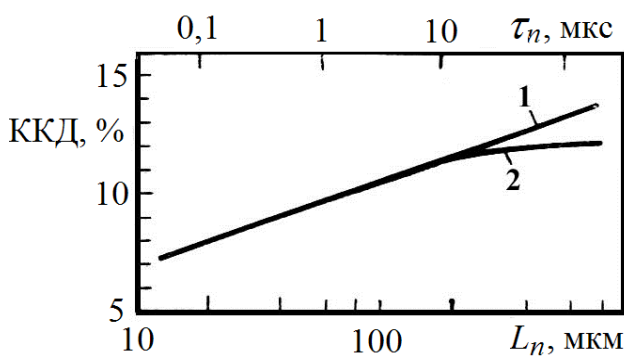


Рисунок 2.1 - Залежність ККД монокристалічних ОП *Si*-ФЕП від часу життя і дифузійної довжини ННЗ в *Si*-БК *p*-типу провідності при опромінюванні приладів у режимі АМ0 [10]

Між тим, після виготовлення *Si*-БК, а потім і *Si*-ФЕП, кінцева величина  $N_r$ , як правило, варіюється вздовж товщини *Si*-БК залежно від особливостей конструктивно-технологічного рішення *Si*-ФЕП [5, 11]. Тому величинам  $\tau_{n,p}$  й  $L_{n,p}$  також притаманне варіювання вздовж вказаного напрямку усередині *Si*-БК таких приладів. Очевидно, що розподіл цих електронних параметрів за товщиною *Si*-БК призводить до того, що ККД *Si*-ФЕП залежить від деякої ефективної величини часу життя  $\tau_{n,p_{ef}}$ , яка після підстановки у формулу (2.1) замість  $\tau_{n,p}$  визначає відповідну їй величину ефективної дифузійної довжини  $L_{n,p_{ef}}$  замість  $L_{n,p}$ .

Тому дослідження розподілу електронних параметрів  $\tau_{n,p}$  й  $L_{n,p}$  за товщиною *Si*-БК (у напрямку від фотоприймальної поверхні до тилової поверхні *Si*-ФЕП), а також визначення величин  $\tau_{n,p_{ef}}$  й  $L_{n,p_{ef}}$  є невід'ємною

складовою тестування рівня якості Si-ФЕП після їх виготовлення, а також на стадіях зберігання і експлуатації приладів.

### **2.1.2 Фізичні передумови можливості дослідження розподілу часу життя і дифузійної довжини НЗ в базових кристалах кремнієвих ФЕП при варіюванні спектрального складу опромінюючого їх світла**

Згідно з результатами досліджень оптичних і фотоелектричних властивостей напівпровідників і напівпровідникових ФЕП [11] при довжині хвилі світла  $\lambda < \lambda_{чГ} = hc/E_g$  (де  $\lambda_{чГ}$  – червона границя внутрішнього фото ефекту;  $h$  – стала Планка;  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $E_g$  – ширина забороненої зони напівпровідника) коефіцієнт його фотоелектрично активного поглинання  $\alpha$  у напівпровіднику збільшується зі зменшенням  $\lambda$ , оскільки, наприклад, для кристалічного кремнію з  $\lambda_{чГ} \approx 1,11$  мкм

$$\alpha(\lambda) \propto (hc/\lambda - E_g)^2. \quad (2.2)$$

Водночас з цим зменшується довжина  $X_{63}(\lambda) = 1/\alpha(\lambda)$  [11] фотоелектрично активного поглинання цього світла, тобто відстань від опромінюваної поверхні углиб напівпровідника, на якій відповідним чином поглинається 63 % квантів світла, що перетинають цю поверхню. Залежності  $\alpha(\lambda)$  і  $X_{63}(\lambda)$  для кристалічного кремнію наведено на рисунку 2.2.

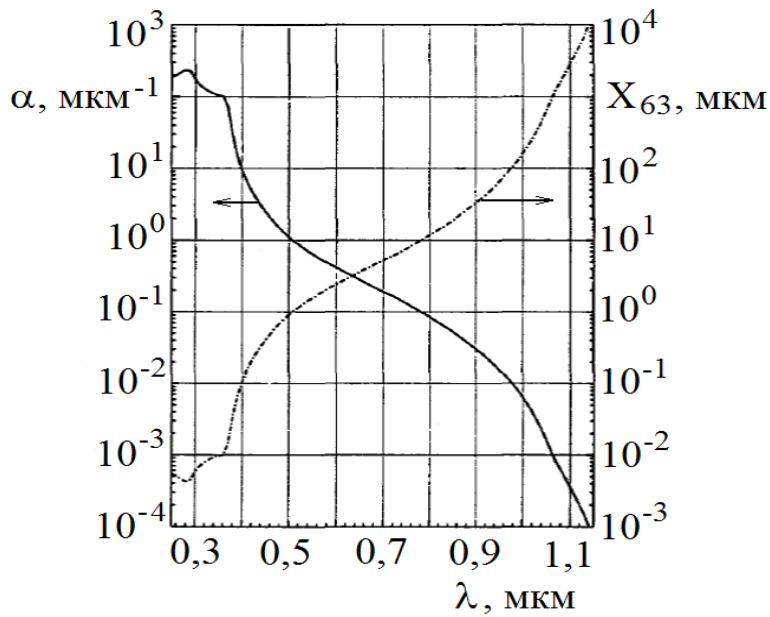


Рисунок 2.2 -  
Залежності  $\alpha(\lambda)$  і  $X_{63}(\lambda)$  для  
кристалічного кремнію

Як видно з рисунку 2.2, наприклад, при  $\lambda_1 = 0,53$  мкм  $X_{63}(\lambda_1) \approx 1$  мкм, при  $\lambda_2 = 0,88$  мкм  $X_{63}(\lambda_2) \approx 28$  мкм, при  $\lambda_3 = 0,94$  мкм  $X_{63}(\lambda_3) \approx 50$  мкм. Розраховані згідно з методикою, викладеною у [12], значення довжини  $X_{100}(\lambda_i)$  повного стовідсоткового поглинання світла у монокристалічному кремнії такі:  $X_{100}(\lambda_1) \approx 20$  мкм,  $X_{100}(\lambda_2) \approx 170$  мкм,  $X_{100}(\lambda_3) \approx 350$  мкм.

Така залежність  $\alpha$  і  $X_{63}$  від  $\lambda$  суттєво обумовлює швидкість об'ємної фотогенерації  $G$  нерівноважних ННЗ у  $Si$ -БК на відстані  $X$  від фотоприймальної поверхні  $Si$ -ФЕП, яка згідно з [11] залежить від  $X$  при різних  $\lambda$  відповідно до співвідношення

$$G(X, \lambda) \propto \exp[-\alpha(\lambda)X] = \exp\left[-\frac{X}{X_{63}(\lambda)}\right]. \quad (2.3)$$

Це впливає на спектральну залежність фотоструму  $I_{\Phi}(\lambda)$  у  $Si$ -ФЕП, яка, наприклад, при  $X_{p,n} > X_{63} \geq 1$  мкм і різних  $L_{n,p} < X_{p,n}$  має такий вигляд [13]:

$$I_{\Phi}(\lambda, L_{n,p}) = q_e \alpha(\lambda) L_{n,p} N_0(\lambda) \frac{\exp[-\alpha(\lambda) X_{n^+,p^+}]}{1 + \alpha(\lambda) L_{n,p}}, \quad (2.4)$$

де:  $N_0(\lambda)$  – швидкість надходження квантів світла, котрим відповідає довжина хвилі  $\lambda$ , безпосередньо під фотоприймальну поверхню  $Si$ -ФЕП;  $X_{n^+,p^+}$  - товщина високолегованого  $n^+$ - або  $p^+$ -шару з боку фотоприймальної поверхні  $Si$ -ФЕП.

Величина фотоструму у свою чергу зумовлює рівень вихідних параметрів  $Si$ -ФЕП, від яких залежить ККД таких приладів, що підвищується зі зростанням величини  $I_{\Phi}$ . До цих вихідних параметрів належить, зокрема, напруга холостого ходу  $U_{XX}$ , яка легко вимірюється експериментально і у випадку досить високого шунтувального опору  $Si$ -ФЕП пов'язана з  $I_{\Phi}$  добре відомим [5] співвідношенням

$$U_{XX} \sim \ln I_{\Phi}. \quad (2.5)$$

У зв'язку з зазначеним цей вихідний параметр, що, як і  $I_{\Phi}$ , також суттєво залежить від спектрального складу світла, опромінюючого  $Si$ -ФЕП, а також від  $L_{n,p} = L_{n,p}(\tau_{n,p})$ , є найбільш придатним для експериментального визначення за ним розподілу часу життя і дифузійної довжини ННЗ в базових кристалах кремнієвих ФЕП при варіюванні спектрального складу опромінюючого їх світла.

Тому згідно з [5, 14] для знаходження величини  $\tau_{n,p}$  у  $Si$ -БК кремнієвих ФЕП при різних  $\lambda < \lambda_{\text{ЛГ}}$  доцільно застосовувати метод загасання напруги холостого ходу  $Si$ -ФЕП після раптового припинення опромінювання таких приладів світлом з довжиною хвилі  $\lambda$ . Після знаходження величини  $\tau_{n,p}$

величина  $L_{n,p}$  розраховується за формулою (2.1) при використанні у ній величини  $\mu_{n,p}$ , яка визначається за відомим значенням  $\rho_{n,p}$  питомого опору  $Si$ -БК досліджуваного  $Si$ -ФЕП згідно з графіками залежностей  $\rho_{n,p}$  від концентрації  $N$  легуючої домішки у  $Si$ -БК і  $\mu_{n,p}$  від  $N$ , наданими у [4] і наведеним на рисунках 2.3 та 2.4, відповідно.

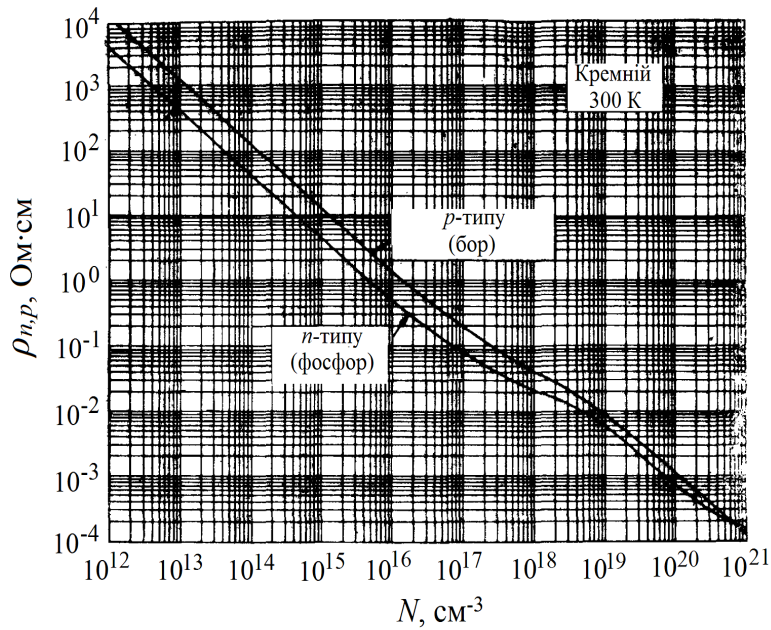


Рисунок 2.3 – Залежність питомого опору  $\rho_{n,p}$  монокристалічного кремнію при 300 К від концентрації  $N$  легуючої домішки вказаного типу [4]

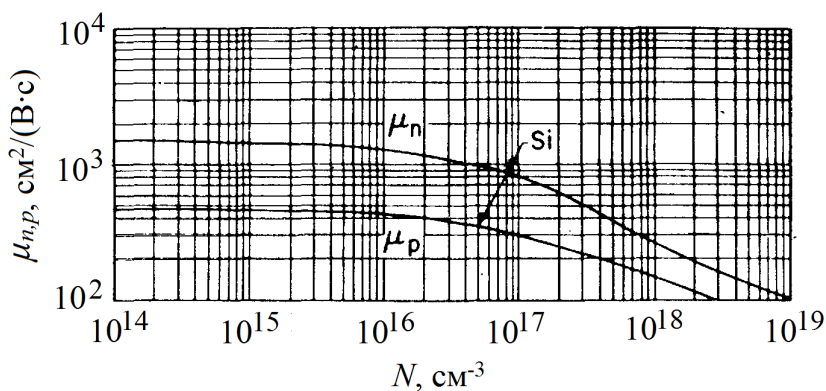


Рисунок 2.4 – Залежність рухливості  $\mu_{n,p}$  електронів і дірок при 300 К від концентрації  $N$  легуючої домішки у монокристалічному кремнії [4]

## 2.2 Сутність методу загасання напруги холостого ходу кремнієвих ФЕП після раптового припинення їх опромінювання

Згідно з [14] характеру загасання  $U_{XX}$  від часу  $\tau$  після раптового припинення опромінювання  $Si$ -ФЕП притаманний типовий вигляд, схематично зображений на рисунку 2.5.

Показана на рисунку 2.5 залежність складається з трьох відрізків у ділянках, позначених як  $A$ ,  $B$  і  $B$ , що відповідають різним початковим (при  $\tau = 0$ ) концентраціям нерівноважних (фотозбуджених) ННЗ у  $p$ - або  $n$ -шарі  $Si$ -ФЕП [5, 14].

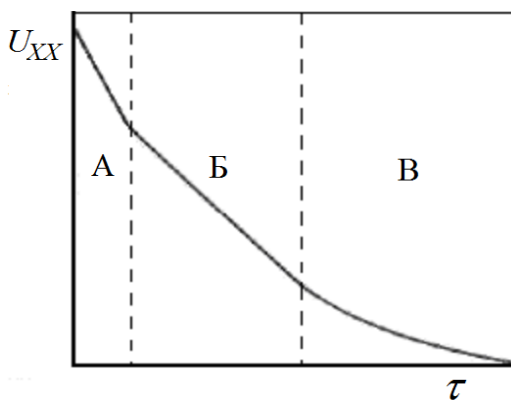


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення характеру загасання  $U_{XX}$  від часу  $\tau$  після раптового припинення опромінювання  $Si$ -ФЕП [14]

Відрізок на ділянці  $A$  відповідає початково високий рівень фотозбудження нерівноважних ННЗ в  $p$ - або  $n$ -шарі  $Si$ -ФЕП, а саме:  $\Delta n_p(\Delta p_n) \geq p_p(n_n)$ , де  $\Delta n_p(\Delta p_n)$  - концентрація нерівноважних ННЗ у  $p(n)$ -шарі;  $p_p(n_n)$  – рівноважна концентрація основних носіїв заряду у  $p(n)$ -шарі. Визначення  $\tau_{n,p}$  при опрацюванні цього відрізка здійснюється за формулою

$$\tau_{n,p} \approx \frac{2kT}{q_e} \left| \frac{1}{dU_{XX} / d\tau} \right|. \quad (2.6)$$

Відрізок на ділянці  $B$  відповідає проміжний рівень фотозбудження нерівноважних ННЗ в  $p$ - або  $n$ -шарі  $Si$ -ФЕП, а саме:  $n_p(p_n) < \Delta n_p(\Delta p_n) < p_p(n_n)$ ,

де  $n_p(p_n)$  – рівноважна концентрація ННЗ у  $p(n)$ -шарі. Визначення  $\tau_{n,p}$  при опрацюванні цього відрізка здійснюється за формулою

$$\tau_{n,p} \approx \frac{kT}{q_e} \left| \frac{1}{dU_{xx} / d\tau} \right|. \quad (2.7)$$

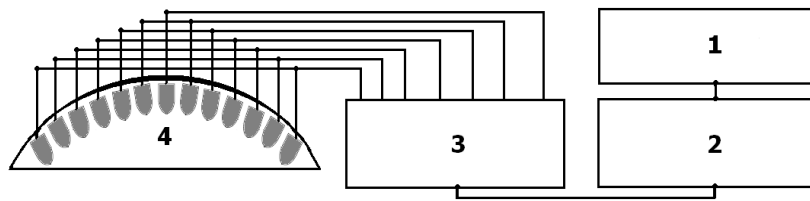
Відрізка на ділянці  $B$  відповідає низький рівень фотозбудження нерівноважних ННЗ в  $p$ - або  $n$ -шарі  $Si$ -ФЕП, а саме:  $\Delta n_p(\Delta p_n) < n_p(p_n)$ . Визначення  $\tau_{n,p}$  при опрацюванні цього відрізка здійснюється за формулою

$$U_{xx}(\tau) = \frac{kT}{q_e} \left[ \exp\left(\frac{q_e U_{xx}(0)}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_n}\right), \quad (2.8)$$

де:  $U_{xx}(0)$  – напруга холостого ходу в момент початку відліку часу  $\tau$ , коли починає виправдовуватись нерівність  $\Delta n_p(\Delta p_n) < n_p(p_n)$ .

### **2.3 Експериментальна реалізація методу загасання напруги холостого ходу кремнієвих ФЕП після раптового припинення їх опромінювання**

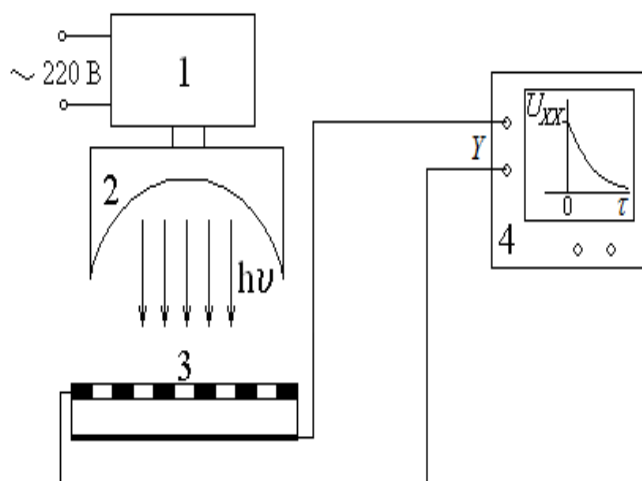
При виконанні цього завдання джерелом монохроматичного випромінювання досліджуваних  $Si$ -ФЕП є універсальний світлодіодний освітлювач (УСО) [15, 16], який дає змогу керувати величиною  $\lambda$  у діапазоні  $0,40 \leq \lambda \leq 0,94$  мкм і інтенсивністю опромінювання  $Si$ -ФЕП, а також опромінювати  $Si$ -ФЕП у імпульсному режимі з повним спадом інтенсивності опромінювання  $Si$ -ФЕП протягом менше 0,1 мкс наприкінці світлового прямокутного імпульсу. Блок-схему УСО зображено на рисунку 2.6.



1 – стабілізоване джерело постійного струму; 2 – блок автоматичного роздільного регулювання тривалості та шпаруватості прямокутних імпульсів струму; 3 – блок роздільного автоматичного регулювання потужності випромінювання світлодіодів різного кольору; 4 – світлодіодний випромінюючий елемент

Рисунок 2.6 - Блок-схема УСО

Величина  $U_{XX}$  в залежності від  $\tau$  вимірюється цифровим запам'ятовуючим осцилографом, наприклад, типу RIGOL DS1064B, який підключається безпосередньо до електродів *Si*-ФЕП. На рисунку 2.7 наведено блок-схему експериментальної реалізації таких вимірів.

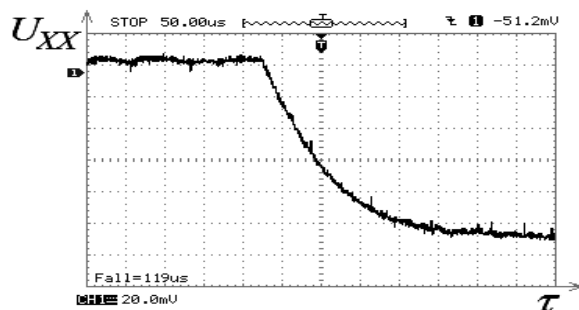


УСО; 3 – досліджуваний *Si*-ФЕП; 4 – цифровий запам'ятовуючий осцилограф RIGOL DS1064B

Рисунок 2.7 - Блок-схема для вимірювання  $U_{XX}$  в залежності від  $\tau$  після раптового припинення опромінювання *Si*-ФЕП світлом з керованим значенням  $\lambda$

1 – джерело стабілізованого постійного струму HY3020MR; 2 –

Типова осцилограма спаду напруги холостого ходу після раптового припинення освітлювання *Si*-ФЕП, яку запам'ятовано на екрані цифрового осцилографу RIGOL DS1064B, показана на рисунку 2.8.



ходу після раптового припинення освітлювання *Si*-ФЕП, яку запам'ятовано на екрані цифрового осцилографу RIGOL DS1064B

Рисунок 2.8 - Типова осцилограма спаду напруги холостого

Слід мати на увазі, що у випадку, коли *Si*-БК вміщує рекомбінаційні центри різного походження, рівні яких в забороненій зоні монокристалічного кремнію не є моноенергетичними, лінійні залежності  $U_{XX}$  від  $\tau$  на ділянках *A* і *B* (рисунок 2.5) можуть вироджуватись у два-три послідовних лінійних відрізки кожний, кути нахилу яких до осі  $0\tau$  збільшуються при зростанні  $\tau$  [14, 16]. Характерний приклад такої ситуації наведено на рисунку 2.9.

Цей графік залежності  $U_{XX}$  від  $\tau$  належить тільки ділянці типу *B* на рисунку 2.5, але у зв'язку з акцентованим вище налічує три (I, II, III) послідовних лінійних відрізки, кути нахилу яких до осі  $0\tau$  збільшуються при зростанні  $\tau$ .

Останнє дозволяє ідентифікувати наявність усередині *Si*-БК такого приладу трьох типів рекомбінаційних центрів, кожному з яких відповідає значення  $\tau_{nI}$ ,  $\tau_{nII}$ ,  $\tau_{nIII}$ , котре у даному випадку розраховується за формулою (2.7).

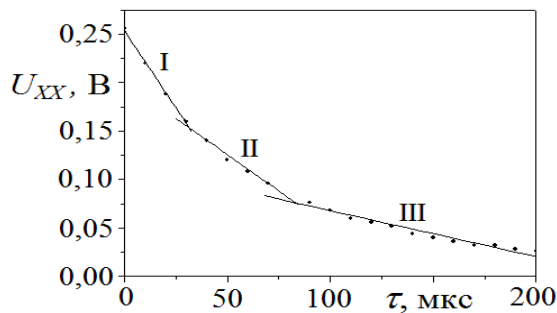


Рисунок 2.9 - Приклад підготованого для аналітичного опрацювання графіка залежності  $U_{XX}$  від часу  $\tau$  для  $Si$ -ФЕП з  $Si$ -БК  $p$ -типу провідності, для якого експериментально було реалізовано проміжний рівень фотозбудження нерівноважних ННЗ, а саме:  $n_p < \Delta n_p < p_p$

## 2.4 Порядок виконання роботи

### 2.4.1 Завдання для виконання роботи

Методом загасання напруги холостого ходу після припинення опромінювання  $Si$ -ФЕП в умовах початково високого або проміжного рівня фотозбудження нерівноважних ННЗ визначити час життя нерівноважних ННЗ у базових кристалах різної товщини двох таких приладів з  $n^+p-p^+$  діодною структурою при довжинах хвиль випромінювання  $\lambda_1 = 0,53$  мкм (зелена компонента сонячного спектру),  $\lambda_2 = 0,88$  мкм (ближня інфрачервона фотоактивна компонента сонячного спектру),  $\lambda_3 = 0,94$  мкм (більш дальня інфрачервона фотоактивна компонента сонячного спектру). За цими даними оцінити ефективний час життя й ефективну дифузійну довжину нерівноважних ННЗ для двох досліджуваних  $Si$ -ФЕП стосовно поліхроматичного сонячного спектру та, користуючись відповідними вихідними й літературними даними, пояснити причину розбіжності у ККД досліджуваних  $Si$ -ФЕП. Усі необхідні для виконання завдання розрахунки і побудову відповідних до них графіків рекомендується виконувати за допомогою програми електронних таблиць.

### 2.4.2 Загальна характеристика об'єктів дослідження

Об'єктами дослідження є два подібні до описаних у [16] монокристалічні одноперехідні *Si*-ФЕП дрібносерійного виробництва з горизонтальною  $n^+ - p - p^+$  діодною структурою. Матеріал базових кристалів *Si*-ФЕП – кремній марки КДБ-10 (кремній дірковий, легований бором, при 300 К має питомий опір  $\rho_p = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Базові кристали мають прямокутні планарні поверхні з розмірами  $4 \text{ см} \times 2 \text{ см}$  і товщини:  $X_{BK1} = 230 \pm 50 \text{ мкм}$  у *Si*-ФЕП № 1 та  $X_{BK2} = 380 \pm 50 \text{ мкм}$  у *Si*-ФЕП № 2. Дифузійний  $n^+$ -шар зі сторони фотоприймальної поверхні обох приладів має товщину  $X_{n^+} < 1 \text{ мкм}$  і є легований фосфором. Усереднена за товщиною  $n^+$ -шару концентрація атомів цієї повністю іонізованої донорної домішки  $\langle N_D \rangle^+ \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Дифузійний  $p^+$ -шар зі сторони тилової поверхні цих приладів має товщину  $X_{p^+} < 1 \text{ мкм}$  і є додатково підлегований бором. Усереднена за товщиною  $p^+$ -шару концентрація атомів цієї повністю іонізованої акцепторної домішки  $\langle N_A \rangle^+ \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Поверх  $n^+$ -шару обох приладів знаходиться фронтальний струмознімальний металевий плівковий електрод у вигляді гребінки для забезпечення можливості проникнення квантів світла між полосковими елементами гребінки у діодну структуру *Si*-ФЕП. Для якомога більшого зменшення коефіцієнта відбиття фотоелектрично активної компоненти сонячного випромінювання від фотоприймальної поверхні *Si*-БК на неї у вікнах між полосковими елементами гребінки нанесено просвітлююче плівкове покриття з  $TiO_2$  завтовшки близько  $0,08 \text{ мкм}$ . Поверх  $p^+$ -шару обох *Si*-ФЕП нанесено тиловий струмознімальний суцільний плівковий електрод з алюмінію. У режимі опромінювання АМ0 при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  досліджувані прилади мають такі ККД:  $13 < \eta_1 < 14 \%$  для *Si*-ФЕП № 1 та  $12 < \eta_2 < 13 \%$  для *Si*-ФЕП № 2.

### 2.4.3 Порядок дій

1. За допомогою наданих інструкцій, котрі знаходяться на робочих місцях біля відповідного лабораторного устаткування, ознайомитись з особливостями

використання універсального світлодіодного освітлювача (УСО) і промислового цифрового запам'ятовуючого осцилографу типу RIGOL DS1064B.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного лабораторного устаткування підключити його до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача досліджувані  $Si$ -ФЕП і додаткові вихідні дані щодо особливостей їх конструктивно-технологічного рішення та конкретизації параметрів:  $X_{BK}$ ;  $X_{n+}$ ;  $X_{p+}$ ;  $\langle N_D \rangle^+$ ;  $\langle N_A \rangle^+$ ;  $\eta_1$ ;  $\eta_2$ .

4. За допомогою наданого у використанні контактної пристрою по чергово підключити  $Si$ -ФЕП № 1 та  $Si$ -ФЕП № 2 до цифрового запам'ятовуючого осцилографу (як у блок-схемі на рисунку 2.7) і отримати для цих приладів подібні до зображених на рисунку 2.8 осцилограми спаду напруги холостого ходу після раптового припинення опромінювання  $Si$ -ФЕП світлом з довжинами хвиль  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), вказаними у пункті 2.4.1.

5. За прикладом, проілюстрованим на рисунку 2.9, підготувати отримані осцилограми експериментальних залежностей  $U_{XX} = U_{XX}(\tau, \lambda_i)$  до наступного аналітичного опрацювання.

6. Аналітичне опрацювання підготованих вказаним чином графіків залежностей  $U_{XX} = U_{XX}(\tau, \lambda_i)$  для обох досліджуваних  $Si$ -ФЕП з метою визначення  $\tau_{n_I}(\lambda_i)$ ,  $\tau_{n_{II}}(\lambda_i)$  і  $\tau_{n_{III}}(\lambda_i)$  здійснити за формулами (2.6) або (2.7), враховуючи експериментально реалізований рівень фотозбудження нерівноважних ННЗ (відповідно - високий або проміжний).

7. За отриманими значеннями  $\tau_{n_I}(\lambda_i)$ ,  $\tau_{n_{II}}(\lambda_i)$  і  $\tau_{n_{III}}(\lambda_i)$ , користуючись модернізованою відповідним чином формулою (2.1), слід розрахувати величини  $L_{n_I}(\lambda_i)$ ,  $L_{n_{II}}(\lambda_i)$  і  $L_{n_{III}}(\lambda_i)$ . Величину  $\mu_n$ , яка має фігурувати у такій формулі, слід визначити за методикою, описаною у пункті 2.1.2, послідовно користуючись відповідними графіками на рисунках 2.3 і 2.4.

8. Визначити спектральну залежність ефективного часу життя  $\tau_{n_{ef}}(\lambda_i)$  нерівноважних ННЗ для кожного з досліджуваних *Si*-ФЕП, користуючись відомою з [16] формулою

$$\tau_{n_{ef}}(\lambda_i) = \left( \sum_{K=I}^{III} \frac{1}{\tau_{nK}(\lambda_i)} \right)^{-1}, \quad (2.9)$$

після чого для цих *Si*-ФЕП, користуючись модернізованою відповідним чином формулою (2.1), розрахувати величини  $L_{n_{ef}}(\lambda_i)$  ефективної дифузійної довжини нерівноважних ННЗ при різних  $\lambda_i$ .

9. За значеннями  $\tau_{n_{ef}}(\lambda_i)$  для кожного *Si*-ФЕП слід знайти  $\tau_{n_{ef}}$  - ефективний час життя нерівноважних ННЗ, усереднений за всіма  $\lambda_i$ , для чого необхідно скористатися відомою з [16] формулою

$$\tau_{n_{ef}} = \frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \tau_{n_{ef}}(\lambda_i)}{i_{\max}}. \quad (2.10)$$

10. Нарешті, користуючись цими значеннями  $\tau_{n_{ef}}$  і модернізованою відповідним чином формулою (2.1), слід розрахувати  $L_{n_{ef}}$  - ефективну дифузійну довжину нерівноважних ННЗ, усереднену за всіма  $\lambda_i$ .

11. Результати виконання завдання цієї лабораторної роботи звести у підсумкову таблицю 2.1, яку слід оформити подібно до наведеного нижче зразку.

12. Після цього і ознайомлення з відповідними джерелами інформації (зокрема з [11, 13]) обміркувати й обговорити причини збільшення ККД монокристалічних *Si*-ФЕП, подібних за походженням до досліджених, зі зменшенням товщини  $X_{BK}$  їхніх базових кристалів.

13. Приступити до оформлення звіту.

#### 2.4.4 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Концепція методу дослідження, техніка і основні співвідношення, що використовуються для визначення досліджуваних електронних параметрів нерівноважних ННЗ у базових кристалах *Si*-ФЕП.
3. Схематичне зображення досліджуваних *Si*-ФЕП з геометричними розмірами основних елементів їх конструкції.

Таблиця 2.1 – Узагальнені результати досліджень, проведених при довжинах хвиль випромінювання  $\lambda_1 = 0,53$  мкм,  $\lambda_2 = 0,88$  мкм,  $\lambda_3 = 0,94$  мкм

Номер ФЕП	Номер відрізка, $K$	$\tau_{нк}(\lambda_i)$ , мкс			$L_{нк}(\lambda_i)$ , мкм			$\tau_{неf}$ , мкс	$L_{неf}$ , мкм	$X_{БК}$ , мкм	ККД, %
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$				
1	I	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	II	+	+	+	+	+	+				
	III	+	+	+	+	+	+				
	$\tau_{неf}(\lambda_i)$ , мкс	+	+	+							
	$L_{неf}(\lambda_i)$ , мкм				+	+	+				
2	$K$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	+	+	+	+
	I	+	+	+	+	+	+				
	II	+	+	+	+	+	+				
	III	+	+	+	+	+	+				

	$\tau_{n_{ef}}(\lambda_i),$ МКС	+	+	+							
	$L_{n_{ef}}(\lambda_i),$ МКМ				+	+	+				

4. Блок-схема і фотографія лабораторного стенду для вимірювання напруги холостого ходу протягом часу її загасання після раптового припинення опромінювання *Si*-ФЕП світлом з керованою довжиною хвилі.

5. Фотографії експериментальних осцилограм спаду напруги холостого ходу після раптового припинення освітлювання досліджуваних *Si*-ФЕП, які були запам'ятовано на екрані використаного цифрового осцилографу.

6. Графіки цих осцилограм для їх подальшого аналітичного опрацювання, підготовані подібно до прикладу, наведеного на рисунку 2.9.

7. Розрахунки шуканих величин параметрів нерівноважних ННЗ, перелічених у діях 6-10 пункту 2.4.3.

8. Заповнена підсумкова таблиця 2.1.

9. Стисле обговорення результатів проведених досліджень.

10. Висновки.

### Запитання та завдання для самоперевірки

1. Як час життя і дифузійна довжина нерівноважних ННЗ в базових кристалах кремнієвих фотоелектричних перетворювачів впливають на їх ККД?

2. Чому ці електронні параметри можуть бути розподіленими за товщиною базового кристалу *Si*-ФЕП?

3. У чому полягають сутність методу загасання напруги холостого ходу кремнієвих ФЕП після раптового припинення їх опромінювання і фізичні передумови його використання для визначення часу життя і дифузійної довжини нерівноважних ННЗ в базових кристалах таких приладів?

4. Обґрунтувати можливість дослідження розподілу часу життя і дифузійної довжини ННЗ в базових кристалах *Si*-ФЕП методом загасання напруги холостого ходу після раптового припинення їх опромінювання при варіюванні спектрального складу опромінюючого цієї прилади світла.

5. Сформулювати послідовність дій при експериментальній реалізації цього методу.

6. Як має виконуватись аналітичне опрацювання експериментальних осцилограм, отриманих за цим методом?

7. Проаналізувати вплив тривалості спаду інтенсивності опромінювання *Si*-ФЕП наприкінці світлового «прямокутного» імпульсу на похибку визначення часу життя нерівноважних ННЗ в базових кристалах *Si*-ФЕП методом загасання напруги холостого ходу після раптового припинення опромінювання досліджуваних приладів.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ОПРОМІНЮВАННЯ ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФОТОСТРУМ І ВИХІДНІ ПАРАМЕТРИ БАГАТОПЕРЕХІДНИХ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ ДІОДНИМИ КОМІРКАМИ**

Мета роботи – освоєння методик визначення фотоструму і вихідних параметрів багатоперехідних монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комірками при різних рівнях концентрації опромінюючого їх імітованого сонячного випромінювання за відсутністю та при дії на них однорідного стаціонарного магнітного поля.

#### **3.1 Загальні відомості**

### 3.1.1 Місце досліджуваних приладів у сучасній геліоенергетиці, особливості їх конструкції та фотоелектричних параметрів при концентрованому сонячному випромінюванні

Багатоперехідні монокристалічні кремнієві фотоелектричні перетворювачі (БП *Si*-ФЕП) з вертикальними діодними комірками (ВДК), які ще називаються матричними сонячними елементами, є найбільш пристосованими для ефективного практичного використання в умовах наземного й заатмосферного концентрованого сонячного випромінювання і тому посідають у сучасній геліоенергетиці та у її перспективних проектах вагоме місце [5, 16-18]. Це зумовлено особливостями конструкції таких приладів, що належним чином впливають на силу їх фотоструму  $I_{\phi}$  та кількісні значення вихідних параметрів, до яких належать: сила струму короткого замикання  $I_{KЗ}$ ; напруга холостого ходу  $U_{ХХ}$ ; фактор заповнення  $FF$  навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики приладу; максимальна електрична потужність  $P_{HM}$ , що надходить від БП *Si*-ФЕП у зовнішнє коло до опору навантаження  $R_H$  (який власно може бути, наприклад, опором устрою, котрий живиться електричною енергією, перетвореною БП *Si*-ФЕП з енергії сонячного випромінювання); коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .

На рисунку 3.1, *a-v* наведено схематичні зображення зовнішнього вигляду БП *Si*-ФЕП з ВДК загалом (*a*), однієї з його ВДК (*б*) та специфіки послідовного з'єднання ВДК усередині приладу (*в*), де цифровим позначкам відповідають такі складові конструкції БП *Si*-ФЕП з ВДК: 1 – зовнішній металевий електрод; 2 – шар кремнію  $p^+$ -типу провідності; 3 – шар кремнію  $n$ (або  $p$ )-типу провідності; 4 - шар кремнію  $n^+$ -типу провідності; 5 – внутрішній шар контактної металізації.

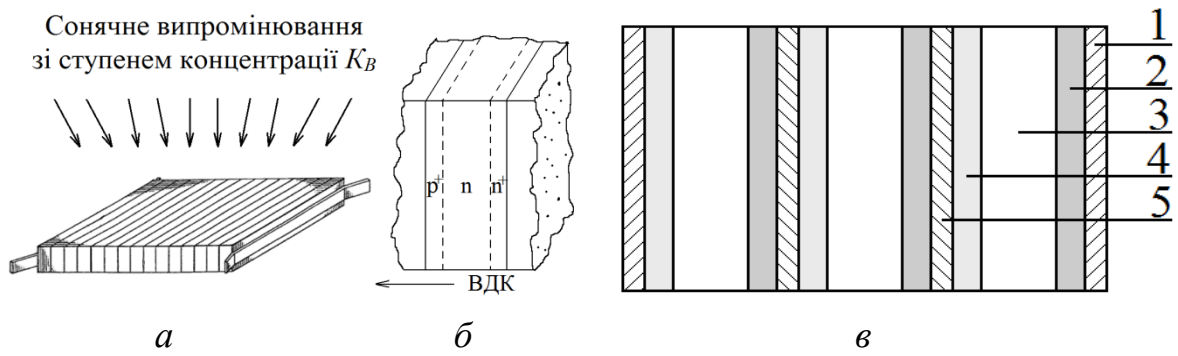


Рисунок 3.1 – Схематичні зображення зовнішнього вигляду БП *Si*-ФЕП з ВДК і його внутрішнього устрою

Така конструкція БП *Si*-ФЕП з ВДК значно спрощує технологію їх виготовлення у порівнянні з одноперехідними монокристалічними *Si*-ФЕП, що мають горизонтальну діодну структуру, і на відміну від останніх забезпечує можливість досягнення  $\eta \geq 20\%$  при  $K_B > 50$ . Важливим чинником, що забезпечує вказане високе значення ККД у досить широкому діапазоні величин  $1 \leq K_B \leq K_B^{\max}$ , є конструктивно зумовлений суттєво низький послідовний опір  $R_{\Pi}$  вертикальних діодних комірок, завдяки якому при відповідних значеннях  $K_B$  величина  $I_{K3}$  практично дорівнює величині  $I_{\Phi}$ , що зростає пропорційно  $K_B$ . Згідно з [19] оціночна величина  $K_B^{\max}$  визначається за співвідношенням:

$$K_B^{\max} \approx \varphi_d / (I_{\Phi 1} R_{\Pi}), \quad (3.1)$$

де:  $\varphi_d$  – дифузійний потенціал анізотипного переходу ВДК, який не перевищує  $E_g/q_e$  ( $E_g$  – ширина забороненої зони кристалічного кремнію;  $q_e$  – абсолютне значення заряду електрона);  $I_{\Phi 1}$  – сила фотоструму БП *Si*-ФЕП при  $K_B = 1$ .

Таким чином, якщо  $K_B \leq K_B^{\max}$ , то

$$I_{K3} = I_{\Phi} = K_B I_{\Phi 1} = K_B I_{K31}. \quad (3.2)$$

Щодо решти вихідних параметрів БП *Si*-ФЕП з ВДК при  $K_B \leq K_B^{\max}$ , то відповідно до узагальнюючого аналізу, проведеного у [18]:

$$U_{XX} = U_{XX1} + \frac{kT}{q_e} \ln K_B, \quad (3.3)$$

$$FF = \frac{U_{XX} - \frac{kT}{q_e} \ln \left( \frac{q_e U_{XX}}{kT} + 0.72 \right)}{U_{XX} + \frac{kT}{q_e}}, \quad (3.4)$$

$$\eta = \eta_1 \left( \frac{FF}{FF_1} \right) \left( 1 + \frac{\frac{kT}{q_e} \ln K_B}{U_{XX1}} \right), \quad (3.5)$$

де:  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $U_{XX1}$ ,  $FF_1$  і  $\eta_1$  – відповідні вихідні параметри БП *Si*-ФЕП з ВДК при  $K_B = 1$ .

Зі співвідношень (3.2)-(3.5) випливає, що при  $K_B \leq K_B^{\max}$  зі збільшенням  $K_B$  зростають усі вихідні параметри таких приладів разом з їх ККД включно.

Між тим, при  $K_B = K_B^{\max}$  згідно з [19] фотострум має насичуватись, сягаючи величини

$$I_{\Phi}^{\max} = K_B^{\max} I_{\Phi 1} \approx \varphi_d / R_{\Pi}, \quad (3.6)$$

в зв'язку з чим у випадку подальшого зростання  $K_B$ , тобто при  $K_B > K_B^{\max}$  ККД таких приладів має зменшуватись зі зростанням  $K_B$  відповідно до співвідношення

$$\eta = \frac{U_{XX} I_{K3}^{\max} FF}{K_B P_{B1}} \cdot 100\% = \frac{U_{XX} K_B^{\max} I_{K31} FF}{K_B P_{B1}} \cdot 100\% , \quad (3.7)$$

$$K_B P_{B1} = P_B, \quad (3.8)$$

де:  $P_{B1}$  і  $P_B$  – потужність сонячного випромінювання на фотоприймальній поверхні БП Si-ФЕП з ВДК при  $K_B = 1$  і при  $K_B > 1$ , відповідно.

Для сучасних БП Si-ФЕП з ВДК і площею фотоприймальної поверхні  $S = 1 \text{ см}^2$  типові залежності  $P_B = K_B P_{B1}$  (при  $P_{B1} = 1,36 \text{ кВт/м}^2$ ),  $I_\phi = K_B I_{\phi 1}$  та ККД ( $\eta$ ) від  $K_B$  у діапазоні  $1 \leq K_B \leq 500$  при температурі  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  показані на рисунку 3.2. З рисунку видно, що у даному випадку величина  $I_\phi^{\max} \approx 400 \text{ мА}$  досягається при  $K_B^{\max} = 300$ . Тому при  $K_B > 300$  відповідно до співвідношення (3.7) величина ККД приладу в умовах зростання  $K_B$ , а отже - і  $P_B = K_B P_{B1}$ , зменшується від максимального значення близько 19 % до близько 12 % при  $K_B = 500$ .

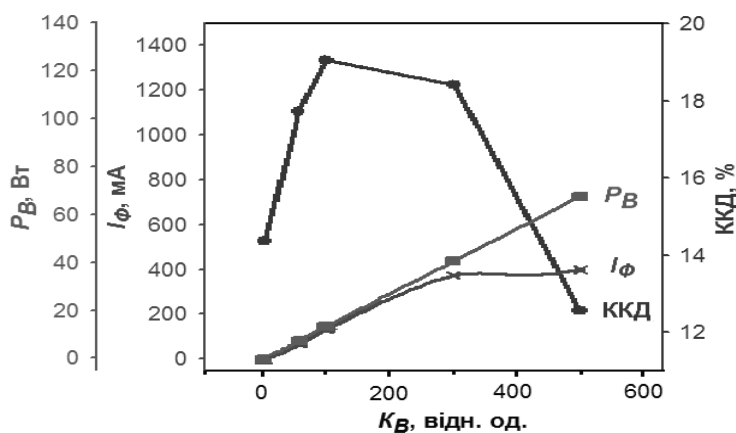


Рисунок 3.2 – Типові для сучасних БП Si-ФЕП з ВДК залежності потужності концентрованого сонячного випромінювання  $P_B$  на фотоприймальній поверхні, сили фотоструму  $I_\phi$  і ККД від ступеня концентрації випромінювання  $K_B$

Тому забезпечення якомога більшого значення  $K_B^{\max}$  за рахунок мінімізації величини  $R_{II}$  й підвищення величини  $\varphi_d$  для забезпечення зростання ККД і експериментальна перевірка досягнутого результату є важливими складовими розробки високоефективних БП  $Si$ -ФЕП з ВДК.

При багатосерійному виробництві та широкомасштабному застосуванні БП  $Si$ -ФЕП з ВДК це дозволить отримувати сонячну електроенергію за ціною близько 0,1 грн. за кВт·годину. Крім того, послідовна комутація ВДК, кількість яких  $N_{ВДК}$  у складі БП  $Si$ -ФЕП зазвичай становить 20-60, забезпечує зростання  $U_{XX}$  таких приладів приблизно у  $N_{ВДК}$  разів порівняно з  $U_{XX}$  одноперехідних монокристалічними  $Si$ -ФЕП. Тому БП  $Si$ -ФЕП з ВДК є незамінними й для комплектації компактних високовольтних сонячних батарей, котрі вкрай необхідні для забезпечення роботи відповідного наземного і космічного устаткування, зокрема - електрореактивних двигунів космічних апаратів при їх польотах в межах Сонячної системи.

### **3.1.2 Фізика впливу магнітного поля на фотострум і вихідні параметри досліджуваних приладів**

Згідно з результатами експериментальних і аналітичних досліджень, узагальнених у [18], фотострум і вихідні параметри опромінюваних БП  $Si$ -ФЕП з ВДК змінюються під впливом однорідного стаціонарного магнітного поля (СМП) переважно завдяки комплексній дії виникаючих при цьому двох фізичних ефектів - фотоелектромагнітного ефекту Кікоїна-Носкова [20, 21] і ефекту модуляції часу життя  $\tau_{n,p}$  нерівноважних неосновних носіїв заряду (ННЗ) усередині ВДК таким СМП.

Фотоелектромагнітний (ФЕМ) ефект Кікоїна-Носкова виникає у просторово нерівномірно опромінюваному напівпровіднику, якщо його розташувати в однорідному СМП, спрямованому перпендикулярно до напрямку дифузії фотогенерованих нерівноважних носіїв заряду, і викликає

появу поперечної фото-ЕРС  $u_{ФЕМ}$  в напрямку, перпендикулярному до вектора  $\mathbf{S}$  Умова-Пойтінга (котрий співпадає з напрямком розповсюдження опромінюючого світлового потоку) та до вектора індукції магнітного поля  $\mathbf{B}$ .

Особливості виникнення ФЕМ ефекту в БП *Si*-ФЕП з ВДК схематично зображено на рисунку 3.3, де цифровим і літерним позначкам відповідають: 1 - ВДК з анізотипним  $p^+-n$  і ізотипним  $n^+-n$  гомопереходами; 2 – внутрішня металізація для послідовної комутації сусідніх ВДК; 3 – діелектричний шар (ДШ), виконуючий функцію пасивуючого і противідбивного покриття, який для підвищення ефективності роботи сучасних приладів такого типу модифікується срібними нанокластерами діаметром не більше 100 нм; 4 - зовнішній металевий електрод;  $h\nu$  – енергія квантів світла, котрі генерують нерівноважні електрони та дірки;  $\mathbf{F}_L$  – сила Лоренца і напрямки її дії на ці заряди при їх дифузії від фотоприймальної поверхні вглиб ВДК;  $w, l$  – планарні геометричні розміри фотоприймальної поверхні БП *Si*-ФЕП;  $t$  - товщина напівпровідникової складової приладу;  $t_{ДШ}$  – товщина ДШ;  $d, d_{n^+}$  і  $d_{p^+}$  - товщини ВДК,  $n^+$ - і  $p^+$ -шарів.

Як впливає з рисунку 3.3, при вказаній на ньому взаємній орієнтації векторів  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{B}$  і  $\mathbf{J}_\phi$ , що є оптимальною для позитивного впливу ФЕМ ефекту на фотострум і вихідні параметри БП *Si*-ФЕП з ВДК, на фотогенеровані електрони й дірки при їх дифузії з боку СМП діє сила Лоренца, яка відхиляє ці носії заряду в напрямку, перпендикулярному до напрямку дифузійної складової їх руху та до напрямку вектора  $\mathbf{B}$ . При цьому потоки електронів й дірок відхиляються магнітним полем в протилежні боки таким чином, що електрони спрямовуються до  $n^+$ -шару, а дірки – до  $p^+$ -шару, а це викликає виникнення позитивних доданків: сили струму  $I_{ФЕМ}$  до  $I_\phi = I_{K3}$  та  $U_{ФЕМ} = u_{ФЕМ}N_{ВДК}$  до  $U_{XX}$ . Завдяки цим доданкам відповідно до співвідношення

$$\eta = \frac{I_{K3} U_{XX} FF}{P_B} \quad (3.9)$$

збільшується і ККД таких приладів.

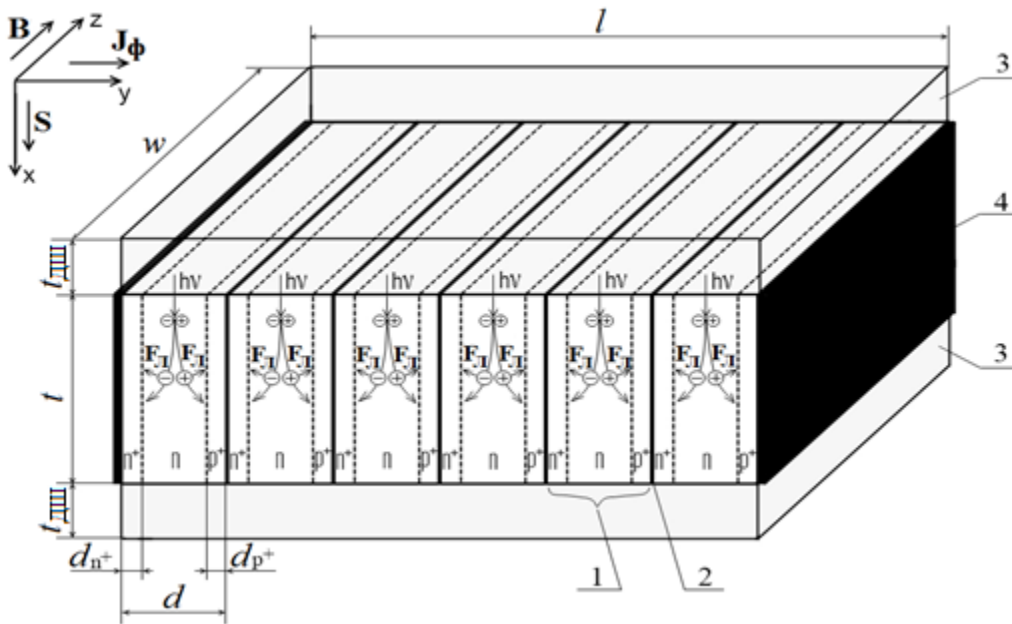


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення особливостей виникнення ФЕМ ефекту в БП Si-ФЕП з ВДК та взаємної орієнтації при цьому векторів  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{B}$  і густини фотоструму  $\mathbf{J}_\phi$

Згідно з [21] при низьких рівнях фотозбудження нерівноважних електронів і дірок

$$u_{\text{ФЕМ}} = q_e r dB (\mu_n + \mu_p) \beta LI / (h\nu t \sigma_0), \quad (3.10)$$

де:  $r$  – Холл-фактор;  $\mu_n$  і  $\mu_p$  – рухливості електронів і дірок;  $\beta$  – квантовий вихід;  $L$  – дифузійна довжина неосновних носіїв заряду (ННЗ);  $I$  - інтенсивність світлового потоку;  $h$  – стала Планка;  $\nu$  – частота світла;  $\sigma_0$  - питома темнова провідність базового напівпровідникового шару.

Зі співвідношення (3.10) випливає, що при низьких рівнях фотозбудження величини  $u_{\text{ФЕМ}}$ , а отже і  $U_{\text{ФЕМ}}$ , зростають зі зростанням інтенсивності

світлового потоку, а отже і  $K_B$ , а також зі зростанням індукції магнітного поля  $B$ .

При високому рівні фотозбудження відповідно до [21]

$$u_{\Phi EM} = rdDB/L, \quad (3.11)$$

$$D = kT\mu/q_e, \quad (3.12)$$

де:  $D$  – коефіцієнт дифузії ННЗ;  $\mu$  – рухливість ННЗ.

Як впливає зі співвідношення (3.11), при високому рівні фотозбудження величина  $u_{\Phi EM}$  насичується за інтенсивністю світлового потоку, але може далі збільшуватись зі зростанням  $B$ .

Відповідно до [21] величина  $I_{\Phi EM}$  пов'язана з  $u_{\Phi EM}$  співвідношенням

$$I_{\Phi EM} = u_{\Phi EM}/R_{ВДК}, \quad (3.13)$$

де:  $R_{ВДК}$  – опір опромінюваної ВДК в напрямку вектору  $\mathbf{J}_\Phi$ .

Очевидно також, що

$$I_{\Phi EM} = U_{\Phi EM}/(R_{ВДК}N_{ВДК}), \quad (3.14)$$

У [18] шляхом аналітичних оцінювальних розрахунків з використанням наведених вище співвідношень показано, що при  $B = 1$  Тл і високому рівні фотозбудження для типових БП Si-ФЕП з ВДК величини доданків до сили фотоструму і напруги холостого ходу за рахунок ФЕМ ефекту можуть бути такими:  $U_{\Phi EM} \sim 10^{-2} - 10^{-1}$  В,  $I_{\Phi EM} \sim 10^{-4} - 10^{-3}$  А.

Ефект модуляції часу життя ННЗ усередині ВДК однорідним СМП полягає у підвищенні величини  $\tau_{n,p}$  при зростанні  $B$  незалежно від напрямку  $\mathbf{B}$ . Вперше його було експериментально виявлено і досліджено у [18] та пов'язано зі зниженням швидкості рекомбінації нерівноважних ННЗ при дії СМП на електронну підсистему діодної структури ВДК. Встановлено, що завдяки цьому, наприклад, при  $B = 0,2$  Тл у ВДК на основі кремнію  $n$ -типу провідності величина  $\tau_p$  підвищується не менше, ніж на 5 %, зумовлюючи тим самим додатковий позитивний внесок у підвищення сили фотоструму й струму короткого замикання, а тому і у ККД приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК.

Таким чином, результуючий наслідок інтегрального впливу обох розглянутих вище ефектів на фотострум і вихідні параметри БП Si-ФЕП з ВДК полягає у наступному. При зображеній на рисунку 3.3 оптимальній орієнтації вектору  $\mathbf{B}$  відносно приладу позитивні внески дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих носіїв заряду при їх прямованні до сильно легованих шарів ВДК і ефекту модуляції часу життя ННЗ усередині ВДК однорідним СМП сумуються, що обумовлює виникнення максимальних інтегральних доданків до  $I_\phi$ ,  $I_{K3}$  та  $U_{XX}$ , а тому – й до ККД. Як експериментально показано у [18], при оптимальній орієнтації вектору  $\mathbf{B}$  і  $B = 0,2$  Тл ККД таких приладів зростає не менше, ніж у 1,1 рази. При протилежному напрямку вектору  $\mathbf{B}$  внесок дії сили Лоренца у не дифузійну складову транспорту фотогенерованих носіїв заряду при їх прямованні до сильно легованих шарів ВДК з очевидністю є негативним, а внесок ефекту модуляції часу життя ННЗ усередині ВДК однорідним СМП з незмінною величиною  $B$  залишається позитивним. Тому у цьому випадку інтегральні доданки до  $I_\phi$ ,  $I_{K3}$  та  $U_{XX}$ , а тому – й до ККД, залежать від кількісного співвідношення абсолютних величин внеску обох ефектів.

На рисунку 3.4 наведено типові приклади впливу модуля і напрямку вектору  $\mathbf{B}$  однорідного СМП на вихідні параметри сучасних БП Si-ФЕП з ВДК при оптимальній (1) і протилежній (2) орієнтаціях вектору  $\mathbf{B}$  відносно приладу.

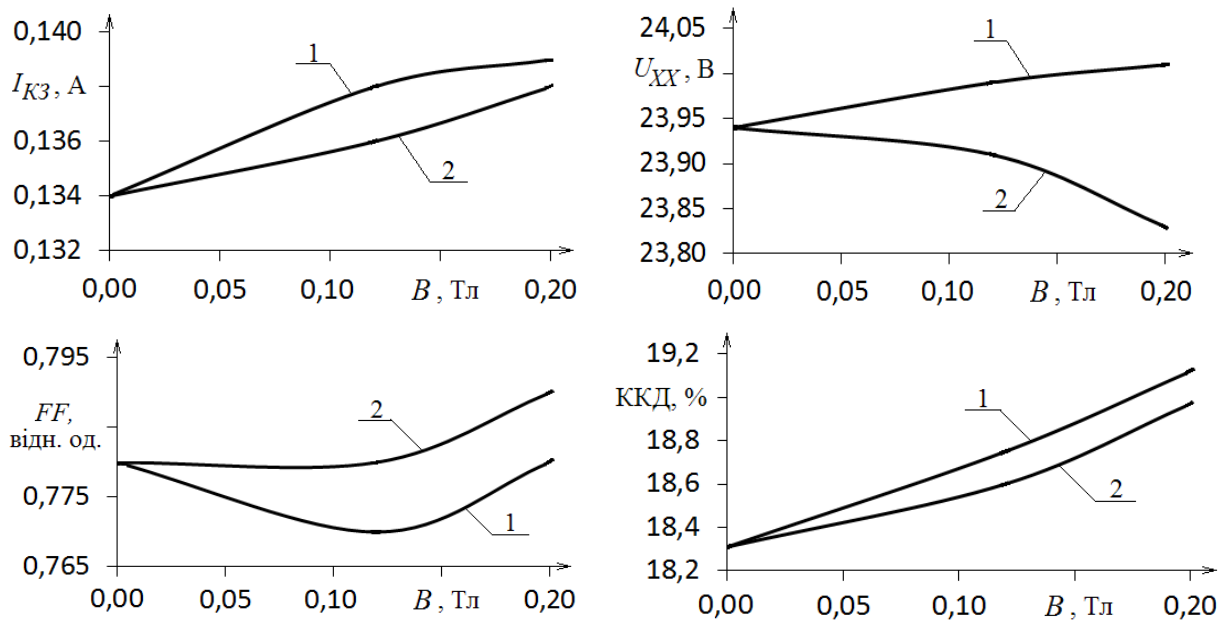


Рисунок 3.4 – Типові залежності вихідних параметрів БП Si-ФЕП з ВДК від модуля і орієнтації вектора індукції однорідного стаціонарного магнітного поля відносно приладу

### 3.2 Визначення фотоструму і вихідних параметрів

**досліджуваних приладів за їх навантажувальними світловими вольт-амперними характеристиками при різних умовах опромінювання у відсутності та під дією однорідного стаціонарного магнітного поля**

**3.2.1 Навантажувальна світлова вольт-амперна характеристика і її аналітичне опрацювання для визначення фотоструму і вихідних параметрів досліджуваних приладів**

Навантажувальною світловою вольт-амперною характеристикою (НС ВАХ) будь-якого фотоелектричного перетворювача є залежність сили струму  $I_H$  у опорі  $R_H$  зовнішнього навантаження, під'єданого до клем опромінюваного ФЕП, від напруги  $U_H$  на цьому опорі при зміні величини  $R_H$  в діапазоні значень  $0 \leq R_H \leq \infty$ .

Вимірювання та наступне аналітичне опрацювання НС ВАХ – це сучасний високоінформативний метод атестації таких приладів для визначення перелічених у пункті 3.1.1 їх вихідних параметрів поряд з силою фотоструму і діодними параметрами, що відповідають одnodіодній моделі ФЕП [5, 11]: силою діодного струму насичення  $I_0$ , коефіцієнтом ідеальності діода  $A$ , послідовним  $R_{\Pi}$  і шунтувальним  $R_{Ш}$  опорамі. Зазначене обумовлено тим, що якісний вигляд залежності  $I_H$  від  $U_H$  і кількісні співвідношення між  $I_H$  та  $U_H$  в усьому діапазоні значень  $0 \leq R_H \leq \infty$  пов'язані з фотострумом і діодними параметрами ФЕП відповідним рівнянням НС ВАХ, а вихідні параметри є функціями фотоструму і діодних параметрів ФЕП. Нижче наведено вказані співвідношення стосовно БП Si-ФЕП з ВДК.

Рівняння, що описує НС ВАХ таких приладів у одnodіодному наближенні є таким:

$$I_H = I_{\Phi} - I_0 \left\{ \left[ \exp \frac{q_e (U_H + I_H R_{\Pi})}{N_{ВДК} A k T} \right] - 1 \right\} - \frac{U_H + I_H R_{\Pi}}{R_{Ш}}. \quad (3.15)$$

Сила струму короткого замикання відповідає максимальному значенню  $I_H$ , яке досягається за умови фіксованого значення потужності випромінювання  $P_B$  на фотоприймальній поверхні приладу у випадку  $R_H = 0$  та  $U_H = 0$  (короткозамкнений прилад). Тому при  $R_{\Pi} \ll R_{Ш}$ , що є типовим для якісних приладів, величина  $I_{K3}$  пов'язана з  $I_{\Phi}$  і діодними параметрами співвідношенням

$$I_{K3} = I_{\Phi} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q_e I_{K3} R_{\Pi}}{N_{ВДК} A k T} \right) - 1 \right]. \quad (3.16)$$

Напруга холостого ходу відповідає максимальному значенню  $U_H$ , яке досягається для тих же умов опромінювання приладу при  $R_H = \infty$  і  $I_H = 0$

(зовнішнє коло розімкнене). Тому при  $R_{II} \ll R_{III}$  величина  $U_{XX}$  пов'язана з  $I_{\Phi}$  і діодними параметрами співвідношенням

$$U_{XX} = \frac{N_{ВДК} AkT}{q_e} \ln \left( \frac{I_{\Phi} - U_{XX} / R_{III}}{I_0} + 1 \right). \quad (3.17)$$

Фактор заповнення НС ВАХ і ККД неявно пов'язані з фотострумом і діодними параметрами приладу через величини  $I_{K3}$  і  $U_{XX}$  такими співвідношеннями:

$$FF = P_{HM} / (I_{K3} U_{XX}), \quad (3.18)$$

де:  $P_{HM}$  – максимальна корисна електрична потужність, яку прилад при тих же умовах опромінювання віддає у зовнішнє навантаження з оптимальним опором  $R_H^{onm}$ ;

$$P_{HM} = I_{HM} U_{HM}, \quad (3.19)$$

де:  $I_{HM}$  і  $U_{HM}$  – ордината і абсциса так званої точки максимальної потужності  $M$  на НС ВАХ, добуток яких є найбільшим за усі інші добутки координат кожної точки, що належить НС ВАХ;

$$R_H^{onm} = U_{HM} / I_{HM}; \quad (3.20)$$

$$\eta = \frac{P_{HM}}{P_B} \cdot 100\% = \frac{U_{XX} I_{K3} FF}{P_B} \cdot 100\%. \quad (3.21)$$

Типовий вигляд НС ВАХ, що описується співвідношенням (3.15), схематично наведено на рисунку 3.5. На цьому рисунку показані характерні

точки НС ВАХ, які відповідають двом вихідним параметрам БП *Si*-ФЕП з ВДК -  $I_{K3}$  і  $U_{XX}$ , а також точка  $M$  та її координати  $I_{HM}$  і  $U_{HM}$ , добуток яких згідно зі співвідношенням (3.19) визначає величину  $P_{HM}$ , а ділення  $U_{HM}$  на  $I_{HM}$  згідно зі співвідношенням (3.20) дає величину  $R_H^{onm}$ .

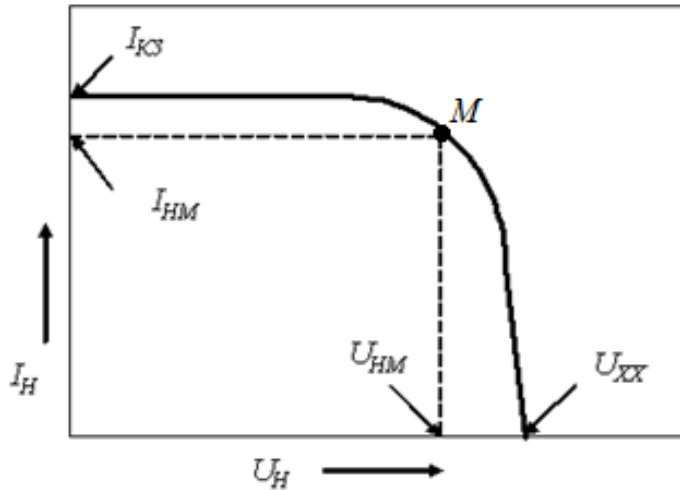


Рисунок 3.5 – Схематичне зображення типового вигляду навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики БП *Si*-ФЕП з ВДК

Тому концептуально алгоритм аналітичного опрацювання експериментальної НС ВАХ досліджуваного приладу припускає такі основні операції:

- 1) Побудова НС ВАХ за експериментально отриманим масивом координат  $(U_H, I_H)$  її точок при  $0 \leq R_H \leq \infty$ .
- 2) Визначення параметру  $I_{K3}$  як ординати точки НС ВАХ при  $U_H = 0$  і параметру  $U_{XX}$  як абсциси точки НС ВАХ при  $I_H = 0$ .
- 3) Визначення при використанні співвідношення (3.19) величини  $P_{HM}$  за координатами  $U_{HM}$  та  $I_{HM}$  точки  $M$ .
- 4) Визначення величини  $FF$  за співвідношенням (3.18).
- 5) Визначення ККД за співвідношенням (3.21).

При цьому слід мати на увазі, що операцію 3) з визначення величини  $P_{HM}$  необхідно виконувати наступним чином. Для кожної експериментальної точки НС ВАХ розраховується величина

$$P_H = I_H U_H, \quad (3.22)$$

яка є потужністю, що віддає досліджуваний прилад у навантаження з опором

$$R_H = U_H / I_H, \quad (3.23)$$

після чого здійснюється побудова залежності  $P_H$  від  $I_H$ , схематичне зображення якої наведено на рисунку 3.6. Як видно з вказаного рисунку, величині  $P_{HM}$  відповідає ордината точки екстремуму залежності  $P_H$  від  $I_H$ , а абсцисою цієї точки є величина  $I_{HM}$ .

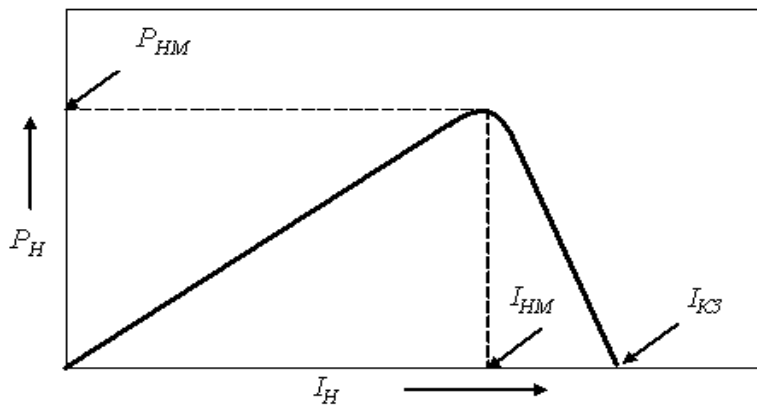


Рисунок 3.6 – Схематичне зображення залежності потужності, що віддає досліджуваний прилад у навантаження, від струму в опорі навантаження

На практиці зазначений алгоритм може бути реалізовано як за допомогою програми електронних таблиць Excel, так і при використанні існуючого на кафедрі ФМЕГ НТУ «ХПІ» спеціально розробленого для цього програмного забезпечення, автором розробки якого є доцент цієї кафедри А.В. Меріуц. У першому випадку величина  $I_\phi$  визначається як практично тотожна до  $I_{K3}$  досліджуваного приладу. У другому випадку завдяки більш високій точності аналітичного опрацювання експериментальної НС ВАХ величина  $I_\phi$  для БП Si-ФЕП з ВДК при  $K_B \leq K_B^{\max}$  може перевищувати  $I_{K3}$  на декілька відсотків.

### 3.2.2 Вимірювання навантажувальних світлових вольт-амперних характеристик досліджуваного приладу при різних умовах опромінювання у відсутності та під дією на нього однорідного стаціонарного магнітного поля

Тестування фотоелектричних перетворювачів і зокрема БП *Si*-ФЕП з ВДК за їх вихідними параметрами згідно з існуючими стандартами [11] має здійснюватись для приладів наземного призначення при опромінюванні, якому за умови  $K_B = 1$  відповідає так званий режим AM1,5G, що характеризується спектральним складом випромінювання, специфічним для сонячного, скорегованого земною атмосферою, і наведеним у [11], та питомою потужністю на фотоприймальній поверхні  $P_{B1}^* = 1000 \text{ Вт/м}^2$ . Прилади, призначені для роботи в заатмосферних умовах поблизу Землі, мають тестуватись при опромінюванні, якому у випадку  $K_B = 1$  відповідає так званий режим AM0, що характеризується спектральним складом випромінювання, специфічним для заатмосферного сонячного і також наведеним у [11], та  $P_{B1}^* = 1360 \text{ Вт/м}^2$ . При цьому величина  $P_{B1}$  у співвідношеннях (3.7) та (3.8) і величина  $P_B$  у співвідношеннях (3.8), (3.9) та (3.21) мають визначатись за формулами

$$P_{B1} = P_{B1}^* S, \quad (3.24)$$

$$P_B = K_B P_{B1}^* S, \quad (3.25)$$

де:  $S$  – площа фотоприймальної поверхні приладу.

У цій лабораторній роботі для опромінювання БП *Si*-ФЕП з ВДК при вимірюванні НС ВАХ використовується створений на кафедрі ФМЕГ НТУ «ХП» імпульсний імітатор сонячного випромінювання, який за умови  $K_B = 1$

здатний забезпечувати на фотоприймальній поверхні приладу амплітудне значення  $P_{B1}^* = 1360 \text{ Вт/м}^2$  та спектральний склад випромінювання, наближений до режиму АМ0. Вказаний імітатор складається зі студійного ксенонового фотоспалаху FALCON EYES SS-110В і масивного штативу, конструкція якого дозволяє контрольованим чином варіювати відстань  $l_{K_B}$  між лампою-спалахом і фотоприймальною поверхнею досліджуваного приладу, задаючи величиною  $l_{K_B}$  визначене шляхом попереднього калібрування необхідне значення  $K_B$ . При  $S \leq 100 \text{ см}^2$  це забезпечує можливість здійснювати однорідне опромінювання фотоприймальної поверхні з  $1 \leq K_B \leq 500$ , а при  $S \leq 10 \text{ см}^2$  і використанні додатково концентруючої профільованої насадки на апертурний отвір студійного ксенонового фотоспалаху величина  $K_B$  може бути підвищеною до 1000.

Зовнішній вигляд вказаного студійного ксенонового фотоспалаху показано на рисунку 3.7, а. Рисунок 3.7, б ілюструє цей фотоспалах у складі імпульсного імітатора при забезпеченні  $1 \leq K_B \leq 1000$ .

Вимірювання НС ВАХ досліджуваного приладу при застосуванні такого імпульсного імітатора здійснюють в лабораторній роботі за допомогою апаратурного комплексу, блок-схему якого наведено на рисунку 3.8, де цифровим і літерним позначкам відповідають: 1 – стабілізатор живлячої напруги типу SVEN AVR-3000; 2 - імпульсний імітатор сонячного світла; 3 – БП Si-ФЕП з ВДК; 4 - магазин змінних активних опорів  $R_H$  типу MAO-2; 5 - запам'ятовуючий цифровий осцилограф типу RIGOL DS1064В;  $h\nu$  - світло зі ступенем концентрації  $K_B$ , що залежить від відстані  $l_{K_B}$ . Вставка на рисунку ілюструє реальний вигляд залежності  $U_H$  від тривалості  $\tau$  світлового імпульсу на екрані осцилографу 5.

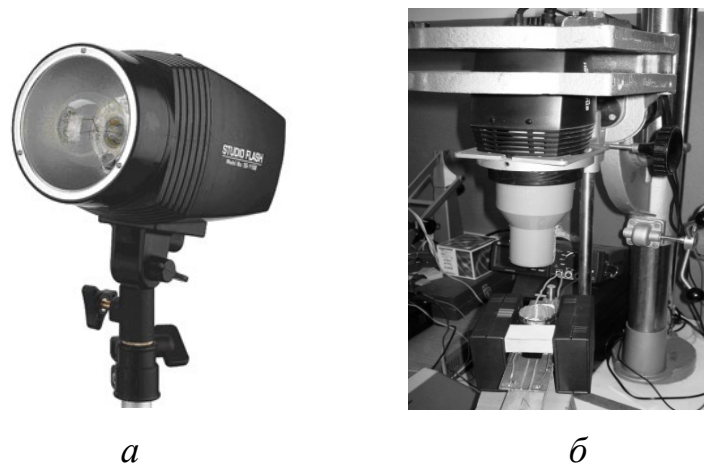


Рисунок 3.7 – Імпульсний імітатор сонячного випромінювання для вимірюванні навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики БП Si-ФЕП з ВДК при ступенях концентрації випромінювання  $1 \leq K_B \leq 1000$

Таке вимірювання супроводжується наступними процесами. При імпульсному опромінюванні від імітатора 1 досліджуваний прилад 2 генерує фотострум, тривалість амплітудного значення сили якого приблизно відповідає тривалості основної фази горіння ксенонової лампи-спалаху (яка складає 1-2 мс), що забезпечує необхідний режим опромінювання фотоприймальної поверхні приладу. Амплітудне значення сили фотоструму, ділячись на діодну компоненту (другий від'ємний доданок у співвідношенні (3.15)), витік через шунтувальний опір (третій від'ємний доданок у співвідношенні (3.15)) і амплітудне значення сили струму  $I_H$  у опорі навантаження 3 (зовнішнє коло), викликає появу амплітудного значення напруги  $U_H$  на опорі навантаження, величина якого  $R_H$  варіюється у діапазоні  $1 \leq R_H \leq 10^6$  Ом за допомогою магазину активних опорів типу MAO-2.

Це амплітудне значення  $U_H$  реєструється запам'ятовуючим цифровим осцилографом 4 типу RIGOL DS1064B, який працює у режимі очікуваної розгортки. Амплітудне значення сили струму  $I_H$  розраховується за цим амплітудним значенням  $U_H$  при використанні формули

$$I_H = U_H/R_H. \quad (3.26)$$

Дискретно змінюючи величину  $R_H$  у діапазоні значень  $1 \leq R_H \leq 10^6$  Ом і визначаючи аналогічним чином для кожного такого значення  $R_H$  амплітудні значення  $U_H$  та  $I_H$ , можна отримати необхідний масив відповідних даних для побудови вимірної вказаним способом НС ВАХ при заданому значенні  $K_B$ .

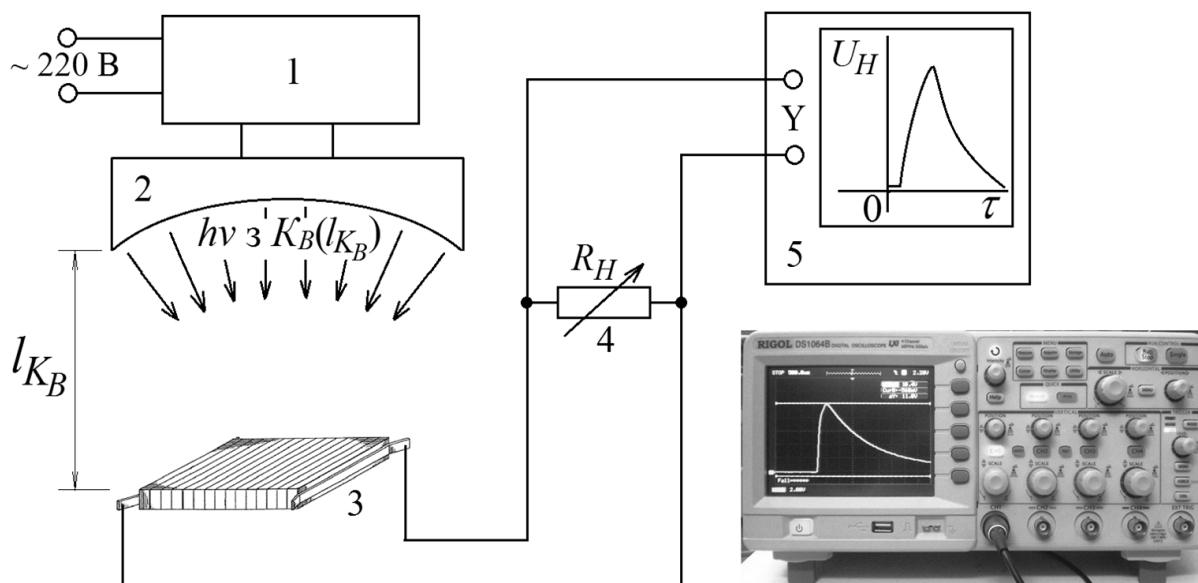


Рисунок 3.8 – Блок-схема для вимірювання напруги  $U_H$  на опорі навантаження  $R_H$  з прикладом реальної осцилограми залежності  $U_H$  від тривалості  $\tau$  світлового імпульсу на екрані осцилографу

Змінюючи відстань  $l_{KB}$  між лампою-спалахом і фотоприймальною поверхнею досліджуваного приладу відповідно до результатів попереднього калібрування імпульсного імітатора можна задавати заплановані у завданні до лабораторної роботи значення  $K_B$  та при кожному такому значенні  $K_B$  здійснювати описаним вище способом вимірювання НС ВАХ досліджуваного приладу.

Слід зазначити, що суттєвою перевагою використання режиму імпульсного опромінювання при вимірюванні НС ВАХ є запобігання радіаційному нагріванню приладу, що забезпечує суттєве підвищення

точності визначення його фотоструму і вихідних параметрів при заданій температурі.

Аналогічним чином вимірюються НС ВАХ досліджуваного приладу при різних значеннях  $K_B$  і за умови дії на БП Si-ФЕП з ВДК однорідного СМП. У цій лабораторній роботі таке СМП створюється у об'ємі приладу за допомогою показаного на рисунку 3.9 спеціально виготовленого магнітного блоку, до складу якого входять встановлені з протилежних боків в пластикових контейнерах паралельно один одному по 2 постійних магніти (прямокутний і круглий). В робочому зазорі між внутрішніми вертикальними пластиковими стінками блоку, де розташовується БП Si-ФЕП з ВДК, усі чотири разом вони створюють однорідне СМП з індукцією  $B = 0,2$  Тл. Смуриста позначка на корпусі блоку відповідає його північному магнітному полюсу. При видаленні двох протилежних круглих магнітів два прямокутні магніти, що залишаються, забезпечують у робочому зазорі магнітного блоку однорідне СМП з  $B = 0,12$  Тл.

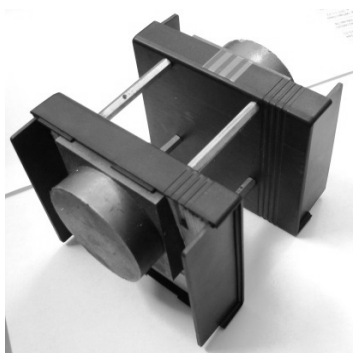


Рисунок 3.9 – Вигляд магнітного блоку зі знятими зовнішніми кришками двох його контейнерів, укомплектованого чотирма знімними постійними магнітами

Для дослідження впливу власно СМП на фотострум і вихідні параметри опромінюваного приладу вкрай суттєвим є забезпечення можливості його введення у робочий зазор магнітного блоку без порушення попереднього позиціонування відносно імпульсного імітатора та виключення можливості появи додаткового підсвічування приладу випромінюванням імітатора, що віддзеркалюється внутрішніми вертикальними пластиковими стінками блоку,

які обмежують його робочий зазор. Ці вимоги задовольняються завдяки використанню спеціальної конструкції тримача зразка у контактному пристрої під апертурним отвором імітатора і розташуванню зразка у контактному пристрої на вказаному тримачу усередині вертикально встановлюваної алюмінієвої трубки, верхній торець якої підноситься декілька вище пластикових контейнерів магнітного блоку. Вигляд досліджуваного приладу (а); приладу у контактному пристрої і з цим пристроєм на тримачу усередині алюмінієвої трубки (б), екрануючої прилад від випромінювання, віддзеркалюваного магнітним блоком; усього цього разом під імпульсним імітатором без магнітного блоку (в) і з магнітним блоком (г) наведено на рисунку 3.10, а-г.

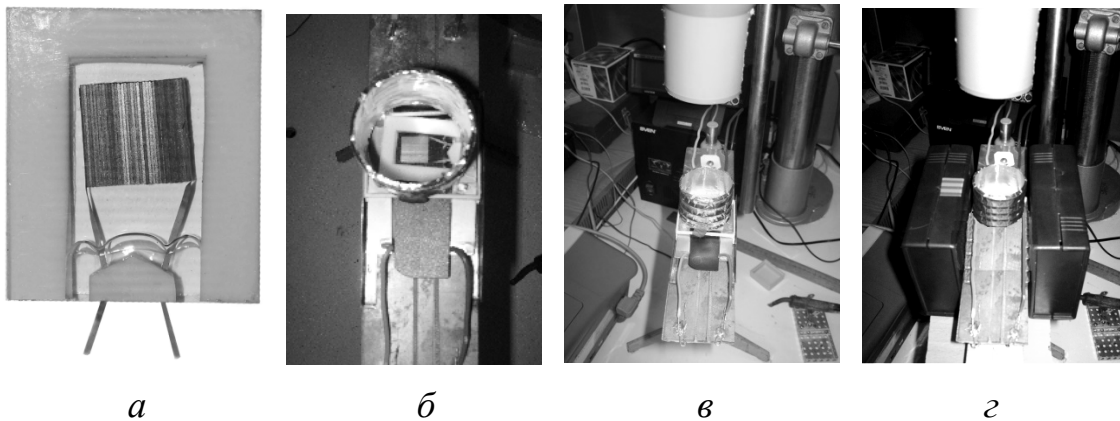


Рисунок 3.10 – Досліджуваний прилад і особливості його розташування під імпульсним імітатором сонячного випромінювання при вимірюванні НС ВАХ при різних ступенях його концентрації у відсутності та під дією однорідного стаціонарного магнітного поля

При дослідженні впливу СМП на фотострум і вихідні параметри БП Si-ФЕП з ВДК магнітний блок розташовується відносно приладу таким чином, щоб вектор  $\mathbf{B}$  індукції магнітного поля був спрямований при вимірюванні НС ВАХ спочатку, як на рисунку 3.3, що відповідає його оптимальній орієнтації, а при наступному вимірюванні НС ВАХ - у протилежному напрямку.

Слід також мати на увазі, що вимірювання НС ВАХ приладу при вказаних двох протилежних напрямках  $\mathbf{B}$  за умов  $B = const.$  й  $K_B = const.$  і наступне аналітичне опрацювання експериментальних результатів згідно з методикою, розробленою у [18], надає можливість роздільно визначати внески у позитивні доданки до  $I_\Phi$  та  $I_{K3}$ , що виникають внаслідок дії сили Лоренца на фотогенеровані носії заряду при їх прямуванні до сильно легованих шарів ВДК -  $\Delta I_\Phi(F_L)$  та  $\Delta I_{K3}(F_L)$ , і завдяки ефекту модуляції часу життя ННЗ усередині ВДК однорідним СМП -  $\Delta I_\Phi(\tau_{n,p})$  та  $\Delta I_{K3}(\tau_{n,p})$ .

Для цього згідно з [18] необхідно скористатися експериментально визначеними величинами сили струму короткого замикання приладу при  $B = 0$ , що позначається як  $I_{K3}(0)$ ; при оптимальному напрямку  $\mathbf{B}$ , що позначається як  $I_{K3}(B^+)$ ; при протилежному напрямку  $\mathbf{B}$ , що позначається як  $I_{K3}(B^-)$ .

За вказаними величинами  $I_{K3}$  внесок  $\Delta I_{K3}(\tau_{n,p})$  до  $I_{K3}(B^+)$  розраховується згідно з формулою

$$\Delta I_{K3}(\tau_{n,p}) = \frac{1}{2} [I_{K3}(B^+) + I_{K3}(B^-)] - I_{K3}(0), \quad (3.27)$$

а внесок  $\Delta I_{K3}(F_L)$  до  $I_{K3}(B^+)$  - згідно з формулою

$$\Delta I_{K3}(F_L) = I_{K3}(B^+) - I_{K3}(0) - \Delta I_{K3}(\tau_{n,p}). \quad (3.28)$$

Щодо внесків  $\Delta I_\Phi(\tau_{n,p})$  і  $\Delta I_\Phi(F_L)$  до  $I_\Phi(B^+)$ , то вони розраховуються згідно з формулами

$$\Delta I_\Phi(\tau_{n,p}) = \frac{1}{2} [I_\Phi(B^+) + I_\Phi(B^-)] - I_\Phi(0) \quad (3.29)$$

та

$$\Delta I_{\phi}(F_L) = I_{\phi}(B+) - I_{\phi}(0) - \Delta I_{\phi}(\tau_{n,p}), \quad (3.30)$$

де:  $I_{\phi}(0)$ ,  $I_{\phi}(B+)$  і  $I_{\phi}(B-)$  – сила фотоструму відповідно при  $B = 0$ , при оптимальному напрямку  $\mathbf{B}$  і протилежному напрямку  $\mathbf{B}$ .

### 3.3 Порядок виконання роботи

#### 3.3.1 Завдання для виконання роботи

Використовуючи імітоване сонячне випромінювання зі ступенями концентрації  $K_B \leq K_B^{\max}$ , а саме:  $K_B = 1$  (режим опромінювання АМ0),  $K_B = 50$  й  $K_B = 100$  - в умовах опромінювання досліджуваного БП Si-ФЕП з ВДК тільки з боку фронтальної фотоприймальної поверхні при рівноважній температурі приладу  $30 \pm 5$  °С виміряти його навантажувальні світлові вольт-амперні характеристики за відсутністю магнітного поля, а потім для  $K_B = 100$  – при дії на прилад однорідного стаціонарного магнітного поля з індукцією  $B = 0,2$  Тл - спочатку в оптимальному напрямку, а після цього – у протилежному напрямку.

Шляхом аналітичного опрацювання вимірних НС ВАХ визначити фотострум і вихідні параметри досліджуваного приладу в залежності від умов його опромінювання у відсутності та при дії вказаного магнітного поля.

За отриманими значеннями сили фотоструму і струму короткого замикання розрахувати внески у позитивні доданки до них, що виникають внаслідок дії сили Лоренца на фотогенеровані носії заряду при прямуванні останніх до сильно легованих шарів ВДК і завдяки підвищенню часу життя цих зарядів усередині ВДК під дією магнітного поля.

#### 3.3.2 Порядок дій

1. За наданими інструкціями, котрі знаходяться на робочому місці біля відповідного лабораторного устаткування, ознайомитись з особливостями використання імпульсного імітатора концентрованого сонячного випромінювання на основі студійного ксенонового фотоспалаху FALCON EYES SS-110B, стабілізатора живлячої його напруги типу SVEN AVR-3000, магазину активних опорів MAO-2 і мультиметру типу Mastech MS8040, що використовується у лабораторній роботі для термопарного контролю температури досліджуваного приладу.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного лабораторного устаткування підключити фотоспалах імітатора до стабілізатора живлячої його напруги, а останній разом з осцилографом типу RIGOL DS1064B (що належить до апаратурного комплексу, блок-схему якого наведено на рисунку 3.8) і мультиметром типу Mastech MS8040 - до електромережі з напругою  $\sim 220$  В для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача вмонтований у спеціальній контактній пристрій досліджуваній прилад типу БП Si-ФЕП з ВДК і вихідні дані щодо особливостей його конструктивно-технологічного рішення та сили струму  $I_{K31}$  при  $K_B = 1$  у режимі опромінювання АМ0 тільки з боку фронтальної фотоприймальної поверхні та при рівноважній температурі приладу протягом вимірювання його НС ВАХ.

4 Користуючись оптичним стереоскопічним мікроскопом типу МБС-9, при належних збільшеннях зображення визначити габаритні розміри приладу та його вертикальних діодних комірок, а також їх кількість, після чого занести ці дані, а також деякі важливі вихідні дані щодо приладу, надані викладачем, у таблицю 3.1, яка має бути оформленою подібно до наведеного нижче зразку.

Таблиця 3.1 – Тип кремнієвої діодної структури (Si-ДС:  $p^+-n-n^+$  або  $n^+-p-p^+$  типу) і кількість ВДК, характерні геометричні розміри ВДК і приладу в цілому (позначені як на рисунку 3.3) та площа  $S$  його фотоприймальної поверхні

Тип Si-ДС	$N_{ВДК}$ , одиниць	$w$ , см	$d$ , мкм	$t$ , мкм	$l$ , см	$S$ , см <sup>2</sup>

5. Встановити контактний пристрій з досліджуваним приладом і чорним екраном за тиловою поверхнею останнього на тримач під апертурним отвором імпульсного імітатора (як показано на рисунку 3.10, б, в) і розташувати поряд з приладом голівку термопар, після чого за допомогою з'єднувальних гнучких провідників у ізоляції, крокодилів і штекерів створити вимірювальне коло за схемою, показаною на рисунку 3.8, а термопару підключити до відповідних вхідних гнізд мультиметру типу Mastech MS8040.

6. Поверх контактної пристрою з досліджуваним приладом вертикально встановити вказану у пункті 3.2.2 алюмінієву трубку таким чином, щоб власне прилад знаходився (як показано на рисунку 3.10, б) в центрі її нижнього отвору, після чого забезпечити надійну фіксацію такого розташування трубки відносно приладу, наприклад, за допомогою фіксуючого компаунду.

7. Користуючись штативом, на якому закріплено тримач з приладом, та відповідними елементами конструкції штативу імпульсного імітатора, відцентрувати фронтальну фотоприймальну поверхню приладу відносно апертурного отвору імпульсного імітатора.

8. Для стабілізації досліджуваних фотоелектричних параметрів приладу попередньо опромінити його десятьма спалахами від імпульсного імітатора в режимі, що відповідає  $K_B = 100$  при відстані  $l_{K_B}$  між приладом і лампою-спалахом, яка визначається за силою струму  $I_{K3100}$  при забезпеченні  $K_B = 100$ , що розраховується відповідно до співвідношення (3.2) наступним чином:  $I_{K3100} = 100I_{K31}$ . Визначення цієї величини  $I_{K3100}$  здійснюється за експериментальним значенням напруги  $U_H$  на опорі навантаження  $R_H = 10$  Ом (що належним чином імітує режим короткого замкнення приладу) відповідно до співвідношення (3.26). Пауза між попереднім і наступним спалахами має

складати 60 секунд, що забезпечує повне відновлювання режиму опромінювання приладу імітатором. Після стабілізуючого опромінювання приладу за даними термопарного вимірювання зареєструвати його температуру  $T$ , що здійснювати також при усіх наступних вимірюваннях НС ВАХ.

9. Використовуючи у подальшому імітоване сонячне випромінювання з регламентованими завданням для лабораторної роботи ступенями концентрації, що забезпечуються у спосіб, подібний до наведеного вище, виміряти навантажувальні світлові вольт-амперні характеристики приладу при відсутності дії на прилад магнітного поля. Деталізація операцій, послідовне виконання яких надає можливість отримання масивів значень  $U_H$  та  $I_H$ , необхідних для побудови НС ВАХ при заданих значеннях  $K_B$ , і наступного їх аналітичного опрацювання, наведена у пункті 3.2.2. Рекомендації щодо діапазону варіювання і набору конкретних величин опорів навантаження  $R_H$ , які мають застосовуватись при вимірюванні НС ВАХ, отримати у викладача. Результати цих досліджень, а також добутки величин  $U_H$  і  $I_H$ , визначених при відповідних значеннях  $R_H$ , занести до таблиці 3.2, яку необхідно оформити згідно з наведеним нижче зразком.

Таблиця 3.2 – Використані при вимірюваннях НС ВАХ досліджуваного приладу ступені концентрації опромінюючого його випромінювання і величини опорів навантаження; температура приладу; отримані масиви значень  $U_H$  й  $I_H$  та розраховані за ними добутки  $I_H U_H$

$K_B$	1				50				100			
$T, ^\circ\text{C}$												
Номер виміру	$R_H$ , Ом	$U_H$ , В	$I_H$ , мА	$I_H U_H$ , мВт	$R_H$ , Ом	$U_H$ , В	$I_H$ , мА	$I_H U_H$ , мВт	$R_H$ , Ом	$U_H$ , В	$I_H$ , мА	$I_H U_H$ , мВт

10. Нарешті, за умови  $K_B = 100$  виміряти НС ВАХ досліджуваного приладу при дії на нього однорідного СМП магнітного блоку з  $B = 0,2$  Тл, зорієнтувавши вектор  $\mathbf{B}$  перед першим вимірюванням НС ВАХ у оптимальному відносно приладу напрямку ( $B^+$ ), а перед наступним вимірюванням НС ВАХ – у протилежному напрямку ( $B^-$ ). Усі маніпуляції з розташування магнітного блоку відносно досліджуваного приладу для забезпечення вказаної величини і напрямків вектору  $\mathbf{B}$  без порушення позиціонування приладу відносно апертурного отвору імпульсного імітатора виконувати за допомогою спеціально пристосованої до цього рухомої конструкції. Рекомендації щодо діапазону варіювання і набору конкретних величин опорів навантаження  $R_H$ , які мають застосовуватись при вимірюванні НС ВАХ приладу за умов дії на нього СМП, отримати у викладача. Результати цих досліджень, а також добутки величин  $U_H$  і  $I_H$ , визначених при відповідних значеннях  $R_H$ , занести до таблиці 3.3, яку необхідно оформити згідно з наведеним нижче зразком.

11. За масивами значень  $U_H$  й  $I_H$ , наведеними у таблицях 3.2 та 3.3, побудувати відповідні НС ВАХ досліджуваного приладу і, користуючись вказівками щодо їх аналітичного опрацювання, наданими у пункті 3.2.1, та величинами добутків  $I_H U_H$ , наведеними у тих же таблицях, визначити силу фотоструму й вихідні параметри в залежності від величини  $K_B$  та напрямку вектора індукції магнітного поля відносно цього приладу. Результати аналітичного опрацювання усіх вимірних НС ВАХ звести до таблиці 3.4, яку необхідно оформити згідно з наведеним нижче зразком.

Таблиця 3.3 – Масиви значень  $U_H$  й  $I_H$ , отримані при вимірюваннях НС ВАХ досліджуваного приладу (опромінюваного випромінюванням з  $K_B = 100$ ) під дією на нього однорідного СМП різних напрямків з  $B = 0,2$  Тл; використані величини опорів навантаження; температура приладу та розраховані добутки  $I_H U_H$

Напряг <b>B</b>	Оптимальний (B+)				Протилежний (B-)			
$T, ^\circ\text{C}$								
Номер виміру	$R_H,$ Ом	$U_H,$ В	$I_H,$ мА	$I_H U_H,$ мВт	$R_H,$ Ом	$U_H,$ В	$I_H,$ мА	$I_H U_H,$ мВт

Таблиця 3.4 – Результати аналітичного опрацювання усіх НС ВАХ досліджуваного приладу, виміряних при наведених у таблиці значеннях температури, ступенів концентрації імітованого сонячного випромінювання, модуля і напрямку вектору індукції магнітного поля відносно приладу (зірочкою «\*» позначено номери співвідношень, використовуваних при аналітичному опрацюванні НС ВАХ)

Напряг вектору <b>B</b>			Оптимальний	Протилежний	Примітки
$B, \text{Tл}$	0,0		+0,2	- 0,2	
$K_B, \text{відн. од.}$	1	50	100	100	(3.8)*
$T, ^\circ\text{C}$					
$I_\phi, \text{мА}$					(3.16)*
$I_{K3}, \text{мА}$					(3.16)*
$U_{XX}, \text{В}$					(3.17)*
$I_{HM}, \text{мА}$					(3.19)*
$U_{HM}, \text{В}$					(3.19)*
$P_{HM}, \text{мВт}$					(3.19)*
$FF, \text{відн. од.}$					(3.18)*
$KKД, \%$					(3.21)*

12. Користуючись отриманим і наведеними у таблиці 3.4 даними щодо величин  $I_\phi$  і  $I_{K3}$  при  $K_B = 100$  за відсутністю дії СМП на прилад, та при дії СМП на нього у оптимальному і протилежному напрямках, а також

співвідношеннями (3.27)-(3.30), розрахувати внески у позитивні доданки до  $I_\Phi$  та  $I_{K3}$ , що виникають внаслідок дії сили Лоренца на фотогенеровані носії заряду при їх прямуванні до сильно легованих шарів ВДК -  $\Delta I_\Phi(F_L)$  та  $\Delta I_{K3}(F_L)$ , і завдяки ефекту модуляції часу життя ННЗ усередині ВДК однорідним СМП -  $\Delta I_\Phi(\tau_{n,p})$  та  $\Delta I_{K3}(\tau_{n,p})$ . Результати цих розрахунків занести до таблиці 3.5, яку необхідно оформити згідно з наведеним нижче зразком.

13. Користуючись отриманим і наведеними у таблиці 3.4 даними щодо решти вихідних параметрів досліджуваного приладу при  $K_B = 100$  за відсутністю дії СМП на прилад, та при дії СМП на нього у оптимальному і протилежному напрямках, розрахувати абсолютні зміни цих параметрів  $\Delta U_{XX}$ ,  $\Delta FF$ ,  $\Delta P_{HM}$  й  $\Delta KKD$  під впливом СМП та занести до таблиці 3.6, яку необхідно оформити згідно з наведеним нижче зразком.

Таблиця 3.5 – Доданки до початкових значень сили фотоструму і струму короткого замикання досліджуваного приладу під впливом однорідного СМП різних напрямів ( $B = +0,2$  Тл – оптимальний;  $B = -0,2$  Тл – протилежний) при ступеню концентрації опромінюючого прилад випромінювання  $K_B = 100$

$B,$ Тл	$I_\Phi,$ мА	$\Delta I_\Phi,$ мА	$\Delta I_\Phi(F_L),$ мА	$\Delta I_\Phi(\tau_{n,p}),$ мА	$I_{K3},$ мА	$\Delta I_{K3},$ мА	$\Delta I_{K3}(F_L),$ мА	$\Delta I_{K3}(\tau_{n,p}),$ мА
0,0								
+0,2								
-0,2								

Таблиця 3.6 – Абсолютні зміни вихідних параметрів досліджуваного приладу під впливом однорідного СМП оптимального і протилежного напрямів ( $B = +0,2$  Тл – оптимальний;  $B = -0,2$  Тл – протилежний) при ступеню концентрації опромінюючого прилад випромінювання  $K_B = 100$

$B$ , Тл	$\Delta U_{XX}$ , В	$\Delta FF$ , відн. од.	$\Delta P_{HM}$ , мВт	$\Delta KKD$ , %
+0,20				
-0,20				

14. Зіставити результати, наведені в таблицях 3.5 й 3.6, та пояснити чинники існуючої між ними кореляції.

15. Приступити до оформлення звіту.

### 3.3.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Концепція методу дослідження, техніка і основні співвідношення, що використовуються для визначення досліджуваних фотоелектричних параметрів БП  $Si$ -ФЕП з ВДК при різних умовах опромінювання за відсутністю дії та у випадку дії на такий прилад однорідного стаціонарного магнітного поля різних напрямів.
3. Схематичне зображення досліджуваного приладу з літерними позначками геометричних розмірів основних елементів його конструкції.
4. Блок-схема для вимірювання навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики приладу.
5. Графіки виміряних навантажувальних світлових вольт-амперних характеристик приладу.
6. Заповнені таблиці 3.1-3.6.
7. Стисле обговорення результатів проведених досліджень.
8. Висновки.

### Запитання та завдання для самоперевірки

1. У чому полягають особливості конструкції приладів досліджуваного типу та їх фотоелектричних параметрів при концентрованому сонячному опромінюванні?

2. За яких причин залежність ККД приладів досліджуваного типу від ступеня концентрації сонячного випромінювання має екстремальний характер?

3. Прокоментувати основні складові фізики впливу стаціонарного магнітного поля на фотострум і вихідні параметри опромінюваного БП *Si*-ФЕП з ВДК.

4. Що є основними складовими концепції методу визначення фотоелектричних параметрів БП *Si*-ФЕП з ВДК за навантажувальною світловою вольт-амперною характеристикою приладу такого типу?

5. Які основні операції належать до методу вимірювання навантажувальних світлових вольт-амперних характеристик БП *Si*-ФЕП з ВДК при різних ступенях концентрації опромінюючого цей прилад випромінювання у випадку дослідження впливу магнітного поля на його фотоелектричні параметри?

6. Пояснити доцільність і переваги використання імпульсного імітованого сонячного випромінювання у порівнянні зі стаціонарним імітованим при вимірюванні НС ВАХ приладу типу БП *Si*-ФЕП з ВДК в умовах концентрованого світлового потоку.

7. Які основні операції припускає алгоритм аналітичного опрацювання експериментальної навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики БП *Si*-ФЕП з ВДК для визначення досліджуваних у лабораторній роботі фотоелектричних параметрів такого приладу?

8. Написати і прокоментувати співвідношення, що використовуються при аналітичному опрацюванні НС ВАХ приладу типу БП *Si*-ФЕП з ВДК для визначення досліджуваних у лабораторній роботі його фотоелектричних параметрів.

**ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ ПЕРЕВАЖНОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ  
В БАГАТОПЕРЕХІДНИХ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ ДІОДНИМИ  
КОМІРКАМИ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ІДЕАЛЬНОСТІ  
ЇХ ДІОДНОЇ СТРУКТУРИ**

Мета роботи – навчитися ідентифікувати область переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду в багатоперехідних монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах з вертикальними діодними комірками за коефіцієнтом ідеальності їх діодної структури, для визначення якого використовується залежність сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу таких приладів.

**4.1 Загальні відомості**

Як впливає зі співвідношень (3.16), (3.17) і (3.21), наведених у пункті 3.2.1 методичних вказівок до попередньої лабораторної роботи 3, ККД багатоперехідних монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комірками (БП  $Si$ -ФЕП з ВДК) суттєво залежить від їх двох важливих діодних параметрів – коефіцієнта ідеальності діодної структури  $A$  і сили діодного струму насичення  $I_0$ . З іншого боку, добре відомо [5, 22], що ці параметри визначаються областю переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду (ННЗ) в діодній структурі фотоелектричного перетворювача. Так, наприклад, теоретично показано, що при рекомбінації ННЗ лише за межами області збіднення анізотипного гомопереходу - у електронейтральній області -  $A_1 = 1$ , а при рекомбінації ННЗ тільки у області збіднення  $A_2 = 2$ . Показано, також, що для фотоелектричних перетворювачів з анізотипними гомопереходами однакової

площі  $I_{01} \ll I_{02}$  і ККД у першому випадку має бути помітно вищим, ніж у другому [22]. Між тим, для реальних фотоелектричних перетворювачів з анізотипними гомопереходами, до яких належать і прилади типу БП *Si*-ФЕП з ВДК, зазвичай  $A_1 < A < A_2$ , а  $I_{01} < I_0 < I_{02}$ , що вказує на перебіг рекомбінаційних процесів одночасно у обох зазначених вище областях діодної структури таких приладів. Однак при цьому величина  $A$  приймає характерні кількісні значення в залежності від області переважної рекомбінації ННЗ.

Якщо областю їх переважної рекомбінації є електронейтральна область, то

$$1 < A < 1,4. \quad (4.1)$$

Якщо областю переважної рекомбінації ННЗ є область збіднення, то

$$1,5 < A < 2,0. \quad (4.2)$$

Істотно, що у зв'язку з викладеним вище експериментальне визначення величини  $A$  для БП *Si*-ФЕП з ВДК є вкрай актуальним на стадії подальшого удосконалення конструктивно-технологічного рішення (КТР) таких приладів з метою контролю за впливом модифікації КТР на область переважної рекомбінації ННЗ у їх ВДК. В цій лабораторній роботі використовується акцентований у [11] метод визначення величини  $A$  за залежністю сили струму короткого замикання  $I_{КЗ}$  від напруги холостого ходу  $U_{ХХ}$  фотоелектричного перетворювача.

## **4.2 Визначення коефіцієнту ідеальності діода за залежністю сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу багатоперехідного кремнієвого фотоелектричного перетворювача**

### **4.2.1 Стисле аналітичне обґрунтування методу**

Для приладів типу БП Si-ФЕП з ВДК характерними є вкрай низький послідовний опір і досить високий шунтувальний опір ВДК. У зв'язку з цим при рівнях концентрації опромінюючого їх фотоприймальну поверхню сонячного випромінювання  $K_B \leq 100$  співвідношення (3.17), яке було наведено для  $U_{XX}$  таких приладів у лабораторній роботі 3, можна спростити до вигляду:

$$U_{XX} = \frac{N_{ВДК} AkT}{q_e} \ln \left( \frac{I_{K3}}{I_0} \right), \quad (4.3)$$

де:  $N_{ВДК}$  – кількість послідовно з'єднаних ВДК у складі приладу;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $q_e$  – абсолютне значення заряду електрона.

Знайдена з цього співвідношення залежність  $I_{K3}$  від  $U_{XX}$  описується у такий спосіб:

$$I_{K3} = I_0 \exp \left( \frac{q_e U_{XX}}{N_{ВДК} AkT} \right). \quad (4.4)$$

Логарифмування такої залежності  $I_{K3}$  від  $U_{XX}$  десятичним логарифмом призводить до

$$\lg I_{K3} = \lg I_0 + \frac{q_e U_{XX}}{N_{ВДК} AkT} \lg e, \quad (4.5)$$

де:  $e = 2,718\dots$  - основа натурального логарифму;  $\lg e \approx 0,434$ .

Цій залежності відповідає графік з лінеаризацією у координатах  $\lg I_{K3} - U_{XX}$ , показаний на рисунку 4.1.

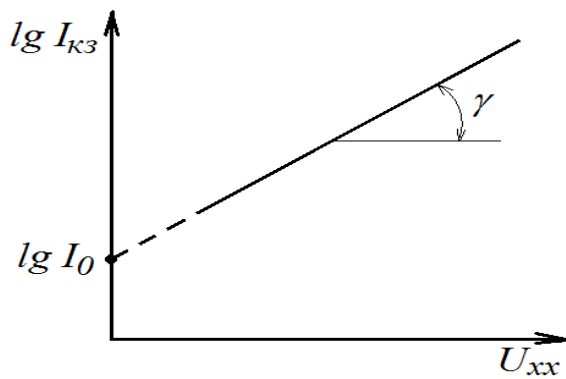


Рисунок 4.1 – Графік залежності  $I_{KЗ}$  від  $U_{XX}$ , що описується співвідношенням (4.5)

Як видно з рисунку 4.1, вказаний графік є прямолінійним похилим відрізком з кутом нахилу  $\gamma$  до осі абсцис  $0U_{XX}$ , за яким величина  $A$  розраховується у такий спосіб:

$$A = \frac{q_e \lg e}{N_{ВДК} k T \operatorname{tg} \gamma} \quad (4.6)$$

При екстраполяції цього графіка до його перетину з віссю ординат при  $U_{XX} = 0$  він відсікає на цій осі відрізок величиною  $\lg I_0$ , за яким може бути знайденою величина сили діодного струму насичення.

#### **4.2.2 Експериментальне отримання залежності сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу багатоперехідного кремнієвого фотоелектричного перетворювача**

Відповідно до [11] залежність  $I_{KЗ}$  від  $U_{XX}$  отримується шляхом визначення цих вихідних параметрів досліджуваного приладу при різних потужностях випромінювання  $P_B$  на його фотоприймальній поверхні. Детальне обговорення техніки подібного експерименту було здійснено у підрозділі 3.2 попередньої лабораторної роботи 3. Згідно з викладеним у підрозділі 3.2 для варіювання

величиною  $P_B$  необхідно змінювати ступень концентрації імітованого сонячного випромінювання і у разі використання імпульсного імітатора цифровим запам'ятовуючим осцилографом реєструвати амплітудне значення напруги  $U_H$  на під'єднаному до БП Si-ФЕП з ВДК опорі навантаження, який при визначенні  $U_{XX}$  має бути нескінченно великим, а при визначенні  $I_{K3}$  – якомога малим.

Оскільки при виконанні лабораторної роботи 3 при трьох різних значеннях ступеня концентрації імітованого сонячного випромінювання ( $K_B = 1$ ,  $K_B = 50$  і  $K_B = 100$ ) за відсутності дії магнітного поля на БП Si-ФЕП з ВДК ( $B = 0$ ) було експериментально визначено параметри  $I_{K3}$  і  $U_{XX}$  досліджуваного приладу, то у цій лабораторній роботі вони можуть бути використаними, як вихідні для залежності  $I_{K3}$  від  $U_{XX}$ .

### **4.3 Порядок виконання роботи**

#### **4.3.1 Завдання для виконання роботи**

Використовуючи експериментально визначені в попередній лабораторній роботі при трьох різних ступенях концентрації імітованого сонячного випромінювання ( $K_B = 1$ ,  $K_B = 50$  і  $K_B = 100$ ) параметри  $I_{K3}$  і  $U_{XX}$  БП Si-ФЕП з ВДК як вихідні для залежності  $I_{K3}$  від  $U_{XX}$  та метод аналітичного опрацювання цієї залежності, викладений в пункті 4.2.1, розрахувати коефіцієнт ідеальності діода для ВДК досліджуваного приладу, після чого за його величиною ідентифікувати область переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду у ВДК такого приладу.

#### **4.3.2 Порядок дій**

1. Користуючись таблицею 3.4, заповненою при виконанні лабораторної роботи 3 (у її частині, що відповідає  $B = 0$ ), відповідно до наведеного нижче

зразка створити таблицю 4.1 з даними щодо сили струму короткого замикання в залежності від напруги холостого ходу досліджуваного приладу при різних рівнях ступеня концентрації імітованого сонячного випромінювання на фотоприймальній поверхні БП Si-ФЕП з ВДК, доповнивши її значеннями дестичних логарифмів величин  $I_{K3}$ .

Таблиця 4.1 – Сила струму замикання в залежності від напруги холостого ходу досліджуваного приладу при різних ступенях концентрації імітованого сонячного випромінювання на його фотоприймальній поверхні

$K_B$ , відн. од.	1	50	100
$I_{K3}$ , А			
$\lg(I_{K3}, \text{А})$			
$U_{XX}$ , В			

2. За відповідними даними, наведеними в таблиці 4.1, побудувати графік залежності  $\lg I_{K3}$  від  $U_{XX}$ , подібний до зображеного на рисунку 4.1.

3. Користуючись співвідношенням (4.6) та відомим з попередньої лабораторної роботи 3 значенням  $N_{ВДК}$ , за тангенсом кута  $\gamma$  нахилу графіка цієї залежності до осі  $OU_{XX}$  розрахувати коефіцієнт ідеальності діода  $A$  для ВДК досліджуваного приладу.

4. За величиною  $\lg I_0$ , яку слід знайти шляхом екстраполяції побудованого графіка до перетину з віссю ординат, і за площею ВДК, що перпендикулярна до напрямку протікання фотоструму, визначити величину  $I_0$  і густину  $J_0$  сили діодного струму насичення усередині ВДК.

5. Порівнюючи знайдену величину  $A$  з її значеннями у співвідношеннях (4.1) і (4.2), ідентифікувати область переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду у ВДК досліджуваного приладу.

6. Зіставити отримане значення  $J_0$  з літературними даними щодо цього параметру в залежності від області переважної рекомбінації фотогенерованих ННЗ в інших кремнієвих фотоелектричних перетворювачах.

7. Приступити до оформлення звіту.

### 4.3.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Стислий опис конструкції досліджуваного приладу і дані щодо його ККД при ступенях концентрації випромінювання від 1 до 100.
3. Стисле аналітичне обґрунтування методу ідентифікації області переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду у ВДК такого приладу.
4. Концепція методу експериментального отримання залежності сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу багатоперехідного кремнієвого фотоелектричного перетворювача.
5. Заповнена таблиця 4.1.
6. Рисунок 4.1 з побудованим за таблицею 4.1 графіком залежності  $\lg I_{KZ}$  від  $U_{XX}$ , на якому мають бути показані кут  $\gamma$  нахилу графіку до осі  $OU_{XX}$ , а також ордината точки перетину продовження графіка з віссю ординат при  $U_{XX} = 0$ .
7. Розрахунки величин  $A$ ,  $I_0$  та  $J_0$ .
8. Результати ідентифікації області переважної рекомбінації фотогенерованих неосновних носіїв заряду у ВДК досліджуваного приладу та зіставлення отриманого значення  $J_0$  з літературними даними щодо цього параметру в залежності від області переважної рекомбінації фотогенерованих ННЗ в інших сучасних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах.
9. Висновки.

**Запитання та завдання для самоперевірки**

1. Як за величиною коефіцієнта ідеальності діода визначається область переважної рекомбінації фотогенерованих ННЗ в кремнієвих фотоелектричних перетворювачах?
2. Чому інформація щодо цієї області є практично важливою?
3. Що є фізичним підґрунтям для визначення коефіцієнта ідеальності діода за залежністю сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу досліджуваного приладу?
4. Як експериментально може бути досліджена залежність сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу приладу типу БП  $Si$ -ФЕП з ВДК?
5. З яких операцій складається аналітичне опрацювання цієї залежності для визначення коефіцієнта ідеальності діода і густину сили діодного струму насичення усередині ВДК?
6. Ознайомитись з існуючими літературними даними стосовно залежності густину сили діодного струму насичення від області переважної рекомбінації фотогенерованих ННЗ в сучасних монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах різного походження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. — 480 с.
2. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. –М.: МИФИ, 2005. – 492 с.
3. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. Нанoeлектроника. – М.: БИНОМ, 2009. – 223 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

5. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

6. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

7. Методичні вказівки до лабораторних робіт «Визначення питомого електричного опору однорідних напівпровідників і тонких напівпровідникових шарів» з розділу «Контактні та безконтактні методи визначення питомого електричного опору напівпровідників» дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів» для студентів напряму підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка» / Уклад.: В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов, М.В. Кіріченко, Р.В. Зайцев. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 48 с.

8. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Визначення параметрів діодних напівпровідникових композицій методом темної вольт-амперної характеристики» з курсу «Фізичні методи дослідження електронних властивостей напівпровідникових композицій» / Упоряд.: В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов. – Харків: ХПІ, 1993. – 9 с.

9. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Визначення висоти потенціального бар'єра й концентрації легуючої домішки в діодних напівпровідникових композиціях методом темної вольт-фарадної характеристики» з курсу «Фізичні методи дослідження електронних властивостей напівпровідникових композицій» / Упоряд.: В.Р. Копач. – Харків: ХПІ, 1993. – 8 с.

10. Графф К., Фишер Г. Время жизни носителей в кремнии и его влияние на характеристики солнечных элементов // В кн.: Преобразование солнечной энергии. Вопросы физики твердого тела / Под ред. Б. Серафина. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 151-189.

11. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. – М.: Наука, 1985. – 280 с.

12. Kopach V.R., Kirichenko M.V., Shramko S.V. et al. Back surface reflector optimization for thin single crystalline silicon solar cells // *Functional Materials*. – 2007. - V. 14. – No. 4. – P. 555-561.

13. Колтун М.М. Солнечные элементы / М.М. Колтун – М.: Наука, 1987. – 210 с.

14. Mahan J., Ekstedt T., Frank R., Kaplow R. Measurement of minority carrier lifetime in solar cells from photo-induced open-circuit voltage decay // *IEEE Trans. Electron Dev.* – 1979. - V. ED-26. - No. 5. - P. 1357 – 1364.

15. Патент на корисну модель № 33676. Україна, МПК G01R 31/26, H01L 21/66. Світлодіодний освітлювач / Кіріченко М.В., Зайцев Р.В., Копач В.Р., Хрипунов Г.С., Лісачук Г.В. Заявлено 04.02.2008; Зареєстровано 10.07.2008, Бюл. № 13.

16. Кіріченко М.В. Удосконалення кремнієвих фотоелектричних перетворювачів широкомасштабного застосування та методів їх атестації. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, 2011.

17. Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы / Д.С. Стребков - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010, - Т. 3. - 314 с.

18. Зайцев Р.В. Застосування магнітного поля для підвищення ККД кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, 2013.

19. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. – М.: Мир, 1986. – 435 с.

20. Кикоин И.К. Фотоэлекромагнитный эффект / И.К. Кикоин, С.Д. Лазарев // *УФН*. - 1978. - Т. 124. - Вып. 4. - С. 597-617.

21. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 416 с.

22. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 2. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. Визначення електронних параметрів діодних структур з анізотипним й ізотипним гомопереходами за їх темновими вольт-амперною та вольт-фарадною характеристиками.....	4
1.1. Загальні відомості.....	4
1.1.1. Місце діодних структур з анізотипним й ізотипним переходами у виробках сучасної електронної техніки.....	4
1.1.2. Фізичні передумови можливості визначення досліджуваних електронних параметрів зазначених діодних структур за їх темновими вольт-амперною і вольт-фарадною характеристиками.....	5
1.2. Вимірювання і аналітичне опрацювання темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик.....	8
1.2.1. Вимірювання темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик.....	8
1.2.2. Аналітичне опрацювання виміряних темнових вольт-амперної та вольт-фарадної характеристик.....	9
1.3. Порядок виконання роботи .....	12
1.3.1. Завдання для виконання роботи .....	12
1.3.2. Порядок дій .....	12

1.3.3. Зміст звіту.....	15
Запитання для самоперевірки.....	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. Визначення часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в опромінюваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах.....	17
2.1. Загальні відомості .....	17
2.1.1. Вплив часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в базових кристалах кремнієвих фотоелектричних перетворювачів на їх ККД.....	17
2.1.2. Фізичні передумови можливості дослідження розподілу часу життя і дифузійної довжини ННЗ в базових кристалах кремнієвих ФЕП при варіюванні спектрального складу опромінюючого їх світла.....	18
2.2. Сутність методу загасання напруги холостого ходу кремнієвих ФЕП після раптового припинення їх опромінювання.....	21
2.3. Експериментальна реалізація методу загасання напруги холостого ходу кремнієвих ФЕП після раптового припинення їх опромінювання.....	22
2.4. Порядок виконання роботи .....	24
2.4.1. Завдання для виконання роботи .....	24
2.4.2. Загальна характеристика об'єктів дослідження .....	24
2.4.3. Порядок дій .....	25
2.4.4. Зміст звіту.....	26
Запитання та завдання для самоперевірки.....	27
 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. Дослідження впливу умов опромінювання та магнітного поля на фотострум і вихідні параметри багатоперехідних	 28

кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з вертикальними діодними комітками.....	
3.1. Загальні відомості .....	28
3.1.1. Місце досліджуваних приладів у сучасній геліоенергетиці, особливості їх конструкції та фотоелектричних параметрів при концентрованому сонячному випромінюванні.....	28
3.1.2. Фізика впливу магнітного поля на фотострум і вихідні параметри досліджуваних приладів.....	32
3.2. Визначення фотоструму і вихідних параметрів досліджуваних приладів за їх навантажувальними світловими вольт-амперними характеристиками при різних умовах опромінювання у відсутності та під дією однорідного стаціонарного магнітного поля.....	35
3.2.1. Навантажувальна світлова вольт-амперна характеристика і її аналітичне опрацювання для визначення фотоструму і вихідних параметрів досліджуваних приладів.....	35
3.2.2. Вимірювання навантажувальних світлових вольт-амперних характеристик досліджуваного приладу при різних умовах опромінювання у відсутності та під дією на нього однорідного стаціонарного магнітного поля.....	38
3.3. Порядок виконання роботи .....	43
3.3.1. Завдання для виконання роботи .....	43
3.3.2. Порядок дій .....	44
3.3.3. Зміст звіту .....	48
Запитання та завдання для самоперевірки.....	49
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. Визначення області переважної рекомбінації в багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах з вертикальними діодними комітками за коефіцієнтом ідеальності їх діодної структури.....	50

4.1. Загальні відомості.....	50
4.2. Визначення коефіцієнту ідеальності діода за залежністю сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу багатоперехідного кремнієвого фотоелектричного перетворювача	51
4.2.1. Стисле аналітичне обґрунтування методу.....	51
4.2.2. Експериментальне отримання залежності сили струму короткого замикання від напруги холостого ходу багатоперехідного кремнієвого фотоелектричного перетворювача	52
4.3. Порядок виконання роботи.....	53
4.3.1. Завдання для виконання роботи.....	53
4.3.2. Порядок дій.....	53
4.3.3. Зміст звіту.....	54
Запитання та завдання для самоперевірки.....	54
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	55

Навчальне видання

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни «Електронний захист»  
для студентів спеціальності денної форми навчання  
за спеціальністю «Електроніка, електронні комунікації,  
приладобудування та радіотехніка»  
Частина 1

Укладач:  
ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович  
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович  
МІНАКОВА Ксенія Олександрівна  
ДОБРОЖАН Андрій Ігорович

Відповідальний за випуск проф. Зайцев Р.В.  
Роботу до видання рекомендував доц. Конотопський Л.Є.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 563

Підп. до друку \_\_\_\_\_ Гарнітура Times New Roman.  
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
Електронна версія