

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**5472 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни **«Електронні системи в геліоенергетиці»**  
для студентів *171 «Електроніка»*  
освітньої програми «Електронні системи»  
усіх форм навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2022

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Електронні системи в геліоенергетиці» / укладачі: О. А. Доброжан, А. С. Опанасюк, О. В. Д'яченко, О. А. Любивий.  
– Суми : Сумський державний університет, 2022. – 71 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

## Загальні методичні вказівки

Лабораторні роботи з навчальної дисципліни «Електронні системи в геліоенергетиці» сприяють поглибленню й закріпленню знань студентів у сфері геліоенергетики, розвивають у них навички проведення наукових досліджень.

Метою робіт є набуття практичного досвіду:

- експериментального визначення основних характеристик фотоперетворювачів;
- оптимізації характеристик реальних сонячних елементів (СЕ).

Під час підготовки до лабораторних робіт студент повинен:

- вивчити лекційний матеріал згідно з контрольними запитаннями до лабораторної роботи;
- усвідомити мету й завдання експериментальних досліджень;
- продумати план досліджень і передбачити їх очікувані результати;
- навести у звіті з лабораторних робіт розрахунки фізичних величин, таблиці, графіки, тобто те, що потрібно для оброблення результатів експерименту й одержання кінцевих результатів.

Студента допускають до роботи лише в тому разі, коли він виявив достатній рівень володіння теоретичним матеріалом під час опитування, що проводять на початку заняття.

Під час виконання лабораторної роботи студент повинен:

- обережно ставитися до лабораторних установок, вимірювальної апаратури, приладів, характеристики яких досліджуються;
- пильно виконувати вимоги техніки безпеки;
- вмикання джерел електроживлення здійснювати після того, як викладач (інженер лабораторії) перевірів правильність збирання схеми досліджень і дав дозвіл на подальше виконання роботи;
- експериментальні дослідження виконувати згідно з ходом роботи, розміщеної в описі цієї лабораторної роботи;

- дослідні дані, одержані під час виконання роботи, порівнювати з даними теорії. У разі значного розходження теоретичних і дослідних даних повторити дослідження;

- заповнювати звіти в чистовику після перевірки викладачем результатів у чернетці.

Після закінчення лабораторної роботи студент повинен:

- вимкнути лабораторну установку, навести порядок на робочому місці й показати робоче місце інженерові лабораторії для перевірки його стану;

- здати викладачеві письмовий звіт із лабораторної роботи на перевірку.

Письмовий звіт із лабораторної роботи виконують у зошиті, він повинен містити назву роботи, її мету, короткі теоретичні відомості, опис приладів і пристроїв, що використовували під час дослідження; схеми досліджень, розрахункові формули й результати розрахунків, таблиці, графіки, аналіз результатів досліджень, висновки до роботи.

Звіт заповнюють акуратно ручкою. Графіки потрібно будувати з використанням відповідного програмного забезпечення (програми EXEL, ORIGIN, тощо) або з використанням кольорових олівців (ручок) на міліметровій бумазі, під час роботи обов'язково відзначати точки, за якими будували залежності, указувати досліджувані величини та їх розмірності.

Роботу вважають виконаною після її затвердження викладачем.

## **Правила техніки безпеки**

1. Перед вмиканням лабораторної установки необхідно вивчити її конструкцію й особливості експлуатації, здійснити ретельний її огляд, перевірити правильність збирання схеми, надійність контактів в електричних колах і справність заземлення. Необхідно твердо знати розміщення елементів і контактів, на яких діє небезпечна для життя напруга.

Пам'ятайте, що напруга 24 В змінного струму та 50 В постійного струму небезпечні для життя людини.

2. Вмикання установки без дозволу викладача або інженера лабораторії суворо заборонено.

3. Перед вмиканням установки потрібно попередити товаришів по бригаді. На момент вмикання потенціометри блоків живлення мають обов'язково бути в крайньому лівому положенні.

4. Під час вмикання експериментальної установки й роботи на ній необхідно перебувати на діелектричних килимках.

5. Будь-які переключення, зміни сполучень елементів у схемах потрібно здійснювати лише при вимкнених джерелах живлення.

6. Під час роботи заборонено відключати роз'єми, замінити запобіжники та здійснювати ремонт. Слідкувати, щоб у вихідному колі не було перевантажень, пов'язаних із різким збільшенням струму.

7. Під час виконання налаштувань необхідно користуватися інструментами з ізольованими ручками, а також, якщо можна, працювати однією рукою.

8. Не торкатися відкритими частинами тіла поверхонь реостатів і контактів, що проводять струм.

9. У випадку ураження будь-кого з оточуючих струмом необхідно вимкнути лабораторну установку або загальне електроживлення лабораторії, викликати лікаря й до його приходу робити потерпілому штучне дихання або масаж серця.

10. Додержуватися суворого порядку в лабораторії, виконувати всі правила техніки безпеки й вимагати того самого від товаришів. Пам'ятайте, що нехтування цими правилами може призвести до тяжких наслідків!

За зіпсування лабораторного обладнання винні несуть матеріальну відповідальність.

### **Опис лабораторної установки**

Лабораторна установка, зовнішній вигляд якої показаний на рисунку 1, складається з комбінованого блока живлення, що містить лівий блок живлення на 5 В і правий блок живлення на

50 В, стрілкових вимірювальних приладів 1, 2, 3, цифрового вольтметра 19 та комутаційної плати 18.

Робота лівого та правого блоків живлення й досліджуваної схеми контролюється вимірювальними приладами: вольтметрами 1, міліамперметрами 2, мікроамперметрами 3.

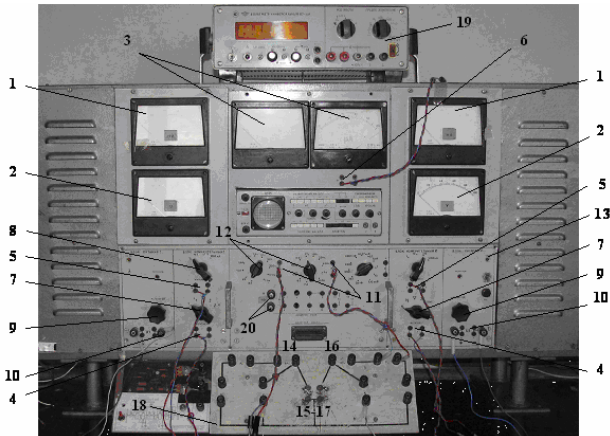


Рисунок 1

Рисунок 1 – Лабораторна установка для дослідження електричних характеристик напівпровідникових приладів

До вхідних гнізд вимірювальних приладів (рис. 1) підпаяні проводи:

- дроти 4 – до гнізд вольтметрів;
- дроти 5 – до гнізд міліамперметрів;
- дроти 6 – до гнізд мікроамперметрів.

Перемикачі опорів вимірювальних приладів:

- 7 – перемикачі додаткових опорів вольтметрів 1;
- 8 – перемикачі шунтових опорів міліамперметрів 2.

Потрібні вихідні напруги лівого та правого блоків живлення виставляють ручками потенціометрів 9 і знімають із гнізд 10. Гнізда 11 із підпаяними до них дротами й перемикачі 12 на передній панелі зв'язані з дискретними опорами, що виконують функції обмежувальних опорів у схемах досліджень статичних характеристик напівпровідникових приладів.

Гнізда 20 – гнізда змінної напруги 10 В.

Тумблер 13 на передній панелі комбінованого блока служить для вимикання всієї установки.

Під час збирання схеми дослідження електроди приладу, характеристики якого зніматимуться, підпаюють до контактів 14, 15, 16, 17 комутаційної плати 18. До того ж під час дослідження триелектродних напівпровідникових приладів використовують з'єднувальний провідник, що сполучає контакти 15 і 17 комутаційної плати.

**Увага!** Підпаювання електродів приладу, що досліджується, до контактів комутаційної плати виконують при вимкнутій установці.

## Лабораторна робота № 1

# **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ І РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ВТРАТ У СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ**

### **1. МЕТА РОБОТИ**

Визначити оптичні втрати в тонкоплівкових СЕ на основі гетеропереходів.

Визначити квантовий вихід та струм короткого замикання СЕ з урахуванням рекомбінаційних втрат носіїв заряду.

Провести оптимізацію конструкції фотоелектричних перетворювачів.

### **2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Одним зі способів виходу людства з існуючої глобальної енергетичної кризи є масове використання фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) для перетворення сонячної енергії на електричну. На сьогодні найпоширенішими використовуваними СЕ є такі, що ґрунтуються на кремнієвих технологіях. Альтернативою цим перетворювачам є тонкоплівкові СЕ на основі гетеропереходів (ГП). Найбільш розробленим і таким, що знайшов практичне використання є ГП  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe. Потрібно

зазначити, що це перша технологія, яка дозволила знизити вартість виробництва сонячної енергії до 0,57 \$/Вт, що нижче, ніж економічно обґрунтована ціна енергії сонця в 1 \$/Вт. Саме тому дві найбільші фотоелектричні станції у світі, що знаходяться в США (Topaz Solar Farm, Desert Sunlight Solar Farm, 9 млн сонячних модулів, загальною потужністю 550 МВт кожна), використовують саме СЕ на основі ГП  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  (виробництва компанії First Solar). Крім того, на сьогодні виготовляють плівкові СЕ на основі гетеропереходів ГП  $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$  ( $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ ) та  $n\text{-CdS}/\text{CZTS}$  ( $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ) та деякі інші.

За теоретичними оцінками ефективність плівкових СЕ з поглинальним шаром, що має оптимальну з боку перетворення сонячної енергії ширину забороненої зони ( $\sim 1,5$  еВ), становить 28–30 %. Однак реальний ККД ФЕП на основі ГП  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  на сьогодні становить 21,5 %,  $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$  – 21,7 %,  $n\text{-CdS}/p\text{-CZTS}$  – 12,6 %.

Різниця між теоретичними передбаченнями й реальними значеннями ефективності приладів пояснюється оптичними та рекомбінаційними втратами під час перетворення сонячної енергії на електричну.

Основні незворотні втрати енергії у ФЕП пов'язані з:

- відбиттям сонячного випромінювання від поверхні та гетерограниць перетворювача;
- неактивним поглинанням світла в матеріалі СЕ;
- проходженням частини випромінювання через ФЕП без поглинання в ньому;
- розсіюванням надлишкової енергії фотонів на теплових коливаннях кристалічної ґратки;
- рекомбінацією пар електрон–дірка, що утворилися під дією світла, на рекомбінаційних центрах (об'ємних та поверхневих);
- внутрішнім (послідовним та шунтувальним) опором перетворювача;
- деякими іншими фізичними процесами.



Подальше збільшення ефективності СЕ можливо лише методом мінімізації цих втрат у результаті оптимізації їх конструкції та покращення властивостей окремих шарів.

Зазвичай для перетворення сонячної енергії використовують дві конструкції СЕ на основі ГП: «substrate» й «superstrate». Найбільш ефективною з погляду утилізації енергії сонця вважають конструкцію типу «superstrate». Тонкоплівкові СЕ типу «superstrate» (рис. 1) мають багатошарову структуру та містять підкладку (скло), віконний (CdS, ZnS, ZnSe,...) і поглинальний (CdTe, CIGS, CZTS,...) шари, струмознімальні фронтальний (ІТО, FTO, ZnO,...) та металевий тильний контакти.

Необхідно зазначити, що у виробництві тонкоплівкових СЕ на основі ГП важливу роль відіграє вибір віконного шару.

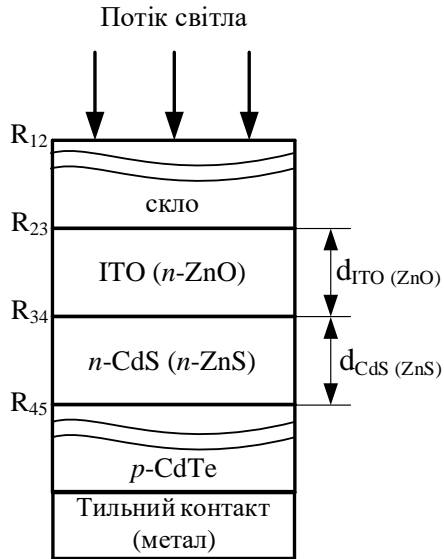


Рисунок 2 – Схематичний вид конструкції «superstrate» СЕ на основі ГП

На сьогодні широко використовують CdS ( $E_g = 2,42$  eV). Альтернативою плівкам CdS можуть стати тонкі шари ZnS, ZnSe які вже знайшли використання у СЕ на основі сполук CIS, CIGS. Сульфіди цинку та селену мають суттєво більшу ніж сульфід

кадмію ширину забороненої зони ( $E_g = 3,68$  eV,  $E_g = 2,67$  eV), що дозволяє розширити діапазон fotocутливості відповідних СЕ та збільшити їх струми короткого замикання. Ці сполуки є нетоксичними завдяки відсутності в складі важких металів.

В СЕ з ГП традиційно як верхній струмознімальний контакт використовують плівки ІТО ( $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0,9}-(\text{SnO}_2)_{0,1}$ ) або FTO ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ). До того ж, останнім часом як фронтальні струмопровідні шари фотоперетворювачів почали використовувати плівки оксиду цинку легованого алюмінієм ( $\text{ZnO}:\text{Al}$ ). Цей матеріал є більш дешевим ніж ІТО або FTO та не містить малопоширених і дорогих елементів до яких, наприклад, належить Індій.

Схематичний вид конструкції типового фотоперетворювача зі структурою скло/ІТО( $\text{ZnO}$ )/ $\text{CdS}(\text{ZnS})/\text{CdTe}$ /тильний контакт репрезентовано на рисунку 1.

### ***Оптичні втрати у СЕ***

Потік сонячного світла, перед тим, як потрапити до поглинального матеріалу  $\text{CdTe}$ , де під дією світла відбувається фотогенерація електронно-діркових пар проходить через ряд допоміжних шарів СЕ: скло, ІТО ( $\text{ZnO}$ ) та  $\text{CdS}(\text{ZnS})$ . Водночас відбуваються оптичні втрати енергії внаслідок відбиття світла від меж: повітря–скло, скло-ІТО( $\text{ZnO}$ ), ІТО( $\text{ZnO}$ )- $\text{CdS}(\text{ZnS})$  та  $\text{CdS}(\text{ZnS})$ - $\text{CdTe}$  та поглинання світлового потоку в допоміжних шарах скла, ІТО ( $\text{ZnO}$ ) та  $\text{CdS}(\text{ZnS})$ .

Показник відбиття світла від меж контактуючих матеріалів може бути визначений за формулою Френеля

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (1)$$

де  $n_1$ ,  $n_2$  – показники заломлення першого та другого контактуючого матеріалу, відповідно.

У разі використання електропровідних матеріалів коефіцієнт відбиття визначають за допомогою співвідношення

$$R = \frac{|n_1^* - n_2^*|}{|n_1^* + n_2^*|} = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2}, \quad (2)$$

де  $n^*$ , – комплексні показники заломлення,  $k_1, k_2$  – коефіцієнти ослаблення (ексципції) матеріалів.

Для повітря зазвичай вважають, що  $n_1 = 1, k_1 = 0$ . Значення коефіцієнта ослаблення для скла може бути прийнято рівним нулю ( $k = 0$ ), у зв'язку з тим, що у фотоперетворювачах зазвичай використовують спеціальне скло, яке має дуже малий коефіцієнт поглинання. Для визначення показника заломлення скла здебільшого використовують формул Зелмеєра

$$n^2 = 1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}, \quad (3)$$

де сталі дорівнюють:  $a_1 = 0,6962, a_2 = 0,4079, a_3 = 0,8974, \lambda_1 = 68$  нм,  $\lambda_2 = 116$  нм,  $\lambda_3 = 9896$  нм.

Коефіцієнт пропускання світла крізь допоміжні шари скла, ІТО (ZnO), CdS (ZnS) у разі нехтування процесами поглинання в них визначають за формулою  $T = 1 - R$ . Отже, коефіцієнт пропускання багатошарової структури СЕ може бути знайдений за формулою

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45}), \quad (4)$$

де  $R_{12}, R_{23}, R_{34}, R_{45}$  – коефіцієнти відбиття світла на межах: повітря–скло, скло–ІТО (ZnO), ІТО–CdS (ZnO–ZnS), CdS–CdTe (ZnS–CdTe).

Потрібно зазначити, що наведене співвідношення не враховує багаторазового відбиття світла в шарах скла, ІТО (ZnO), CdS (ZnS).

Здебільшого, крім відбиття, потрібно враховувати втрати світла на поглинання в допоміжних шарах фотоперетворювача.

Коефіцієнт пропускання багатошарової структури з урахуванням втрат на відбиття та поглинання у віконному та струмопровідному шарах СЕ може бути розрахований із використанням виразу

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45})(e^{-\alpha_1 d_1})(e^{-\alpha_2 d_2}), \quad (5)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти поглинання матеріалів провідного й віконного шарів;  $d_1, d_2$  – їх товщини.

Коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання  $\alpha(\lambda)$  з урахуванням показника ослаблення як функції від довжини хвилі  $k(\lambda)$  може бути розрахований за таким співвідношенням:

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} k. \quad (6)$$

### ***Рекомбінаційні втрати в СЕ***

Після генерації світлом електронно-діркові пари, що утворилися, повинні бути розділені вбудованим потенціальним бар'єром приладу. Водночас однією з найважливіших характеристик СЕ є квантовий вихід. Ця величина показує, скільки електронно-діркових пар створює кожний поглинутий квант світла

$$Q = \frac{1 + \frac{S}{D_p} \left( \alpha + \frac{2 \cdot (\varphi_0 - qU)}{d \cdot kT} \right)^{-1}}{1 + \frac{S}{D_p} \left( \frac{2 \cdot (\varphi_0 - qU)}{d \cdot kT} \right)^{-1}} - \frac{e^{-\alpha d}}{1 + \alpha L_n}, \quad (7)$$

де  $S$  – швидкість рекомбінації носіїв на межі ГП;  $D_n, D_p$  – коефіцієнти дифузії дірок;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $\varphi_0$  – висота бар'єра на ГП;  $U$  – прикладена зовнішня напруга;  $q$  – заряд електрона;  $d$  – ширина області просторового заряду в поглинальному шарі;  $L_n$  – дифузійна довжина електронів ( $L_n = (\tau_n \cdot D_n)^{1/2}$ , де  $\tau_n$  – час життя електронів).

Потрібно зазначити, що вираз (7) не враховує рекомбінації на тильній поверхні поглинального шару, що може призвести до значних втрат ефективності перетворювача в разі малої товщини поглинального шару. Якщо знехтувати другим доданком виразу (7) (унаслідок сильного поглинання світлового потоку за умови малих довжин хвилі), а також за відсутності рекомбінації носіїв заряду на поверхні ( $S = 0$ ), то значення квантового виходу може сягнути одиниці –  $Q = 1$ .

Для визначення квантового виходу потрібно знайти висоту потенціального бар'єра на ГП та визначити ширину області просторового заряду в поглинальному шарі. Остання величина здебільшого залежить від концентрації некомпенсованих акцепторів  $N_a - N_d$  (тобто, різниці між концентрацією акцепторів і донорів), що знаходяться в матеріалі. Унаслідок високого рівня легування матеріалу вікна, а також його високої провідності, область збіднення в ГП зазвичай міститься в поглинальному шарі. Отже, процеси перенесення заряду, що відбуваються в області збіднення ГП із фізичного погляду є аналогічними тим, які відбуваються в областях збіднення діоду Шоткі. У цьому разі ширина області просторового заряду може бути знайдена за допомогою виразу

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_0 - qU)}{q^2(N_a - N_d)}} \quad (8)$$

де  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність матеріалу;  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;  $(N_a - N_d)$  – концентрація некомпенсованих акцепторів у поглинальному шарі.

Після визначення квантового виходу можна розрахувати густину струму короткого замикання СЕ ( $j_{кз}$ ) за формулою

$$j_{кз} = q \sum_i T(\lambda) \frac{\phi_i(\lambda_i)}{h\nu_i} Q(\lambda_i) \Delta\lambda_i, \quad (9)$$

де  $\Psi_i$  – спектральна густина потужності сонячного випромінювання;  $\Delta\lambda_i$  – інтервал між сусідніми значеннями довжини хвилі  $\lambda_i$ .

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

Персональний комп'ютер.

Програмний пакет для моделювання процесів відбиття світла.

### 4. ХІД РОБОТИ

#### *Визначення втрат на відбивання світла в СЕ*

1. Побудувати спектральні залежності показників заломлення ( $n - \lambda$ ) та ослаблення ( $k - \lambda$ ) для скла (вираз 3), провідного, віконного та поглинального шарів згідно із заданим викладачем варіантом (див. табл. 1). Скористатися даними наведеними у файлах «матеріал» n,k.xlsx.

Таблиця 1 – Варіанти розрахункової лабораторної роботи

№	Тип СЕ	Товщина струмо-провідного шару, нм	Товщина віконного шару, нм	Товщина поглинального шару, нм
1	$n$ -CdS/ $p$ -CdTe	100	100	3 000
2	$n$ -ZnSe/ $p$ -CdTe	100	75	3 000
3	$n$ -ZnS/ $p$ -CdTe	100	50	2 000
4	$n$ -Mg <sub>0.3</sub> ZnO <sub>0.7</sub> / $p$ -SnS	100	50	3 000
5	$p$ -ZnTe/ $n$ -CdSe	100	75	3 000
6	$n$ -ZnO/ $p$ -CuO	100	2 000	2 000

2. Із використанням співвідношень (1), (2) розрахувати спектральні залежності коефіцієнтів відбиття ( $R$ ) від усіх меж

присутніх у СЕ. Ці та всі подальші розрахунки здійснити в програмі Excel. Навести відповідні графіки. Залежності будувати в інтервалі  $\lambda = 300\text{--}900$  нм із використанням будь-якого графічного редактора.

3. Із використанням співвідношення (4) розрахувати спектральні залежності коефіцієнтів пропускання ( $T - \lambda$ ) та відбиття ( $R - \lambda$ ) СЕ. Побудувати відповідні графіки.

4. Аналогічні розрахунки провести з урахуванням поглинання світла в допоміжних шарах (співвідношення (5)). Для цього спочатку розрахувати спектральну залежність коефіцієнта поглинання ( $\alpha - \lambda$ ) допоміжних шарів (співвідношення (6)). Під час розрахунків використати значення товщини шарів СЕ наведені в таблиці 1. Результати розрахунків репрезентувати у вигляді графіків.

***Розрахунок квантового виходу СЕ з урахуванням рекомбінаційних втрат носіїв заряду на приповерхневих станах.***

5. Розрахувати ширину просторового заряду у ГП. Для цього скористатися співвідношенням (8). Для розрахунку  $d$  використати значення фізичних величин, репрезентованих у таблиці 2. Результати обчислень занести в таблицю 3.

Таблиця 2 – Основні фізичні величини необхідні для визначення  $d$ ,  $Q$  та  $j_{кз}$

Матеріал	Параметр							
	$\varepsilon$	$\varphi_0 - qU$	$N_a - N_d$	$S$	$\tau_n$	$D_n$	$D_p$	$T$
CdS	5,7	0,70 eB	$10^{11}\text{--}10^{17}$ $\text{см}^{-3}$	$10^7$ $\text{см}/\text{с}$	$10^{-9}$ $\text{с}$	25 $\text{см}^2/\text{с}$	2 $\text{см}^2/\text{с}$	300 $\text{К}$
ZnSe	8,6	0,80 eB						
ZnS	8,5	0,82 eB						
MgZnO	18,8	0,75 eB						
ZnTe	10,4	0,60 eB						
CdTe	10,6							
CuO	18,1							
SnS	10							
ZnO	10,8	0,65 eB						
CdSe	5,8							

Таблиця 3 – Основні параметри СЕ

№	Тип СЕ	$d$ , нм	$j_{кз}$ , А/см <sup>2</sup>
1			

6. Розрахувати спектральну залежність квантового виходу СЕ з використанням співвідношення (7) та значень фізичних величин наведених у таблиці 2.

7. Провести розрахунок густини струму короткого замикання  $j_{кз}$  СЕ. Для цього скористатися значеннями  $\varphi_i(\lambda_i)$  з файлу ASTMG173.xls та даними попередніх розрахунків. Узяти до уваги, що  $h\nu_i = hc/\lambda_i$ . Результати обчислень занести в таблицю 3.

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Тема роботи та варіант.
2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості
4. Заповнена таблиця 3.
5. Побудовані графіки:
  - залежності показників заломлення ( $n - \lambda$ ) та ослаблення ( $k - \lambda$ ) для скла, провідного, віконного та поглинального шарів;
  - залежності коефіцієнтів відбиття ( $R$ ) від усіх меж СЕ;
  - залежності коефіцієнтів пропускання ( $T - \lambda$ ) та відбиття ( $R - \lambda$ ) ФЕП;
  - залежності коефіцієнтів пропускання ( $T - \lambda$ ) та відбиття ( $R - \lambda$ ) СЕ з урахуванням поглинання світла в допоміжних шарах.
6. Розрахунок характеристик СЕ (ширина області просторового заряду в поглинальному матеріалі, густина струму короткого замикання  $j_{кз}$  СЕ, спектральна залежність квантового виходу ( $Q - \lambda$ )).
7. Загальні висновки до роботи. Вони повинні містити короткий опис проведених досліджень і їх аналіз.



## 6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dobrozhan O. A. Optical and recombination losses in  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ -based thin-film solar cells with CdS, ZnSe, ZnS window and ITO, ZnO charge-collecting layers / P.S. Danylchenko, A.I. Novgorodcev, A.S. Opanasyuk // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. – 2018. – V. 13, № 1. – P. 195–207.

2. Доброжан О. А. Оптичні та рекомбінаційні втрати у тонкоплівкових сонячних елементах на основні гетеропереходів n-ZnS (n-CdS)/p-CdTe із струмознімальними контактами ІТО та ZnO/ О. А. Доброжан, А. С. Опанасюк, В. В. Гриненко // *Journal of Nano-and Electronic Physics*. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 04001-1.

3. Yang S. Investigation of recombination mechanisms in  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  solar cells using numerical modelling // S. Yang, S. Khelibi, J. de Wild, B. Vermang, J. Lauwaert / *Solar Energy*. – 2021. – V. 228. – P. 464–473.

4. Richter A. Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses / A. Richter, R. Muller, J. Benick, F. Feldmann, B. Steinhauser, C. Reichel, A. Fell, M. Bivour, M. Hermle, S. Glunz // *Nature Energy*. – 2021. – V. 6. – P. 429–438.

5. Ma T. Performance modelling of photovoltaic modules under actual operating conditions considering loss mechanism and energy distribution / T. Mao, Z. Guo, L. Shen, X. Liu, Z. Chen, Y. Zhou, X. Zhang // *Applied Energy*. – 2021. – V. 298. – № 117205.

6. Kuciauskas D. Identification of Recombination Losses in CdSe/CdTe Solar Cells from Spectroscopic and Microscopic Time-Resolved Photoluminescence // D. Kuciauskas, J. Moseley, C. Lee / *Solar RRL*. – 2021. – V. 5, № 4. – № 2000775.

## **ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТА SCAPS-3302**

### **1. МЕТА РОБОТИ**

Одержати практичні навички використання програмного пакету SCAPS-3302.

Засвоїти методику числового моделювання основних експлуатаційних характеристик СЕ.

### **2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Одним із найбільш ефективних методів перетворення сонячної енергії на електричну є використання ФЕП. Перетворення енергії ФЕП ґрунтується на фотовольтаїчному ефекті, що виникає в неоднорідних напівпровідникових структурах під час дії на них сонячного випромінювання. Неоднорідність структури ФЕП може бути одержана легуванням одного й того самого напівпровідника різними домішками (створення  $p-n$  переходів) або методом з'єднання різних напівпровідників із неоднаковою шириною забороненої зони та іншими фізичними характеристиками (створення гетеропереходів (ГП)). Для перетворення сонячної енергії використовують також МДН структури.

Для підвищення ефективності СЕ необхідна оптимізація властивостей як окремих шарів так і конструкції фотоперетворювача в цілому, що можливо методом моделювання фізичних процесів, які відбуваються в приладі.

Під час роботи СЕ відбуваються процеси, описані нижче.

1. Генерація електронно-діркових пар під дією випромінювання.

2. Дифузія неосновних фотогенерованих носіїв до  $p-n$  або ГП.

3. Розділення носіїв переходом.

4. Збирання носіїв омичними контактами.

Кількість електронно-діркових пар, що генеруються в матеріалі, визначається його шириною забороненої зони, характером міжзонних переходів (прямі або непрямі), коефіцієнтами поглинання та відбиття світла від поверхні зразка, товщиною поглинального та віконного шарів тощо. Повного поглинання сонячного випромінювання досягають за умови товщини шару напівпровідника  $d \gg \alpha^{-1}$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла, що падає нормально до поверхні. Відомо, що прямозонні напівпровідники мають значно більший коефіцієнт поглинання світла, ніж непрямоzonні ( $\alpha_{np} \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $\alpha_{нпр} \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ ), тому саме їх використовують як адсорбувальні шари тонкоплівкових СЕ (наприклад, CdTe, CIGS, CZTS) та фотодетекторів. У результаті відбувається істотна економія напівпровідникового матеріалу, оскільки товщину ФЕП вдається знизити з  $L_I = 100\text{--}300$  мкм (для непрямоzonних матеріалів) до  $L_I = 2\text{--}10$  мкм (для прямоzonних матеріалів).

При дифузії фотогенерованих носіїв у напрямі сепарувального бар'єра відбувається їх втрата в результаті поверхневої та об'ємної рекомбінації. Процеси рекомбінації характеризуються часом життя неосновних носіїв заряду, що визначається виразом

$$\tau = (\nu S_r N_t)^{-1}, \quad (1)$$

де  $\nu$  – теплова швидкість носіїв;  $S_r$  – переріз захоплення носіїв рекомбінаційними центрами;  $N_t$  – їх концентрація.

Дифузійна довжина неосновних носіїв заряду при цьому пов'язана з їх часом життя співвідношенням

$$L_{\text{dif}}^2 = k \mu \tau / e, \quad (2)$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $\mu$  – рухливість носіїв заряду;  $e$  – заряд електрона.

Збільшення коефіцієнта збирання неосновних носіїв заряду можна досягти збільшенням їх дифузійної довжини (часу життя)

й наближенням сепарувального бар'єру до області генерації електронно-діркових пар. Оскільки центрами рекомбінації, що визначають час життя носіїв у напівпровідниках є поверхня (як зовнішня, так і міжфазна чи з іншим напівпровідником), межі зерен, дислокації, дефекти пакування, точкові дефекти різної природи (як власні так і домішкові) та інші недосконалості кристалічної структури матеріалу, для ефективного збирання фотогенерованих носіїв необхідно використовувати шари з мінімальною кількістю структурних дефектів. Ефективна робота приладів з  $p-n$  – переходами на основі прямозонних матеріалів можлива лише в разі створення мілкового бар'єру (0,5–0,7 мкм), що складно реалізувати технологічно. У зв'язку із цим більш перспективними є СЕ на базі ГП, МН або МДН структур. Реалізація ефекту оптичного вікна у ГП, коли ширина забороненої зони віконного матеріалу є великою ( $E_g > 2$  eV), а поглинального – оптимальною ( $E_g \sim 1,5$  eV), – один із найбільш ефективних способів збільшення коефіцієнта збирання носіїв заряду у фотоактивних приладах за рахунок зменшення поверхневої рекомбінації та збільшення часу життя неосновних носіїв заряду.

Ефективність розділення носіїв заряду ГП визначається станом гетеромежі напівпровідників. Невідповідність періодів ґраток матеріалів спричинює утворення дислокаційної сітки на переході, що приводить до істотного збільшення швидкості рекомбінації носіїв заряду та зниження ефективності приладових структур. Тому для створення електронних приладів на основі ГП використовують пари матеріалів із невідповідністю сталих ґратки меншою ніж 1 %.

Ще однією причиною зниження ефективності фотоактивних приладів є втрати носіїв під час їх збирання омичними контактами внаслідок існування послідовного та шунтувального опорів приладу. Шунтувальний опір в еквівалентну схему приладу вводять для врахування струмів, обумовлених присутністю в матеріалах мікротріщин, меж зерен тощо. Послідовний опір приладової структури здебільшого складається з опору напівпровідникових шарів, опору розтікання й опору контакту

метал – напівпровідник. Опір розтікання можна істотно зменшити, використовуючи замість струмознімальної металевої ґратки, скляні підкладки з підшаром високопровідного прозорого для випромінювання оксидного матеріалу ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ , ІТО,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Zn}_2\text{SnO}_4$  та ін.). Оскільки здебільшого послідовний опір СЕ складається з опору поглинального шару ( $\text{CdTe}$ ,  $\text{CIGS}$ ,  $\text{CZTS}$ ,...) та матеріалу оптичного вікна ( $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,...) для його зниження зменшують товщину віконних (до 50 нм) і поглинальних (до 1–3 мкм) шарів та методом легування їх опору.

Відомо, що коефіцієнт корисної дії ФЕП розраховують за формулою

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P_s}, \quad (3)$$

де  $P$  – ґраток потужність, що виробляє СЕ;  $P_s$  – потужність сонячного випромінювання, що падає на нього;  $FF$  – фактор заповнення ВАХ (коефіцієнт форми ВАХ), що дорівнює (рис. 1)

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}, \quad (4)$$

де  $I_m$ ,  $U_m$  – густина струму й напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу;  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$  – струм короткого замикання й напруга холостого ходу ФЕП.

Оскільки світлову ВАХ СЕ на основі ГП описують співвідношенням

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 - I|L \right), \quad (5)$$

де  $I_s$  – струм насичення  $I_s = I_0(\exp^{-qU_k/AkT})$ ;  $q$  – заряд електрона;  $U$  – прикладена напруга;  $U_k$  – контактна різниця потенціалів на гетеропереході;  $A$  – фактор ідеальності ВАХ;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $I_L$  – фотострум (в темноті  $I_L = 0$ ).

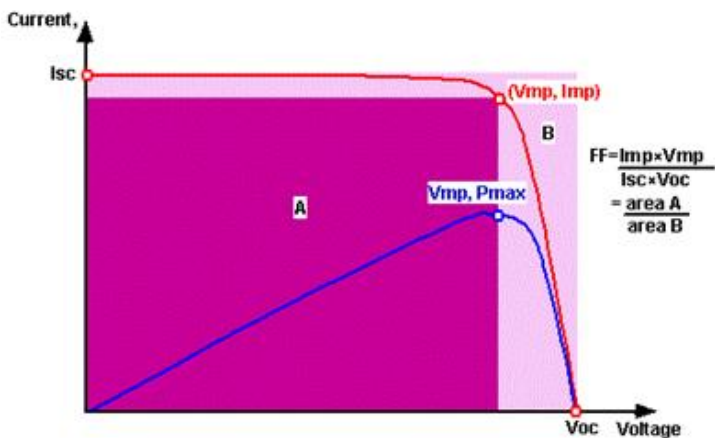


Рисунок 1 – Визначення фактора заповнення  $FF$  ВАХ СЕ

Звідси з'ясуємо, що вихідна потужність фотоперетворювача дорівнює

$$P = IU = I_s U. \quad (6)$$

Відомо, що для ефективної роботи (виділення максимальної вихідної потужності) джерело струму, яким є СЕ, повинно бути узгоджено із зовнішнім навантаженням.

Положення точки максимальної потужності на ВАХ ФЕР можна знайти, прийнявши, що  $dP/dU = 0$  (умова екстремуму функції) (рис. 1).

Звідси одержимо значення струму й напруги в цій точці

$$U_m = \ln \frac{I_L/I_s + 1}{1 + U_m} U_{oc} - \ln(1 + U_m), \quad (7)$$

$$I_m = I_s U_m e^{U_m} I_L \left(1 - \frac{1}{U_m}\right), \quad (8)$$

де  $\beta = \frac{q}{AkT}$ .

Значення  $I_m$  визначають методом підстановки  $U_m$  у співвідношення (5).

Формула (7) дозволяє визначити  $U_m$  методом послідовних наближень. Як перше наближення в праву частину підставляють  $U_m = U_{oc}$ , у разі другого наближення – визначене значення  $U_m$ .

Двох ітераційних обчислень достатньо для одержання чотирьох правильних значущих цифр напруги  $U_m$ .

Отже, максимальну вихідну потужність ФЕП визначають співвідношенням

$$P_m = I_m U_m \approx I_L. \quad (9)$$

Співвідношення (3), (4) та (9) дозволяють визначити фактор заповнення ВАХ ФЕП і врешті-решт його ККД.

Комп'ютерне моделювання основних фізичних процесів, що відбуваються в тонкоплівкових СЕ, основний метод оптимізації їх параметрів. Зазвичай у програмах із моделювання фізичних процесів у ФЕП використовують рівняння Пуассона та рівняння неперервності струму для електронів і дірок.

### ***Рівняння Пуассона***

Для розв'язання багатьох задач напівпровідникової електроніки використовують рівняння Пуассона. Для одновимірного випадку воно має такий вигляд:

$$\frac{d^2}{dx^2} = - \frac{dE}{dx} = - \frac{(\times)}{0}, \quad (10)$$

де  $\varphi$  – потенціал електричного поля;  $E$  – напруженість поля;  $x$  – координата за віссю, що співпадає з напрямом поля;  $\rho(x) = \frac{q}{V}$  – густина об'ємного заряду;  $q$  – заряд;  $V$  – об'єм;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу;  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала.

Фізичний зміст цього рівняння зводиться до того, що якщо відома густина та розподілення електричного заряду  $\rho(x)$ , то значення напруженості електричного поля  $E$  й потенціалу  $\varphi$  може бути визначено в будь-якій точці простору методом розв'язання рівняння Пуассона за заданих граничних умов.

### **Рівняння повного струму**

Відомо, що в напівпровідникових приладах електричний струм визначається, в основному, двома складовими – дрейфовим і дифузійним струмами. Дрейфовий струм – це струм, що створюється рухом носіїв заряду під дією сил електричного поля. Густина дрейфового струму є сумою густин дрейфових струмів електронів і дірок

$$j_{др} = j_{дрn} + j_{дрp} = \sigma E = (en\mu_n + ep\mu_p)E = env_n + epv_p, \quad (11)$$

$\sigma$  – провідність матеріалу;  $E$  – напруженість електричного поля;  $\mu_n, \mu_p$  – рухливість електронів і дірок;  $v_n, v_p$  – середня швидкість направленого руху носіїв заряду в електричному полі з напруженістю рівною одиниці;  $n, p$  – концентрація електронів і дірок відповідно;  $e$  – заряд електрона.

Рухливість носіїв заряду це довідникова величина. Здебільшого рухливість електронів вища, ніж у дірок ( $\mu_n > \mu_p$ ). Ця величина звичайно залежить від температури (з підвищенням температури рухливість зменшується внаслідок того, що зростає хаотичність руху носіїв), а також від концентрації домішок та інших центрів розсіювання.

Якщо рівноважні носії розподілені в кристалі нерівномірно, то вони можуть утворювати градієнт концентрації під дією якої можливий спрямований рух носіїв заряду або струм, що називається дифузійним. Дифузійний струм – це струм, що виникає в результаті дифузійного переміщення електронів і дірок, обумовленого градієнтом їх концентрації.

Густину дифузійного струму визначають як суму двох складових – густини дифузійного струму електронів і густини дифузійного струму дірок

$$j_{диф} = j_{дифn} + j_{дифp} = eD_n grad(n) + eD_p grad(p), \quad (12)$$

де  $grad(n) = \frac{dn}{dx}i + \frac{dn}{dy}j + \frac{dn}{dz}k$ ,  $grad(p) = \frac{dp}{dx}i + \frac{dp}{dy}j + \frac{dp}{dz}k$  – градієнт концентрації електронів і дірок відповідно.



Додавши до рівняння (11) співвідношення (12) одержимо остаточно рівняння повного струму для тривимірного випадку:

$$j = (j_{дрп} + j_{дифн}) + (j_{дрр} + j_{дифр}) = en_n E + ep_p E + eD_n \text{grad}(n) - eD_p \text{grad}(p). \quad (13)$$

Для одновимірного випадку це рівняння набуває вигляду наведеного нижче

$$j = j_n + j_p = en_n E + ep_p E + eD_n \frac{dn(x)}{dx} - eD_p \frac{dp(x)}{dx}. \quad (14)$$

Фізичний зміст рівняння повного струму полягає в тому, що струм у напівпровідникових приладах переноситься електронами й дірками, а переміщуються вони під дією сил електричного поля та градієнта концентрації. Для опису фізичних процесів здебільшого в приладах електроніки використовують одновимірне рівняння повного струму.

### ***Рівняння неперервності***

Величина струму в напівпровідникових приладах, як показано вище, визначається концентрацією носіїв і градієнтом їх концентрації. До того ж, концентрація носіїв струму може змінюватися в часі. Характер цієї зміни дозволяє описувати рівняння неперервності. Це рівняння показує, як і з яких причин змінюється концентрація носіїв у часі. Такі зміни можливі як за рахунок процесів генерації та рекомбінації носіїв заряду так і за рахунок переміщення носіїв з області або в область, що розглядається. Водночас за рахунок процесів генерації концентрація носіїв у часі зростає, а рекомбінація та розтікання струму призводять до зменшення їх концентрації.

Математично це можна записати так:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= R_{Gn} - R_{Rn} + \frac{1}{e} \text{div}(j_n), \\ \frac{dp}{dt} &= R_{Gp} - R_{Rp} - \frac{1}{e} \text{div}(j_p), \end{aligned} \quad (15)$$

де  $R_{Gn}$ ,  $R_{Gp}$ ,  $R_{Rn}$ ,  $R_{Rp}$  – коефіцієнти генерації та рекомбінації електронів та дірок відповідно,  $\text{div}(j_n) = \frac{dn_x}{dx} + \frac{dn_y}{dy} + \frac{dn_z}{dz}$ ,  $\text{div}(j_p) = \frac{dp_x}{dx} + \frac{dp_y}{dy} + \frac{dp_z}{dz}$  – дивергенція струмів.

Підставивши значення фізичних величин у рівняння, одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{n-n_0}{n} + \frac{1}{e} \text{div}(j_n), \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{p-p_0}{p} - \frac{1}{e} \text{div}(j_p). \end{aligned}$$

Якщо струми мають дифузійний характер

$$j_n = eD_n \frac{dn}{dx}, \quad j_p = eD_p \frac{dp}{dx}, \quad (16)$$

отже, одержимо остаточно

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2n}{dx^2} - \frac{n-n_0}{n}, \quad \frac{dp}{dt} = D_p \frac{d^2p}{dx^2} - \frac{p-p_0}{p}. \quad (17)$$

Звичайно, наведені рівняння у відомих програмах для моделювання фізичних процесів у приладах електроніки розв'язують чисельно в одновимірному наближенні. У цьому наближенні загальну довжину приладу  $L$  розбивають на  $N$  інтервалів, де значення потенціалів  $\phi_i$  та концентрації електронів і дірок  $n_i$ ,  $p_i$  є невідомими. Вони можуть бути знайдені методом розв'язання  $3N$  нелінійних рівнянь тобто основних рівнянь електроніки на кожному відрізьку  $i$ . Альтернативним підходом є розрахунок потенціалів  $\phi_i$  та квазірівнів ферми електронів та дірок  $E_{Fn_i}$  і  $E_{Fp_i}$  як незалежних змінних замість  $\phi_i$ ,  $n_i$ ,  $p_i$ . Розрахункові рівняння є нелінійними оскільки містять рекомбінаційні складові (див. (15)), що є нелінійними відносно концентрацій носіїв.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

Персональний комп'ютер

Програмний пакет SCAPS-3302

### 4. ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для моделювання електрофізичних характеристик СЕ на основі ГП існує декілька програм (AMPS-1D, SCAPS-1D, PC-1D, ASA та AFORS-HEТ), але найбільш розробленою та зручною можна вважати SCAPS-3302. Програмний пакет SCAPS (скорочено від «Solar Cell Capacitance Simulator» – «Симулятор ємності СЕ») є прикладною програмою, що працює в середовищі Windows, розробленою під керівництвом Марка Бургельмана в університеті Гента (Бельгія). Це програмне забезпечення було розроблене для моделювання в реальному часі електричних характеристик (на постійному та змінному струмі) фотоперетворювачів з ГП, його переважно використовують для моделювання властивостей тонкоплівкових СЕ на основі поглинальних шарів CdTe і Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS). Вхідні дані, необхідні для моделювання процесів у ФЕП, зберігаються в ASCII-файлі, що може бути прочитаний або повністю відредагований за допомогою графічного інтерфейсу користувача SCAPS.

Програмне забезпечення SCAPS являє собою набір панелей, розроблених на базі програмного компонента Labwindow/CVI (National Instruments™), у яких користувач може встановлювати параметри, або в яких наведено кінцеві результати розрахунків. Програма дозволяє моделювати такі характеристики приладів:

- темнові та світлові вольт-амперні характеристики (ВАХ) ( $I-V$ ), вольт-фарадні характеристики ( $C-V$ );
- залежності ємності від частоти ( $C-f$ );
- залежності величини квантового виходу від довжини хвилі ( $Q-\lambda$ ).

На рисунку 2 наведено зображення початкових керівних елементів інтерфейсу програмного забезпечення:

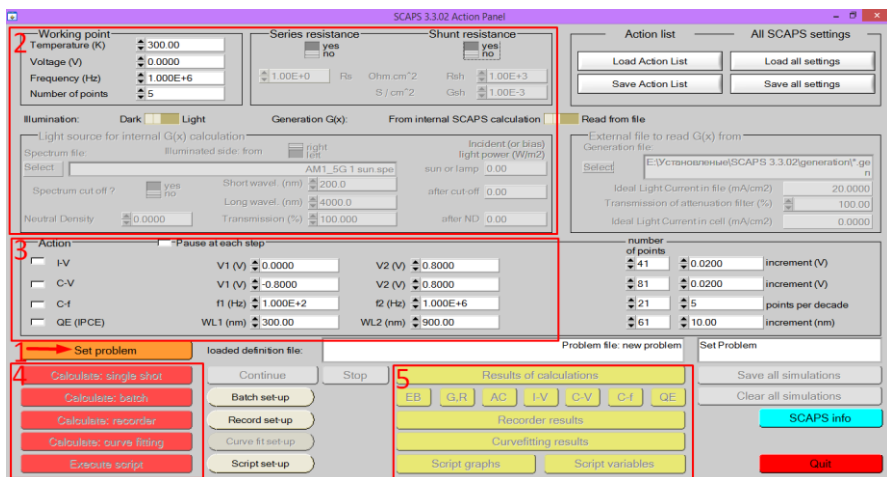


Рисунок 2 – Базові елементи управління інтерфейсом програми SCAPS-3302

- 1) кнопка «Set Problem» задає параметри розрахунків: геометрію та властивості матеріалів, конфігурацію CE;
- 2) панель «Working point» задає умови, за яких здійснюється симуляція вихідних характеристик елемента;
- 3) панель «Action» задає, які саме залежності будуть симулюватися програмою;
- 4) група кнопок, що безпосередньо відповідають за розрахунки;
- 5) кнопки, що викликають на панелі відображення кінцевих результатів розрахунків.

Зупинимося більш докладно на функціональному огляді керівних елементів інтерфейсу програмного забезпечення. До головних параметрів, які потрібно задати під час розрахунків основних характеристик CE (рис. 3), можна віднести такі:

- температура експерименту  $T$ , це стосується всіх можливих видів моделювання;

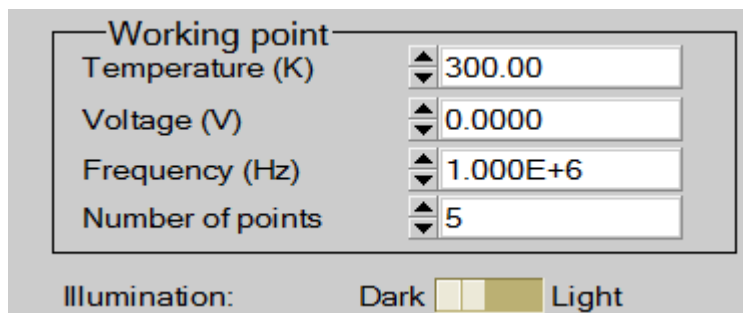


Рисунок 3 – Елемент інтерфейсу програмного забезпечення SCAPS

- напруга  $V$ , береться до уваги в разі проведення моделювання ВАХ ( $I$ - $V$ ) та вольт-фарадних ( $C$ - $V$ ) вимірювання. Ця величина є постійною при частото-ємнісних ( $C$ - $f$ ) моделюваннях та моделюванні квантового виходу ( $Q_E(\lambda)$ ). Розрахунки ВАХ та вольт-фарадних характеристик завжди починаються зі значення 0 В та проводяться до попередньо заданого значення  $V_k$  з урахуванням кількості розрахункових кроків, яке також необхідно попередньо задати;

- частоту  $f$  не беруть до уваги в разі проведення моделювання ВАХ ( $I$ - $V$ ), квантового виходу ( $Q_E(\lambda)$ ), вольт-фарадних характеристик ( $C$ - $V$ ) СЕ, однак є базовим параметром для визначення ємнісно-частотних ( $C$ - $f$ ) характеристик;

- освітлення: є необхідним для проведення моделювання світлових ВАХ. У разі моделювання квантового виходу воно визначає умови фотогенерації. Базовими параметрами тут є світловий або темновий режими. Існує також можливість попереднього вибору сторони освітлення СЕ (фронтальне або тильне) та спектрального діапазону випромінювання. За замовчуванням використовують значення режиму освітлення AM-1.5 (1 000 Вт/м<sup>2</sup>), однак є можливість задання монохроматичного освітлення та вибраного спектра для спеціалізованих симуляцій.

Під час кожного розрахунку чинний параметр ( $V$ ,  $f$  або  $I$ ) змінюється в заданому діапазоні у той час, як інші параметри

мають значення, задані в робочій таблиці. Користувач може встановити властивості проміжних напівпровідникових шарів (максимум 7) ФЕП натисканням кнопки «Додати шар» (Add Layer) на панелі властивостей СЕ (рис. 4). Опис характеристик шарів відкривається в новому вікні (рис. 5).

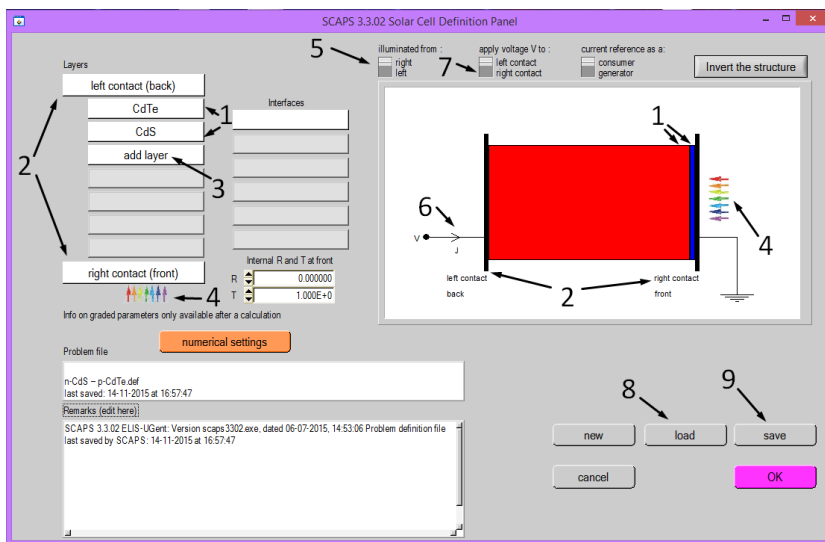


Рисунок 4 – Панель властивостей СЕ:

- 1- додані шари СЕ;
- 2- контакти;
- 3- кнопка додавання нового шару СЕ;
- 4- схематичне зображення напрямку спрямування світла;
- 5- перемикач напрямку спрямування світла;
- 6- схематичне зображення прикладання напруги;
- 7- перемикач напрямку прикладання напруги;
- 8- кнопка для збереження заданої структури СЕ;
- 9- кнопка для завантаження збереженої структури СЕ

Користувач може ввести назву та задати властивості матеріалу нового шару: ширину забороненої зони  $E_g$ , товщину, спорідненість електрону  $\chi$  та ін.

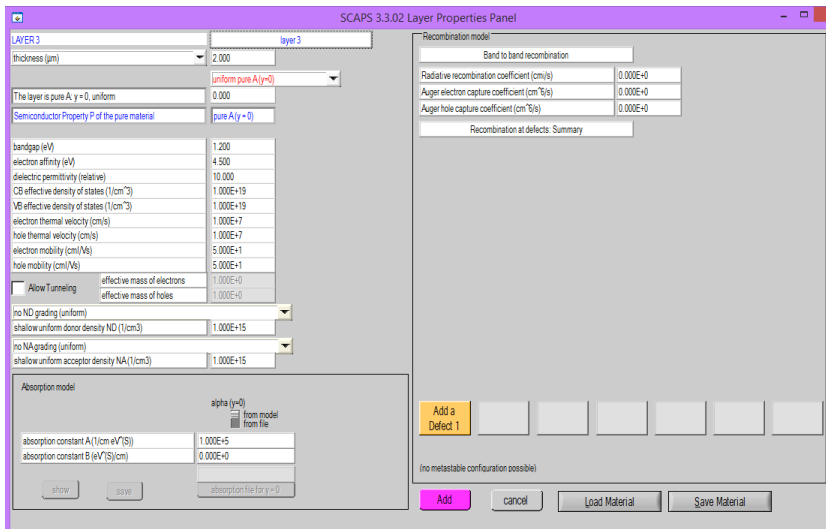


Рисунок 5 – Вікно встановлення базових параметрів шарів SE

Експонентний закон поглинання світла передбачений для всіх напівпровідникових шарів або ж характеристики поглинання можуть бути взяті з певного файлу користувача. Тим самим задовольняються вимоги до традиційних тонкоплівкових ФЕП, спроектованих із розрахунком компромісу між високим рівнем струму за умови малої ширини забороненої зони напівпровідника та високою напругою за умови великої ширини забороненої зони поглинального матеріалу.

Під час створення сучасних SE використовують більш складні стратегії поєднання матеріалів віконних і поглинальних шарів із різною  $E_g$ , які здебільшого зводяться до створення градієнту ширини забороненої зони матеріалу та інших властивостей методом зміни його складу. Програма передбачає можливість задання залежності майже всіх властивостей матеріалів від координати  $x$  у вигляді таблиці: спорідненості до електрона  $\chi(x)$ , коефіцієнтів поглинання  $\alpha(x, \lambda)$ , ефективної густини станів у зоні провідності та валентній зоні  $N_C(x)$ ,  $N_V(x)$ , концентрації домішок  $N_D(x)$ ,  $N_A(x)$  рухливості  $\mu_n(x)$ ,  $\mu_p(x)$  та рекомбінаційних властивостей  $N_i(x)$ ,

$\sigma_n(x)$ ,  $\sigma_p(x)$  та ін. У наведеному вище прикладі (рис. 5), використано файл CdTe, що йде в комплекті до програмного забезпечення SCAPS.

Для реалістичного моделювання процесів у полікристалічних СЕ на основі ГП програма повинна відповідати декільком вимогам. Проаналізуємо ці вимоги та методи їх урахування в SCAPS.

У кожному шарі СЕ можна визначити тип (донор або акцептор) і концентрацію мілких центрів; вважають, що вони повністю іонізовані й не беруть участі в рекомбінації. Можна також задати наявність у матеріалі до трьох глибоких рекомбінаційних центрів із різними характеристиками ( $E_t$ ,  $N_t$ ,  $\sigma_t$ ). Рекомбінація носіїв на цих центрах та їх положення описують моделлю Шоклі – Ріда – Холла (SRH), із якої випливає, що їх заряд визначається енергетичним положенням рівня й типом центрів (донор або акцептор, нейтральний дефект або центр, що не має заряду).

Рівні, що знаходяться в забороненій зоні матеріалу, можуть бути моноенергетичними чи описані якимось розподіленням (рівномірне розподілення рівнів за енергією, гаусівське або експоненціальне розподілення).

Концентрація мілких або глибоких рівнів також може змінюватися в просторі (рівномірно, стрибками, лінійно, експоненціальне), це розподілення також можна задати з вихідного файлу).

Рисунок 6 демонструє панель, що з'являється після натискання кнопки «Add a defect» на панелі визначення властивостей матеріалів шарів. На цій панелі користувач може визначити тип дефектів (донор, акцептор, нейтральний), перетин захоплення електронів і дірок ( $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$ ), розподілення дефектів за енергією, розміщення в забороненій зоні матеріалу та їх концентрацію.

Програма SCAPS дозволяє також урахувати рекомбінацію генерованих носіїв на приповерхневих станах, що виникають на межах поділу напівпровідникових матеріалів. Квазірівень Фермі в цьому разі може мати розриви на межах шарів.



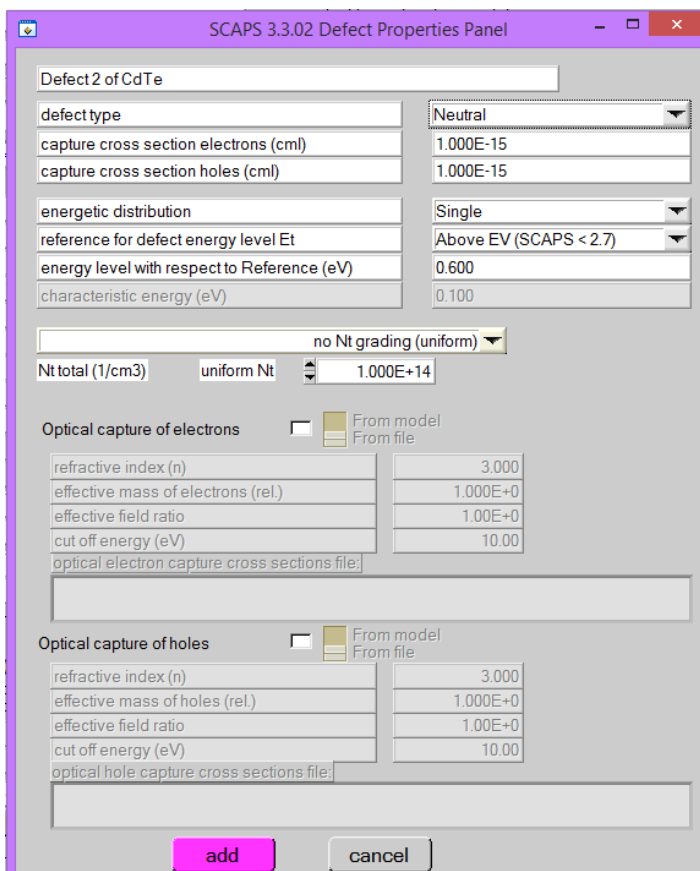


Рисунок 6 – Вікно задання властивостей дефектів у матеріалі одного з шарів SE

Рекомбінація через приміжові стани моделюється з використанням теорії Пауелза – Ванхутта. Ця теорія є доповненням до класичної моделі Шоклі – Ріда – Хола щодо об’ємної рекомбінації. Згідно із цією моделлю приміжові стани обмінюються носіями з чотирма зонами замість двох (класична теорія), тобто зоною провідності та валентною зоною обох напівпровідників, що граничать між собою. Імовірність заповнення приміжових станів тоді визначається чотирма

концентраціями носіїв заряду замість двох. Вони характеризуються поверхневою густиною ( $N_s$ ), енергетичним положенням ( $E_t$ ) і чотирма перетинами захоплення ( $\sigma_i$ ). У програмі SCAPS примежові стани можуть бути розподілені за енергіями так само, як об'ємні стани.

Кнопку «Межі» (interfaces) на панелі властивостей SE використовують для програмування властивостей примежових станів, вона стає активною після вибору як мінімум двох шарів приладу.

У програмі SCAPS квантову ефективність визначають методом симуляції густини струму двічі. Перший раз – у робочій точці за певної напруги зміщення та освітленості SE, а другий раз – в умовах робочої точки з відомим числом монохроматичних фотонів. Різницю цих значень репрезентують як квантову ефективність.

Під час розрахунку струму SE з відомою конфігурацією та матеріалами шарів зі сталими параметрами, рушійною силою є градієнт електростатичного потенціалу  $\nabla E$  (дрейфовий струм) та градієнт концентрації  $\nabla n, \nabla p$  (дифузійний струм). Під час уведення градієнту складу матеріалу за товщиною ФЕП необхідно додати до розрахунків: градієнт спорідненості до електрона  $\nabla \chi$ , градієнт ширини забороненої зони  $\nabla E_g$  та градієнти ефективної густини станів у зоні провідності й валентній зоні матеріалів:  $\nabla(\log N_C)$ ,  $\nabla(\log N_V)$ . Крім того, рівняння нерозривності електронів і дірок модифікуються з урахуванням наявності градієнта рухливості носіїв  $\nabla \mu_n$  або  $\nabla \mu_p$ , а рівняння Пуассона – градієнта діелектричної сталої матеріалу  $\nabla \epsilon$ .

Алгоритм процесу розрахунків дифузійно-дрейфових струмів у SE методом проведення ітераційної процедури наведений на рисунку 7.

Дискретизована дифузійно-дрейфова модель достатньо добре описана в літературі, вона є основним числовим методом розрахунку при симуляції фізичних процесів у напівпровідникових SE.

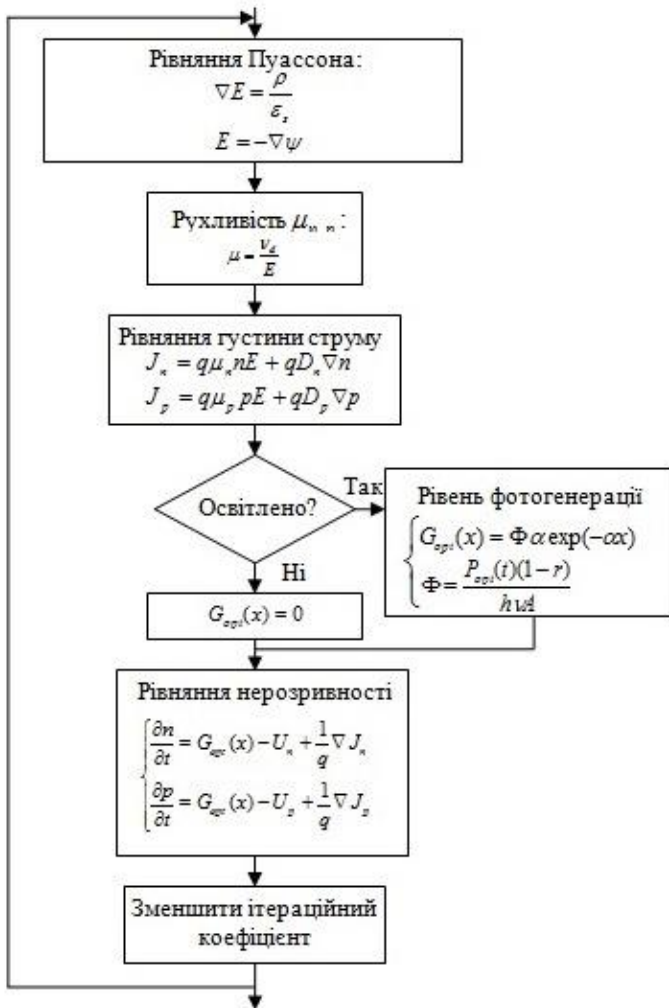


Рисунок 7 – Алгоритм числового розв’язання біполярної дрейф-дифузної системи рівнянь Пуассона

## 5. ХІД РОБОТИ

1. Одержати допуск від викладача на виконання лабораторної роботи.

2. Запустити програмний пакет SCAPS-3302 (відкрити файл Scaps.exe в папці зі встановленою програмою).

3. У стартовому вікні програми в панелі «Action» (розділ 1) почергово вибрати режими та провести моделювання в заданих режимах:

- моделювання темнових ВАХ ( $I-V$ ) із заданим діапазоном прикладеної напруги від 0 В до 3 В;
- моделювання світлових ВАХ ( $I-V$ ) з заданим діапазоном прикладеної напруги від 0 В до 3 В;
- моделювання квантового виходу СЕ ( $Q_E(\lambda)$ ) із заданим діапазоном довжин хвиль від 230 нм до 1 000 нм.

4. Під час роботи необхідно додержуватися такої послідовності дій:

1) задати шари СЕ, моделювання якого буде проводитися:

- натиснути кнопку «Set problem». У вікні, що відкриється, потрібно буде задати шари ФЕР. Зробити це можна натиснувши кнопку «add layer»;

- у вікні властивостей шару необхідно вказати його назву та задати базові параметри для моделювання, зазначені в Додатку Б, для матеріалів згідно з номером варіанта (Табл. 1) та натиснути «Асепт»;

- зверніть увагу: освітлення (на схемі, що зображує шари СЕ позначене стрілками) повинне бути спрямованим із боку віконного, а не з боку поглинального шару (див. рис. 3);

- напрям, із якого подається освітлення задають за допомогою перемикача «illuminated from» над схематичним зображенням шарів СЕ, або за допомогою перемикача «illuminated side: from» у керівному елементі «Illumination» головного вікна;

- зверніть увагу: під час моделювання світлових і темнових ВАХ потрібно провести розрахунок спочатку для прямої, а потім для оберненої гілки ВАХ;

- перемикання прямого / оберненого прикладання напруги здійснюють за допомогою перемикача «apply voltage  $V$  to» над схематичним зображенням шарів CE;

- після додавання всіх шарів натиснути кнопку «OK»;

2) задати головні параметри експерименту на панелі «Working point»:

- Temperature, температура експерименту – 300 K;

- Voltage, постійна напруга зміщення для моделювання квантового виходу – 0 В;

- Illumination (див. Далі);

3) Провести моделювання темнових ВАХ у заданому діапазоні прикладеної напруги від 0 В до 3 В:

- на панелі «Working Point» повинен бути ввімкненим режим «Dark Illumination» (він вибраний за замовчуванням);

- на панелі «Action» необхідно вибрати режим для моделювання ВАХ ( $I$ - $V$ ), після чого справа навпроти цього вибору необхідно задати діапазон прикладеної напруги ( $V_1$ ,  $V_2$ ), кількість кроків (number of points,  $N$ ) та величину кроку (increment  $\Delta V$ );

- після задання всіх необхідних параметрів натиснути кнопку «Calculate: single shot», після чого програма проведе моделювання темнових ВАХ;

- у результаті моделювання можна репрезентувати графік залежності густини струму від напруги  $j(V)$ , який можна відкрити натисканням кнопки  $I$ - $V$  на панелі відображення кінцевих результатів розрахунків (див. рис. 2);

4) провести моделювання світлових ВАХ із заданим діапазоном прикладеної напруги від 0 В до 3 В:

- на панелі «Working Point» повинен бути ввімкненим режим «Light Illumination»;

- переконатися, що дані задані для шаблону AM1\_5G sun (дані за замовчуванням);

- натиснувши кнопку «Set problem» перевірити, що світло падає з боку віконного шару;

- на панелі «Action» необхідно вибрати режим для моделювання ВАХ ( $I$ - $V$ ), після чого справа навпроти цього

вибору необхідно задати діапазон прикладеної напруги ( $V_1, V_2$ ), кількість кроків (number of points) та величину кроку (increment ( $V$ ));

- після задання всіх необхідних параметрів натиснути кнопку «Calculate: single shot», після чого програма проведе моделювання світлових ВАХ;

- результат моделювання потрібно репрезентувати у вигляді графіка залежності густини струму від напруги  $j(V)$ , який можна відкрити натисканням кнопки  $I-V$  на панелі відображення кінцевих результатів розрахунків (див. рис. 2);

5) провести моделювання квантового виходу з заданим діапазоном довжин хвиль від 230 нм до 1 000 нм:

- на панелі «Action» необхідно вибрати режим для моделювання ВАХ ( $Q_E$  (IPCE)), після чого справа навпроти цього вибору необхідно задати діапазон довжини хвилі (WL1, WL2), кількість кроків (number of points) та величину кроку (increment (nm));

- після задання всіх необхідних параметрів натиснути кнопку «Calculate: single shot», після чого програма проведе моделювання квантового виходу;

- результат моделювання представити у вигляді залежності квантової ефективності від довжини хвилі  $Q_E(\lambda)$ , який можна відкрити натисканням кнопки  $Q_E$  на панелі відображення кінцевих результатів розрахунків (див. рис. 2).

Для репрезентування у звіті темнові, світлові ВАХ та спектральні залежності квантового виходу навести у графічній формі з використанням будь-яких графічних редакторів (наприклад, OriginPro).

Зі світлових ВАХ СЕ в подальшому визначити такі важливі параметри фотоелектричних приладів як:

- напруга холостого ходу  $U_{oc}$ ;
- струм короткого замикання  $J_{sc}$ ;
- фактор заповнення ВАХ  $FF$  (співвідношення (4), (8));
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$  (співвідношення (3)).

Результати досліджень згрупувати та представити у вигляді таблиці (табл. 2).

Таблиця 1 – Варіанти розрахункової лабораторної роботи

Варіант	Тип СЕ	Товщина струмопровідного шару, нм	Товщина віконного шару, нм	Товщина поглинального шару, нм	Температура, К
1	$n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$	100	100	3 000	300
2	$n\text{-ZnSe}/p\text{-CdTe}$	100	75	3 000	300
3	$n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$	100	50	2 000	300
4	$n\text{-Mg}_{0.3}\text{ZnO}_{0.7}/p\text{-SnS}$	100	50	3 000	300
5	$p\text{-ZnTe}/n\text{-CdSe}$	100	75	3 000	300

Таблиця 2 – Вихідні параметри СЕ

ГП	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	$FF$ , %	$\eta$ , %
$n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$				
$n\text{-ZnSe}/p\text{-CdTe}$				
$n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$				
$n\text{-Mg}_{0.3}\text{ZnO}_{0.7}/p\text{-SnS}$				
$p\text{-ZnTe}/n\text{-CdSe}$				

## 6. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Тема роботи та варіант.
2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Темнові, світлові ВАХ та спектральні залежності квантового виходу (роздруковані графіки згідно з номером варіанта).

5. Заповнена таблиця 2 з розрахунками основних характеристик ФЕП.

7. Загальні висновки до роботи. Вони повинні містити короткий опис проведених досліджень та їх аналіз.

## 7. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Snowden C. Semiconductor device modeling / C. Snowden // Reports on Progress in Physics – 1985 – V. 48. – P. 223–275.
2. Bugelman M. Advanced electrical simulation of thin film solar cells / M. Bugelman, K. Decock, S. Khelifi, A. Abass // Thin Solid Films. – 2013 – V. 535. – P. 296–301.
3. Bugelman M. Modeling polycrystalline semiconductors solar cells / M. Bugelman, P. Nollet, S. Degrave // Thin Solid Films. – 2000. – V. 361–362. – P. 527–532.
4. Burgelman M. Modeling thin-film PV devices / M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degrave et al // Progr. Photovoltaics Res. Appl. – 2003. – V. 11. – P. 1–11.
5. Burgelman M. Marlein J Analysis of graded band gap solar cells with SCAPS / 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Valencia. – 2008. – P. 2151–2155.



## ДОДАТОК А – Базові параметри для моделювання

Шар	<i>p</i> -ZnTe (поглинач)	<i>n</i> -CdSe (вікно)	<i>n</i> -ZnSe (вікно)	<i>p</i> -CdTe (поглинач)	<i>n</i> -CdS (вікно)	<i>n</i> -ZnS (вікно)	<i>p</i> -SnS (поглинач)	<i>n</i> -Mg <sub>0.3</sub> Zn O <sub>0.7</sub> (вікно)
Ширина зони $E_g$ , eV (bandgap, eV)	2,39	1,74	2,67	1,46	2,45	3,68	1,30	4,00
Спорідненість електронів $\chi$ , eV (electron affinity, eV)	3,53	4,95	4,09	4,28	4,5	4,45	4,2	1,12
Діелектрична стала $\epsilon/\epsilon_0$ (dielectric permittivity relative)	7,28	9,50/6,20 6,10	9,20/5,80	10,6	10	8,3	16	18,8
Густина станів у зоні провідності $N_C$ , см <sup>-3</sup> (CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> ))	2,24·10 <sup>18</sup>	1,75·10 <sup>18</sup>	1,50·10 <sup>24</sup>	9,15·10 <sup>17</sup>	2,2·10 <sup>18</sup>	6,34·10 <sup>18</sup>	—	3,52·10 <sup>18</sup>
Густина станів у валентній зоні $N_V$ , см <sup>-3</sup> (VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> ))	1,60·10 <sup>19</sup>	2,10·10 <sup>19</sup>	1,80·10 <sup>25</sup>	5,19·10 <sup>18</sup>	1,8·10 <sup>18</sup>	1,46·10 <sup>19</sup>	—	1,12·10 <sup>18</sup>
Рухливість електронів $\mu_e$ , см <sup>2</sup> /В·с (electron mobility (cm <sup>2</sup> /V·s))	340	650	500	70	50	30	90	400
Рухливість дірок $\mu_h$ , см <sup>2</sup> /В·с (hole mobility (cm <sup>2</sup> /V·s))	100	30	30	30	5	7		130
Ефективна маса електронів $m_e/m_0$	0,20	0,13	0,21	0,11	0,21	0,40	0,44	0,24
Ефективна маса дірок $m_h/m_0$	0,20	0,45	0,60	0,35	0,80	0,82-	0,20	0,59

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМНОВИХ І СВІТЛОВИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 1. МЕТА РОБОТИ

Ознайомитися із фізичними принципами роботи фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії.

Дослідити темнові вольт-амперні характеристики СЕ.

Дослідити світлові вольт-амперні характеристики ФЕП.

Визначити основні характеристики фотоперетворювачів.

### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сонце – важливе поновлюване та екологічно чисте джерело енергії. Сонячну енергію можна перетворювати на електричну за допомогою ФЕП. Такі перетворювачі використовують на космічних кораблях, у радіомаяках та океанських навігаційних буях, в автономних мережах зв'язку та електропостачання, калькуляторах, електронних іграшках тощо.

У ФЕП вільні носії заряду утворюються в результаті взаємодії напівпровідника зі світлом, а розділяються під дією електричного поля, що виникає всередині елемента, завдяки присутності *p-n*-переходу, гетеропереходу або МДН-структури.

До недавнього часу практично всі ФЕП виготовляли з кремнію, де формувалися *p-n*-переходи, проте зараз усе більш широкого застосування знаходять сонячні елементи (СЕ) на основі гетеропереходів із використанням таких поглинальних напівпровідникових матеріалів як CdTe, GaAs, InP, CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS), Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) тощо.

Для дослідження СЕ найбільш важливим із практичного погляду є вивчення їх темнових і світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ). Аналіз цих залежностей дозволяє визначити ефективність перетворення енергії СЕ, ступінь впливу паразитних опорів тощо.

### **Фізичні процеси на $p$ - $n$ -переході та його темнова ВАХ**

Розглянемо процеси, що проходять на межі  $p$ - $n$ -переходу. Оскільки в одній частині напівпровідника ( $n$ ) існує велика концентрація електронів, а в іншій ( $p$ ) – дірок, відбувається їх взаємодифузія в області з іншим типом провідності (рис. 1). Дифундуючи в зустрічних напрямках через межу поділу, дірки й електрони рекомбінують між собою. У результаті прошарок біля  $p$ - $n$ -переходу збіднюється носіями заряду й набуває великого опору (збіднений шар), який здебільшого визначає загальний опір напівпровідникового приладу.

У приконтатному шарі  $n$ -області в результаті дифузії формується нерухомий об'ємний (додатний) заряд іонізованих донорів, аналогічно в приконтатному шарі  $p$ -області формується нерухомий об'ємний (негативний) заряд іонізованих акцепторів. Виникає подвійний заряджений шар товщиною  $d_0$  ( $d_0 \sim 0,1$  мкм), поле якого направлено від  $n$ -області до  $p$ -області. Існування контактного (внутрішнього) поля на  $p$ - $n$ -переході приводить до того, що енергія електронів зростає в  $p$ -області, а енергія дірок – в  $n$ -області. Унаслідок цього біля  $p$ - $n$ -переходу відбувається викривлення енергетичних зон напівпровідника (зони провідності та валентної) і виникають потенціальні бар'єри як для електронів, так і для дірок.

Необхідно зазначити, що разом з електронами (основними носіями) в матеріалі  $n$ -типу завжди існує невелика кількість неосновних носіїв – дірок, що виникають унаслідок теплового збудження й переходу електронів із валентної зони напівпровідника безпосередньо в зону провідності (цей процес трохи збільшує й кількість електронів). Аналогічно в матеріалі  $p$ -типу існує невелика кількість неосновних носіїв – електронів. Якщо в область об'ємного заряду попадає неосновний носій (електрон з  $p$ -області або дірка з  $n$ -області), то контактне поле підхоплює його та перекидає через цей шар. При цьому часто ймовірно рекомбінації носія за час його проходження крізь

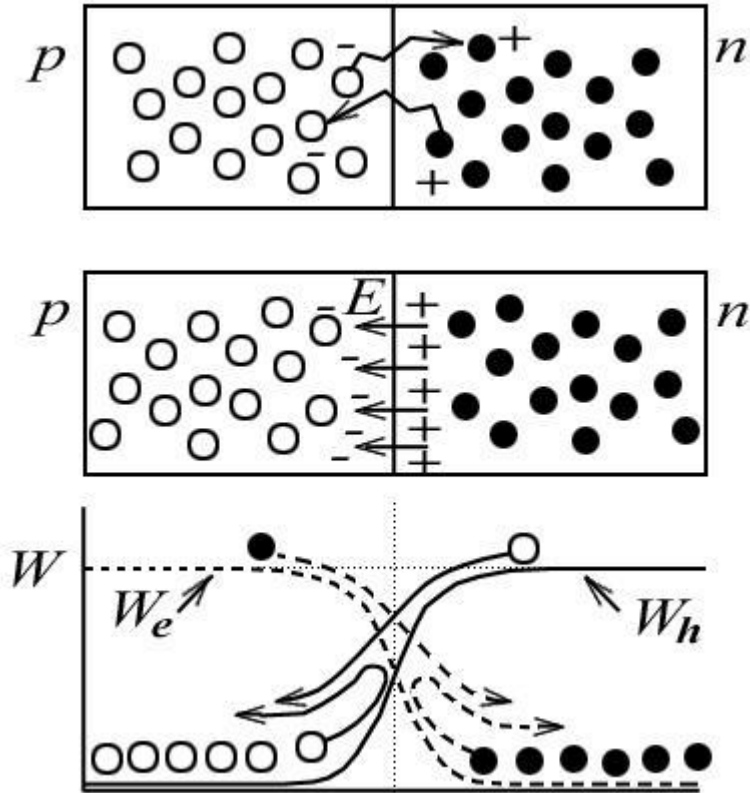


Рисунок 1 – Утворення збідненого вільними носіями шару на  $p$ - $n$ -переході

областю просторового заряду можна знехтувати. Отже, майже кожний неосновний носій, що попадає в область просторового заряду, переходить через  $p$ - $n$ -перехід. Навпаки, основні носії струму (електрони з  $n$ -області й дірки з  $p$ -області) можуть подолати шар об'ємного заряду лише в тому разі, якщо кінетична енергія їх руху вздовж осі  $x$  достатня для подолання контактної різниці потенціалів на  $p$ - $n$ -переході. Тому, як тільки утворюються об'ємні заряди на межі поділу, потоки основних носіїв, що перетинають цю межу, зменшуються. Однак, якщо ці потоки (струми) все ще перевищують потоки неосновних носіїв (струмів), що рухаються назустріч (що від висоти потенціального

бар'єра майже не залежать), об'ємний заряд, а, відповідно, і контактне поле, збільшуються. Такий процес продовжується до тих пір, поки потоки основних носіїв, не зрівняються з потоками неосновних носіїв. У результаті встановлюється динамічна рівновага двох потоків носіїв на переході. Ця рівновага можлива за такої величини потенціального бар'єра ( $qU_k$ ) на  $p$ - $n$ -переході, коли енергія Фермі в обох областях напівпровідника вирівнюється.

Енергетична діаграма, що відповідає рівноважному стану  $p$ - $n$ -переходу, наведена на рисунку 2а. Фізичну величину  $U_k$  називають **контактною різницею потенціалів**. За рівноваги через  $p$ - $n$ -перехід проходять однакові, але протилежні за напрямом струми: струм основних носіїв  $I_d$  (так званий **дифузійний струм**) і струм неосновних носіїв  $I_c$  (**струм провідності або дрейфовий**). Якщо величина  $I_c$  майже не залежить від висоти потенціального бар'єра на  $p$ - $n$ -переході, то величина  $I_d$  визначається ним.

Описаний вище механізм проходження струму через  $p$ - $n$ -перехід називають дифузійним. Він спостерігається лише для структур із практично ідеальною межею поділу напівпровідників.

Якщо до  $p$ - $n$ -переходу підключити джерело зовнішньої напруги, рівновага струмів основних і неосновних носіїв порушується. Про  $p$ - $n$ -перехід, увімкнений в електричне коло так, що зовнішнє поле протилежне за напрямом контактному (плюс підключений до  $p$ -області, мінус до  $n$ -області), говорять, що він увімкнений у **прямому** (або пропускну) **напрямі**. У цьому разі під дією зовнішнього поля потенціальний бар'єр  $qU_k$  зменшується, дифузійний струм починає зростати за експоненціальним законом, а струм провідності залишається практично незмінним унаслідок малої концентрації неосновних носіїв (рис. 2б). За умови великих значень зовнішньої напруги ( $U > 3$  В) потенціальний бар'єр на  $p$ - $n$ -переході зникає повністю, опір переходу перестає залежати від прикладеної напруги й визначається лише опором об'єму напівпровідника.

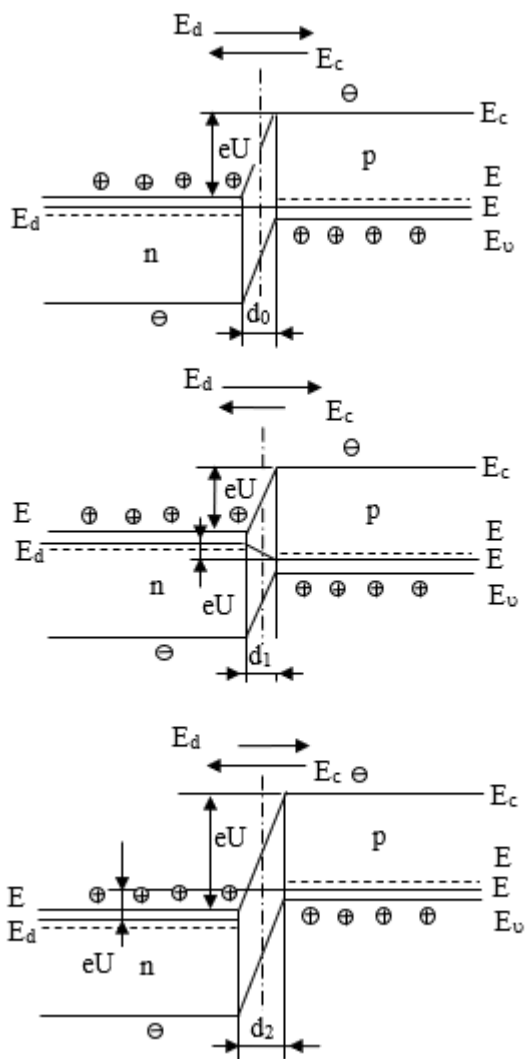


Рисунок 2 – Енергетична діаграма *p-n*-переходу:

а) у рівноважному стані; б) у разі його підключення в прямому напрямі ( $d_1 < d_0$ ); в) у разі його підключення у зворотному напрямі ( $d_2 > d_0$ )

Якщо змінити полярність напруги, прикладеної до *p-n*-переходу на протилежну, то зовнішнє поле буде збігатися за напрямом із контактним. Висота потенціального бар'єра ( $qU_k$ ) в цьому разі збільшиться, що приведе до зменшення дифузійного

струму. Струм, зумовлений неосновними носіями (дрейфовий), при цьому практично не зміниться (рис. 2 в). За досить великої зворотної напруги на  $p$ - $n$ -переході струм через нього зумовлений лише дрейфовою складовою та практично не залежить від величини цієї напруги. Значення зворотного струму через  $p$ - $n$ -перехід за великої напруги називають **струмом насичення** ( $I_0$ ).

Лише за дуже великої зворотної напруги (десятки–сотні вольт) сила струму через  $p$ - $n$ -перехід почне сильно зростати, що зумовлено **електричним пробоем переходу**. Кожний  $p$ - $n$  перехід характеризується своїм граничним значенням зворотної напруги, яку він може витримати без руйнування.

Асиметрія провідності в прямому та зворотному напрямках зумовила застосування  $p$ - $n$ -переходів в електроніці для випрямлення змінного струму та для інших застосувань.

ВАХ ідеального  $p$ - $n$ -переходу наведена на рисунку 3 й описується виразом

$$I = I_d - I_c = I_0 \left[ \exp\left(\pm \frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$I_0 = \left( \frac{qD_p p_n}{L_n} + \frac{qD_n n_p}{L_p} \right) S, \quad (2)$$

де  $I_d$ ,  $I_c$  – дифузійний струм та струм провідності (дрейфовий струм);  $q$  – заряд електрона;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – термодинамічна температура (Кельвіна);  $U$  – зовнішня напруга, прикладена до  $p$ - $n$ -переходу;  $A$  – діодний коефіцієнт або коефіцієнт ідеальності переходу;  $p$ ,  $n$  – коефіцієнти дифузії дірок та електронів, відповідно;  $p_n$ ,  $n_p$  – концентрації дірок в  $n$ -області та електронів у  $p$ -області;  $D_n$ ,  $D_p$  – коефіцієнти дифузії електронів та дірок;  $L_n$ ,  $L_p$  – дифузійна довжина вільного пробігу дірок і електронів.

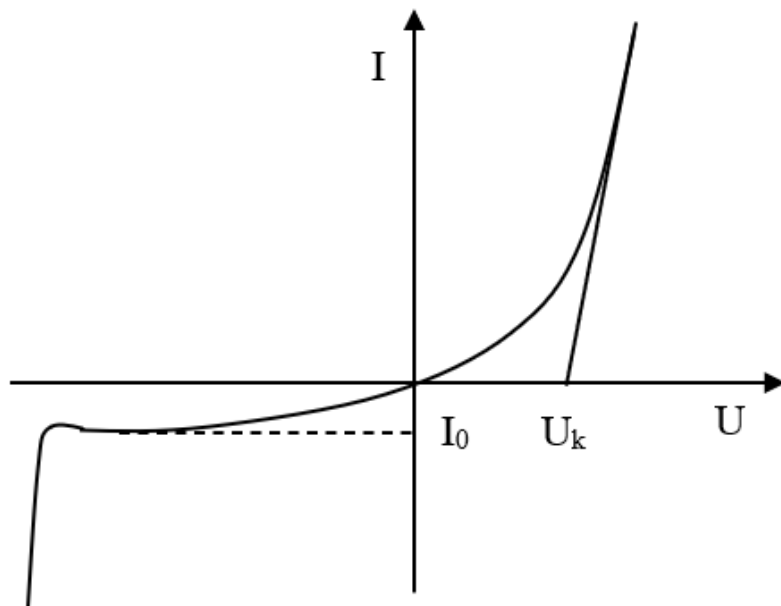


Рисунок 3 – Вольт-амперна характеристика ідеального  $p$ - $n$ -переходу електронів;  $S$  – площа  $p$ - $n$ -переходу.

У співвідношенні (1) позитивна напруга відповідає прямій гілці ВАХ, негативна – оберненій. За умови прямої напруги одиницею у виразі (1) можна знехтувати, у той час, як у разі оберненої можна знехтувати доданком, що містить експоненту.

У разі дифузійного проходження струму в гомопереходах (модель розроблена Андерсоном) діодний коефіцієнт  $A$  дорівнює одиниці ( $A = 1$ ).

У деяких типах структур з  $p$ - $n$ -переходом рекомбінацією носіїв у збідненому шарі знехтувати неможливо. Здебільшого це стосується гомопереходів, що знаходяться за низької напруги зміщення й гетеропереходів.

Теорія симетричного гомогенного переходу, що враховує рекомбінаційно-генераційні процеси в збідненому шарі, розроблена Са, Нойсом і Шоклі (**СНШ-теорія**). Для прямої гілки ВАХ одержане співвідношення, аналогічне (1). Але із цієї теорії випливає дещо інше значення струму насичення, крім того,



коефіцієнт діодності  $A$  дорівнює 2. Для опису механізму перенесення струму через гетероструктури в наш час запропоновано декілька фізичних моделей: *дифузійну, емісійну, рекомбінаційну, тунельну*. Вони протікають крізь  $p$ - $n$ -перехід Андерсон розділяє на теплові й нетеплові. Характерно, що дифузійна, емісійна та рекомбінаційна теорії (враховують теплові струми) приводять до однакового математичного виразу який описує проходження струму через гетероперехід. Необхідно зазначити, що це співвідношення за виглядом не відрізняється від виразу, який описує ВАХ гомопереходу:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

тут

$$I_0 = I_{00} \exp\left(-\frac{qU_k}{AkT}\right). \quad (4)$$

де  $I_0$  – струм насичення;  $U_k$  – висота потенційного бар'єра на переході за відсутності зовнішньої напруги.

Ці фізичні параметри визначаються механізмом проходження струму через структуру. У разі дифузійного механізму  $A = 2$ , емісійного механізму  $A = 1$ , рекомбінаційного –  $1 < A < 2$ , тунельного –  $1,3 < A < 2$ .

### ***Освітлення $p$ - $n$ -переходу та його світлова ВАХ***

Припустимо тепер, що на  $p$ - $n$ -перехід падають фотони з енергією більшою, ніж ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу ( $h\nu > E_g$ ). У результаті поглинання фотона виникає електронно-діркова пара. Під дією внутрішнього поля в  $p$ - $n$ -переході створені світлом носії заряду рухаються в протилежних напрямках: дірки – в  $p$ -область, а електрони – в  $n$ -область. Водночас носії заряду, що перейшли через  $p$ - $n$ -перехід, створюють додатковий струм. Оскільки надлишкові дірки, що перейшли в  $p$ -область, зменшують від'ємний об'ємний заряд і відбувається зниження потенційного бар'єра на межі  $p$ - $n$ -

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

Електрони з  $n$ -області та дірки з  $p$ -області, долаючи знижений потенційний бар'єр, будуть інжектвані в іншу область, де вони стануть неосновними носіями заряду й рекомбінують. При цьому струми, обумовлені інжектваними носіями заряду, спрямовані з  $p$  в  $n$ -область. Стаціонарний стан установиться тоді, коли кількість створених світлом електронно-діркових пар зрівняється з кількістю носіїв заряду, що проходять через бар'єр  $p$ - $n$ -переходу в протилежному напрямі.

Якщо  $p$ - $n$ -перехід з'єднаний із зовнішнім електричним колом, то в ньому генерується фото-ЕРС. ВАХ освітленого СЕ являє собою суперпозицію темної ВАХ  $p$ - $n$ -переходу й фотогенерованого (світлового) струму. Під дією світла темнова ВАХ зміщується вниз за віссю струмів у четверту чверть, у якій приладом генерується корисна потужність (рис. 4). Оскільки освітлення СЕ приводить до збільшення струму  $p$ - $n$ -переходу на світловий струм рівняння діода набуває вигляду

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_L, \quad (5)$$

де  $I_L$  – світловий струм.

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

$$I_L = j_L S = q\alpha\gamma\beta SI_r / h\nu, \quad (6)$$

де  $j_L$  – густина фотоструму;  $S$  – площа  $p$ - $n$ -переходу;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла;  $\beta$  – квантовий вихід;

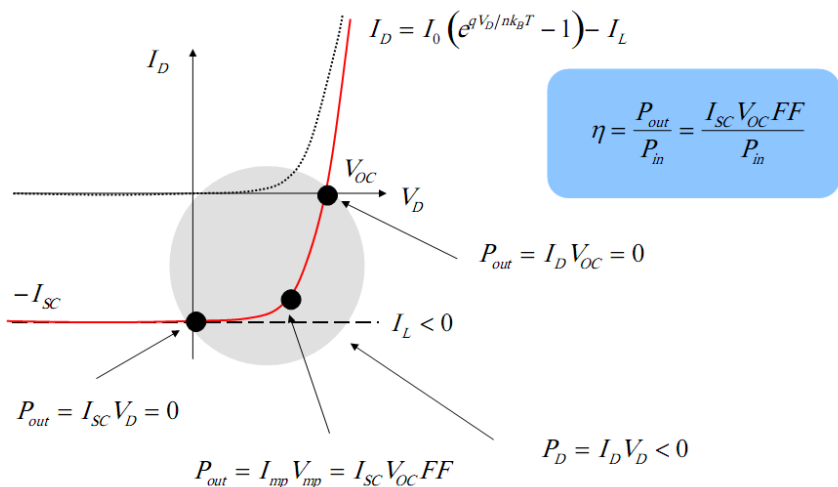


Рисунок 4 – Світлова ВАХ та основні характеристики СЕ

$\gamma$  – коефіцієнт збирання носіїв – частка електронно-діркових пар, що непрорекомбінували та були розділені переходом;  $I_r$  – інтенсивність випромінювання.

Останній вираз справедливий для прикладу, коли все світло, що падає на напівпровідник, поглинається матеріалом. Рівняння світлової ВАХ залишається справедливим при освітленні фотоелемента світлом довільного спектрального складу, водночас змінюється лише значення фотоструму  $I_L$ .

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

Напруга холостого ходу СЕ  $U_{oc}$  (див. рис. 4) відповідає напрузі на розімкнених клеммах фотоелемента ( $R = \infty$ ). Вона може бути одержана, якщо прийняти у співвідношенні (5)  $I = 0$ .

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \left( \frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right]. \quad (7)$$

Із виразу (7) випливає, що напруга  $U_{oc}$  може бути підвищена за рахунок збільшення відношення  $I_L/I_0$ . Цього можна досягти, знижуючи темновий струм методом збільшення рівня легування підкладки, або часу життя неосновних носіїв заряду. Збільшення струму короткого замикання також може привести до підвищення напруги холостого ходу, однак ефект від цього не такий виражений, як у разі зменшення темнового струму.

Коефіцієнт корисної дії ФЕП розраховують за формулою

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P_s}, \quad (8)$$

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

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}, \quad (9)$$

де  $I_m$  та  $U_m$  – густина струму й напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу (рис. 5).

Із рівняння (9) випливає, що коефіцієнт форми вказує, наскільки реальна ВАХ СЕ відрізняється від ідеальної, що являє собою прямокутну сходику з напругою  $U_{oc}$  і струмом  $I_{sc}$ .

Вихідна потужність ФЕП дорівнює

$$P = IU = I_s U. \quad (10)$$

Максимальну потужність СЕ, що виділяється в зовнішньому колі можна одержати в разі правильного узгодження опорів ФЕП та навантаження. Положення точки максимальної потужності на світловій ВАХ можна знайти прийнявши, що  $dP/dU = 0$  (умова екстремуму функції) (рис. 5).

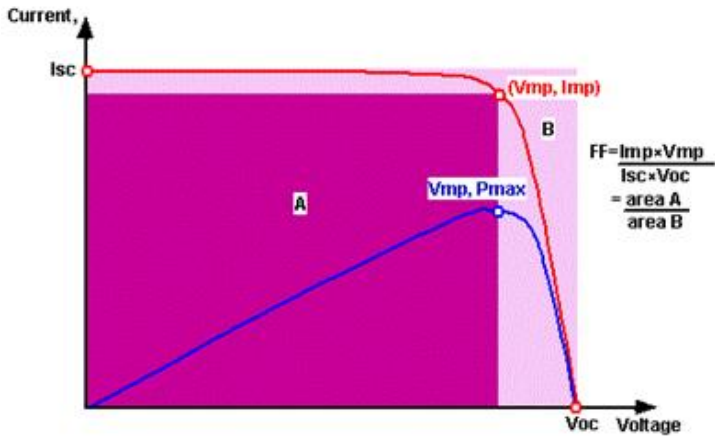


Рисунок 5 – Визначення фактора заповнення  $FF$  ВАХ СЕ

Звідси одержимо значення струму та напруги в цій точці

$$I_m = I_s U_m e^{U_m I_L} \left(1 - \frac{1}{U_m}\right), \quad (11)$$

$$U_m = \ln \frac{I_L/I_s + 1}{1 + U_m} U_{oc} - \ln(1 + U_m), \quad (12)$$

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

Формула (12) дозволяє визначити  $U_m$  методом послідовних наближень. В якості першого наближення в праву частину підставляють  $U_m = U_{oc}$ , при другому наближенні – визначене значення  $U_m$ . Двох ітераційних обчислень достатньо для одержання чотирьох правильних значущих цифр напруги. Можна також розв'язати трансцендентне рівняння (12), використавши функцію `fsolve` пакета `Maple`. Значення  $I_m$  визначають методом підстановки  $U_m$  у співвідношення (11).

Відповідно опір оптимального зовнішнього навантаження СЕ дорівнює  $R_{op} = dU_m/dI_m$ .

Отже, максимальну вихідну потужність ФЕП визначають співвідношенням

$$P_m = I_m U_m \approx I_L \cdot U_m \quad (13)$$

Реальний СЕ на відміну від ідеального р-п-переходу має послідовний та шунтувальний опори. Здебільшого еквівалентну електричну схему освітленого ФЕП зображують у вигляді електричного кола із зосередженими опорами (рис. 6), а його ВАХ записують у вигляді

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{q(U - IR_s)}{kT} - 1 \right] + \frac{U - IR_s}{R_{sh}} - I_L \quad (14)$$

де  $R_s$  – послідовний опір;  $R_{sh}$  – шунтувальний опір.

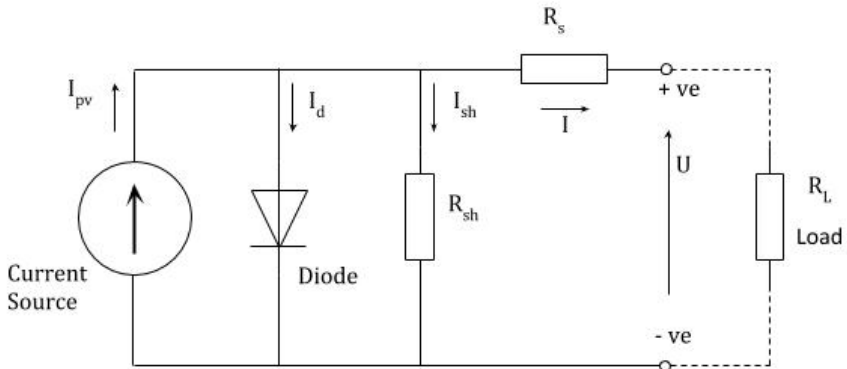


Рисунок 6 – Еквівалентна електрична схема реального СЕ з послідовним  $R_s$  і шунтувальним  $R_{sh}$  опорами

Послідовний опір обумовлений об’ємним опором шарів, що утворюють СЕ та опором контактів на лицьовій і зворотній

сторонах приладу. Шунтувальний опір здебільшого пов'язаний зі струмами витоку  $p$ - $n$ -переходу. Канали об'ємних витоків створюються чужорідними мікро- та макровключеннями в матеріалі діода. Канали поверхневих витоків утворюються при інтенсивній рекомбінації електронно-діркових пар через поверхневі енергетичні стани напівпровідника, що виникають через порушення валентних зв'язків, а також під час проходження струму по забрудненнях у місцях виходу  $p$ - $n$ -переходу на поверхню.

Послідовний і шунтувальний опори обумовлюють втрати енергії в СЕ, що призводять до зменшення коефіцієнта форми ВАХ і напруги холостого ходу (рис. 7). Тому знання цих параметрів дуже важливо для вдосконалення технології виготовлення ФЕП.

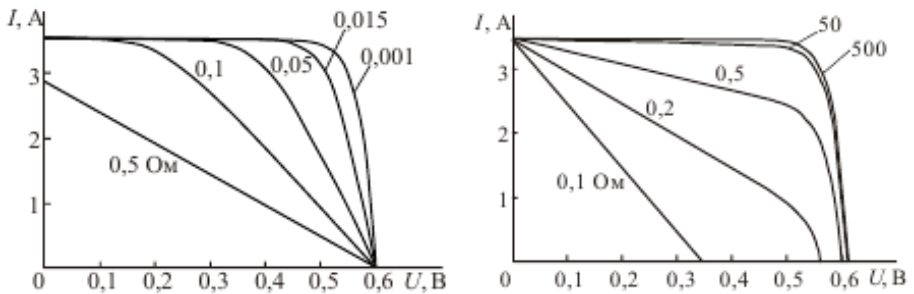


Рисунок 7 – Вплив послідовного  $R_s$  та шунтувального  $R_{sh}$  опорів на вигляд ВАХ СЕ

Падіння напруги на послідовному опорі  $R_s$  впливає на ВАХ, значно більше, ніж падіння напруги на шунтувальному опорі (рис. 7 а). Як видно з рисунку, під час збільшення послідовного опору від 0 до 5 Ом потужність СЕ зменшується більше ніж на 70 %. За умови  $j_{sc} = 40 \text{ mA/cm}^2$  і  $U_{oc} = 0,6 \text{ В}$  для того, щоб частка втрат була меншою ніж 3 %, послідовний опір квадратного сантиметра площі елемента не повинен перевищувати 0,5 Ом.

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

Із рівняння (14) видно, що вплив  $R_s$  на ВАХ найбільш значний при сильних струмах (високій напрузі зміщення), тоді як вплив  $R_p$  – за низької напруги, коли струм, що проходить через перехід, малий порівняно з шунтувальним струмом. Легко зрозуміти, що з ВАХ можна визначити як послідовний, так і шунтувальний опір приладу.

Процес перетворення сонячної енергії на електричну можна умовно розбити на чотири стадії: 1) поглинання світла; 2) генерація електронно-діркових пар; 3) поділ носіїв заряду  $p$ - $n$ -переходом; 4) збирання носіїв заряду на електродах.

Ці чотири стадії перетворення сонячної енергії можна виділити в роботі практично всіх наявних СЕ. Непродуктивна робота будь-якої із цих стадій призводить до зниження ефективності перетворення енергії ФЕП у цілому.

#### **4. ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ**

Принципова схема установки, що використовуваної під час дослідження темнових і світлових ВАХ СЕ, наведена на рисунку 1 вступу. Джерело напруги Б1 призначене для прикладання напруги до приладу. Реостат R дозволяє плавно змінювати цю напругу. Вольтметр V1, амперметр (мікроамперметр) А1 призначені для вимірювання падіння напруги на ФЕП ( $U$ ) і струму  $I$ , що проходить через нього, відповідно. Перемикач S1 дає можливість змінювати полярність напруги, що прикладається до СЕ. Вимикач К1 дозволяє замкнути або розімкнути електричне коло. Для освітлення СЕ використовують світлодіод С1.

#### **5. ХІД РОБОТИ**

1. Під'єднати СЕ до лівої пари контактів 14 і 15 лабораторного стенда для дослідження електричних характеристик напівпровідникових приладів (рис. 1 вступу) так щоб діод був включений у запірному напрямі за схемою, наведеною на рисунку 8а.

2. Змінюючи напругу блока живлення провести вимірювання темнового струму та падіння напруги на СЕ (темнової ВАХ), перед цим щільно заклавши його підручним



матеріалом. Вимірювання необхідно провести за 8–10 різних значень напруги. На початковій ділянці ВАХ вимірювання потрібно провести з меншим кроком. Показання приладів занести до таблиці 1. Напруга, що подається на СЕ, не повинна перевищувати 5 В. Після закінчення вимірювань зменшити струм в електричному колі до нуля.

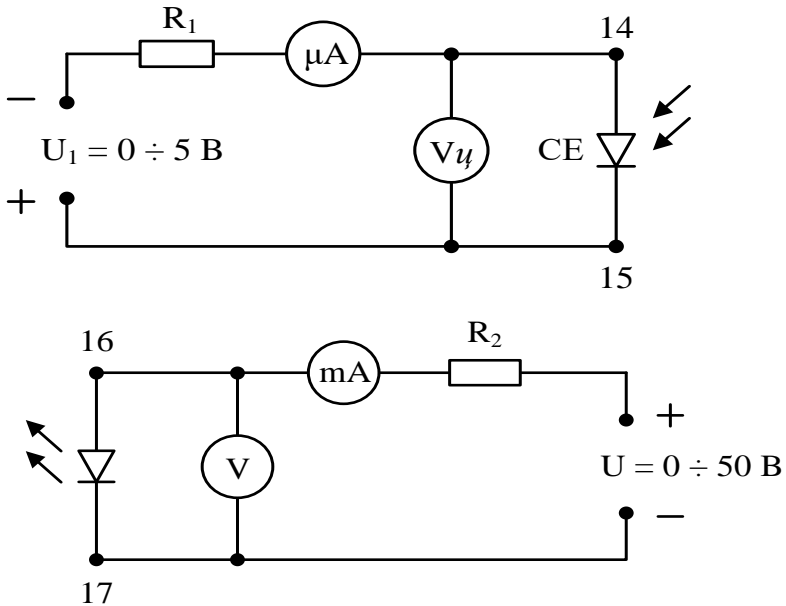


Рисунок 8 – Принципова схема установки для дослідження темнових та світлових ВАХ СЕ

3. Для зняття прямої гілки ВАХ змінити полярність блока живлення, не змінюючи полярності мікроамперметра і СЕ. Під час вимірювання зручніше покроково змінювати струм через його швидко зміну в разі збільшення напруги. Показання приладів занести до таблиці 1.

4. Для зняття світлової ВАХ ФЕП подати напругу на світлодіоди, забезпечивши тим самим освітлення приладу. **Прямий струм світлодіодів не повинен перевищувати 20 мА!** Після цього повторити операції наведені у пунктах 1–3.

5. Із використанням графічного редактора побудувати світлову та темнову ВАХ СЕ в пропускнуому й запірному напрямках, використовуючи різні масштаби (міліампери для прямої гілки ВАХ, мікроампери для зворотної).

Таблиця 1 – Результати вимірювання ВАХ СЕ

№	Обернена полярність			Пряма полярність		
	$U$	$I$ (в темноті)	$I$ (при освітлені)	$U$	$I$ (в темноті)	$I$ (при освітлені)
1						
2						
3						
4						
5						
...						
N						

Правий верхній кут використати для побудови прямої гілки ВАХ, лівий нижній – для зворотної.

6. У точці перетину дотичної до прямої гілки темної ВАХ в області великих струмів із віссю напруги визначити контактну різницю потенціалів  $U_k$ . Розрахувати висоту потенційного бар'єра на переході  $qU_k$ . За кутом нахилу дотичної знайти послідовний опір СЕ ( $R_s = dU/dI$ ). За зворотною гілкою ВАХ визначити струм насичення  $I_0$ . При  $U = 1$  В знайти коефіцієнт випрямлення діода ( $K$ ) як відношення прямого струму до зворотного.

7. Зі світлової ВАХ СЕ визначити струм короткого замикання  $I_{sc}$ , напругу холостого ходу  $U_{oc}$ , фактор заповнення ВАХ – FF (співвідношення (9)), ККД  $\eta$  (співвідношення (8)).

## 6. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Номер, назва, мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості. Принципова схема вимірювань.

3. Робоча таблиця з результатами вимірювань.
4. Графік прямої та зворотної гілки темної ВАХ у координатах  $I-U$ .
5. Графіки прямої та зворотної гілки світлової ВАХ.
6. Розрахунки  $U_k, qU_k, I_0, K, R$  (рис. 3).
7. Визначення основних характеристик СЕ ( $I_{sc}, U_{oc}, I_m, U_m, R_{op}, FF, \eta$ ).
8. Висновки.

## 7. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисов О. В. Твердотільна електроніка : підручник для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 484 с.
2. Бондаренко І. М. Твердотільна електроніка : навч. посібник для студентів ЗВО / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, О. Б. Галат, В. П. Карнаушенко. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 236 с.
3. Васильєва Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко. – Київ : Кондор, 2003. – 388 с.
4. Дружинін А. О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів : навч. посіб. / А. О. Дружинін. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – 332 с.
5. Poortmans J. Thin film solar cells: Fabrication, characterization and application / J. Poortmans, V. Arkhipov. – Leuven, Belgium : John Wiley & Sons, Ltd. IMEC, 2006. – 471 p.

## **ВПЛИВ ОСВІТЛЕННЯ Й КУТА ПАДІННЯ СВІТЛА НА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **1. МЕТА РОБОТИ**

Дослідити вплив інтенсивності та спектрального складу світла на світлові вольт-амперні характеристики СЕ.

Дослідити вплив кута падіння світла на світлові вольт-амперні характеристики ФЕП.

Визначити основні характеристики фотоперетворювачів і дослідити вплив вище вказаних факторів на них.

### **2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Сонячна енергетика – це галузь науки й техніки, що розробляє наукові основи, методи й технічні засоби використання енергії сонячного випромінювання на Землі і в космосі для одержання електричної, теплової або інших видів енергії та визначає області й масштаби ефективного використання енергії Сонця в економіці країни.

Відомо, що Сонце випромінює в кожен момент часу в космос близько  $4 \cdot 10^{23}$  кВт, із яких на Землю припадає близько  $0,25 \cdot 10^9$  усього обсягу його випромінювання. Потужність сонячної радіації на поверхні Землі становить  $1,75 \cdot 10^{17}$  Вт, що еквівалентно  $5,4 \cdot 10^{24}$  Дж енергії на рік. Це в 10 разів перевищує загальносвітлові запаси органічного палива, які оцінюються в  $6,9 \cdot 10^{23}$  Дж, або в 1 000 разів перевищує прогнозоване до кінця сторіччя загальносвітлове енергоспоживання, що дорівнює  $15,3 \cdot 10^{20}$  Дж. Якщо прийняти, що потужність усіх видів енергоустановок на Землі становить на сьогодні близько 13 ТВт або  $13 \cdot 10^9$  кВт, то потужність сонячного випромінювання перевищує сучасні потреби людства в тисячі разів. Отже, використання навіть 0,1 % сумарного енергетичного потенціалу сонячної радіації дозволить цілком задовольнити енергетичні потреби людства до кінця XXI століття. Потенціал сонячної

енергії, що надходить на Землю в 5 000 разів більше за потенціал вітрової енергії, і в 1 500 разів за більше потенціал гідроенергії. До того ж, вважають, що без шкоди для екології навколишнього середовища може бути використано 1,5 % усієї сонячної енергії, що потрапляє на землю.

У наш час серед різних методів перетворення сонячної енергії найбільш перспективним вважають її перетворення на електричну з використанням фотовольтаїчного ефекту.

Сонячні елементи (СЕ) – це електронні прилади, що здійснюють пряме перетворення сонячного світла на електричну енергію. Кілька фотоперетворювачів, з'єднаних у певній послідовності на одній підкладці, утворюють так званий сонячний модуль.

СЕ можна класифікувати за інтенсивністю збирання світла, за хімічним складом, товщиною та кристалічною структурою шарів, кількістю суміщених на одній підкладці елементів тощо. За інтенсивністю збирання світла СЕ поділяються на одиничні й концентраторні. Одиночні СЕ не мають спеціальних пристроїв для збирання світла й поглинають лише ту кількість світлового потоку, що падає на площу поверхні, яку вони займають. Концентраторні СЕ мають спеціальні світлові пристрої (лінзи або дзеркала), що дозволяють збільшувати густину світлового потоку на поверхню елементів у кілька разів.

ККД СЕ залежить від багатьох факторів, але вирішальним є освітленість і його орієнтація відносно джерела випромінювання.

Розглянемо вплив освітлення на струм короткого замикання та напругу холостого ходу СЕ на основі *p-n*-переходу.

Величину фотоструму представимо як

$$I_L = j_L S = q\alpha\beta\gamma SI_r / h\nu, \quad (1)$$

де  $j_L$  – густина фотоструму;  $S$  – площа *p-n*-переходу;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла;  $\beta$  – квантовий вихід;  $\gamma$  – коефіцієнт збирання носіїв – частка електронно-діркових пар, що непрорекомбінували та були розділені переходом;  $I_r$  – інтенсивність (потужність) випромінювання, що падає.

Із рівняння видно, що фотострум ФЕП, який за модулем дорівнює струму короткого замикання ( $I_L = -I_{SC}$ ), прямопропорційний освітленості приладу та зростає в разі його збільшення.

Добре відомо, що світлова вольт-амперна характеристика (ВАХ) СЕ, описується рівнянням

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_L. \quad (2)$$

Звідси напруга на приладі дорівнює

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right). \quad (3)$$

Напруга холостого ходу ФЕП  $U_{oc}$  відповідає напрузі на розімкнених клеммах фотоелемента ( $R = \infty$ ). Вона може бути одержана, якщо прийняти у співвідношенні (3)  $I = 0$ .

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \left( \frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right]. \quad (4)$$

Підставляючи в це рівняння співвідношення (1) одержимо

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \left( \frac{q\alpha\beta\gamma SI_r/h\nu}{I_0} \right) + 1 \right]. \quad (5)$$

За умови малого рівня збудження логарифм у цьому виразі може бути розкладений у ряд і розкладання може бути обмежене першим членом, тобто  $\ln(1+x) \sim x$  і тому

$$U_{oc} = kT \frac{SI_r}{h\nu I_0}. \quad (6)$$

Отже, напруга холостого ходу за умов низького рівня освітленості СЕ пропорційна інтенсивність випромінювання  $U_{oc} \sim I_r$ , тобто залежність  $U_{oc} = f(I_r)$ , є лінійною.

У разі високого рівня освітленості  $I_L/I_0 \gg 1$ , так що

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{q\alpha\beta\gamma S I_r}{h\nu I_0} \quad (7)$$

У результаті відповідна світлова характеристика ФЕП має вигляд логарифмічної функції  $U_{oc} \sim \ln(I_r)$ .

Із виразу (7) випливає, що в разі збільшення інтенсивності світла фото ЕРС СЕ зростає до тих пір, поки не зрівняються струми  $I_L$  і  $I_0$ , тобто поки не зникне потенційний бар'єр, що перешкоджає переходу носіїв заряду через  $p-n$ -перехід. Висота цього бар'єра визначає максимально досягне значення напруги холостого ходу ФЕП. Саме тому  $U_{oc}$  залежить від ступеня легування матеріалу, а отже, від положення рівня Фермі в ньому. За високого рівня легування матеріалу СЕ максимальне значення напруги холостого ходу відповідає ширині забороненої зони напівпровідника.

Вплив освітленості на світлову ВАХ СЕ ілюструє рисунок 1.

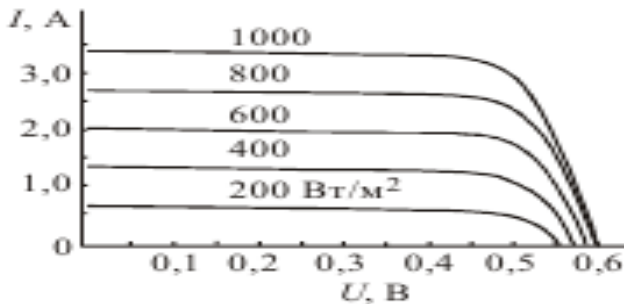


Рисунок 1 – Світлові ВАХ СЕ за різної потужності світлового потоку

Оскільки збільшення освітленості СЕ приводить як до зростання його струму короткого замикання так і напруги холостого ходу, як результат збільшується його потужність ( $P = FF \cdot I_{cs} \cdot U_{oc}$ ) і ККД. Отже, використання концентраторів сонячного випромінювання є одним із методів збільшення ефективності ФЕП.

Потрібно зазначити, що генерація електричного струму СЕ можлива лише за умови, якщо енергія квантів світла перевищує ширину забороненої зони поглинального матеріалу приладу ( $h\nu > E_g$ ).

На ККД СЕ також істотно впливає кут падіння сонячного випромінювання. У разі перпендикулярного падіння світла на прилад виникає максимальний фотострум. Під час зменшення кута падіння прямого сонячного випромінювання на поверхню сонячного модуля його корисна потужність зменшується.

Згідно з фотометричним законом сила світла  $I$  пов'язана з освітленістю поверхні  $E$  та відстанню від джерела до поверхні виразом

$$I = \frac{Er^2}{\cos \alpha}$$

де  $\alpha$  – кут падіння світла на елемент поверхні.

Із теоретичних міркувань випливає, що фотострум сонячного модуля пропорційний косинусу кута падіння світла ( $I_L \sim \cos \alpha$ ).

Залежність фотоструму ФЕП від кута падіння світла має значення для практиків під час установки сонячних модулів. Водночас дуже важливо, щоб СЕ були розміщені так, щоб одержати найкращий результат під час освітлення їх сонцем у будь-яку пору року. Це пов'язано з тим, що висота підняття сонця над горизонтом улітку та взимку істотно відрізняються (рис. 2), але в будь-яку пору року воно сходить на сході а заходить на заході.

ФЕП під час їх установки на дахах будинків повинні бути встановлені в напрямі падіння прямих сонячних променів, а саме – у північній півкулі в південному напрямі.



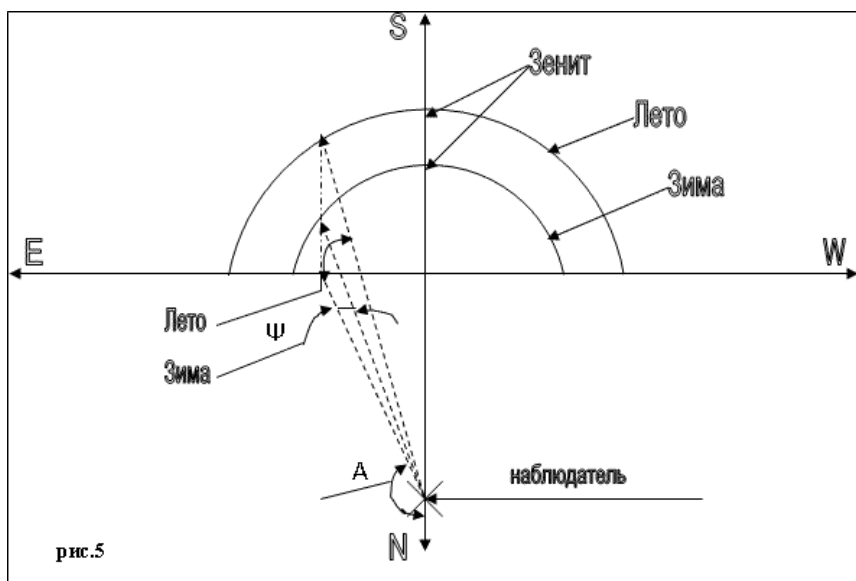


Рисунок 2 – Переміщення сонця відносно сторін світу влітку та взимку

Також вони повинні бути встановлені під правильним кутом нахилу до горизонту, щоб уловлювати максимально можливу кількість сонячної енергії. Звичайно СЕ встановлюють так, щоб їх поверхня мала нахил у бік екватора під кутом, що дорівнює географічній широті місця їх використання. Для м. Суми цей кут становить  $51^\circ$ .

### 3. ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ

Зовнішній вигляд лабораторного стенда, що використовують під час дослідження впливу умов освітлення на світлові ВАХ СЕ, наведений на рисунку 1 введення. Лівий блок живлення призначений для прикладання напруги до приладу. Цифровий вольтметр 19 і зовнішній мікроамперметр із межами вимірюваних струмів «200 мкА-0-200 мкА», із можливістю їх розширення до 2 мА, призначений для вимірювання падіння напруги на ФЕП ( $U$ ) і струму  $I$ , що проходить через нього

відповідно. Для освітлення СЕ використовують світлодіоди, під'єднані до правої пари 16 і 17 контактів лабораторного стенда.

#### 4. ХІД РОБОТИ

1. Під'єднати СЕ світлодіод до лівої пари контактів 14 і 15 лабораторного стенда для дослідження електричних характеристик напівпровідникових приладів (рис. 3) так, щоб діод був включений у прямому напрямі за схемою, наведеною на рисунку 4.

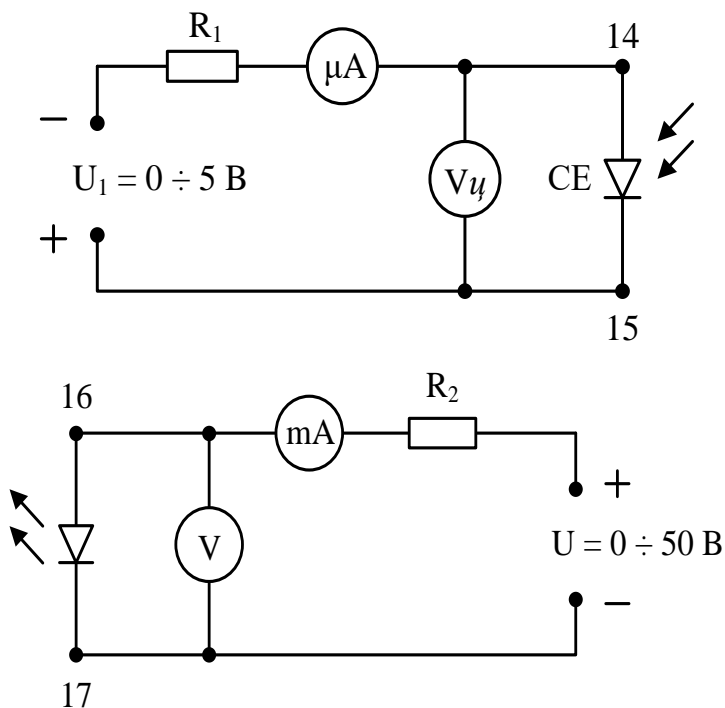


Рисунок 3 – Принципова схема установки для дослідження світлових ВАХ СЕ

Подати напругу  $U_{LED}$  на світлодіоди, забезпечивши тим самим освітлення ФЕП. Змінюючи значення  $I_{LED}$  занести до таблиці 1.

**Прямий струм світлодіодів не повинен перевищувати 20 мА!**

Змінюючи напругу блока живлення, провести вимірювання світлової ВАХ СЕ. Здійснити його потрібно при 8–10 різних значеннях напруги. Показання приладів внести до таблиці 1.

Із ВАХ визначити струм короткого замикання  $I_{sc}$  та напругу холостого ходу  $U_{oc}$ .

2. Змінюючи напругу на світлодіодах, виставити фіксовані значення струму в межах від 0 до 10 мА (не менше 5 значень). Визначити залежність струму короткого замикання  $I_{sc}$  і напруги холостого ходу  $U_{oc}$  від освітленості СЕ (струму через світлодіод).

Таблиця 1 – Результати вимірювання

№	Залежність параметрів СЕ від освітлення				Залежність параметрів СЕ від кута падіння світла		
	$U_{LED}$	$I_{LED}$	$I_{sc}$	$U_{oc}$	$\alpha$	$I_{sc}$	$U_{oc}$
1							
2							
3							
4							
5							
...							
N							

3. Подати напругу  $U_{LED}$  на світлодіоди, забезпечивши тим самим освітлення ФЕП. Змінюючи кут нахилу панелі СЕ ( $\alpha = 0; 30^0; 45^0; 60^0; 90^0$ ) визначити залежність  $I_{sc}$  та  $U_{oc}$  від цього кута.

4. Побудувати графіки залежності  $I_{sc} = f(I_{LED})$ ,  $U_{oc} = f(I_{LED})$ ,  $I_{sc} = f(\cos\alpha)$ ,  $U_{oc} = f(\cos\alpha)$ .

5. Користуючись наявними світофільтрами, зняти й побудувати спектральні залежності фотоструму ФЕП ( $I_{\phi}/I_{\phi max} = f(\lambda)$ ). Дослід провести для прикладу  $I_{max} = 20$  мА. Результати внести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати вимірювання спектральних залежностей фотоструму

Колір	$\lambda$ , нм	$E$ , еВ	$I_{\phi}$ , мА	$I_{\phi}/I_{\phi \max}$
Червоний	630			
Помаранчевий	580			
Жовтий	560			
Синій	470			
Фіолетовий	430			

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Номер, назва, мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості. Принципова схема вимірювань.
3. Робоча таблиця з результатами вимірювань.
4. Графік залежності струму короткого замикання СЕ від освітленості,  $I_{sc} = f(I_{LED})$ .
5. Графік залежності напруги холостого ходу СЕ від освітленості,  $U_{oc} = f(I_{LED})$ .
6. Графік залежності струму короткого замикання від косинуса кута нахилу панелі приладу,  $I_{sc} = f(\cos\alpha)$ .
7. Графік залежності напруги холостого ходу від косинуса кута нахилу панелі приладу  $U_{oc} = f(\cos\alpha)$ .
8. Спектральна залежність фотоструму.
9. Висновки.

## 6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисов О. В. Твердотільна електроніка : підручник для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 484 с.
2. Бондаренко І. М. Твердотільна електроніка : навч. посібник для студентів ЗВО / І. М. Бондаренко, О. В. Бородін, О. Б. Галат, В. П. Карнаушенко. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 236 с.

3. Васильєва Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко. – Київ : Кондор, 2003. – 388 с.

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

5. Poortmans J. Thin film solar cells: Fabrication, characterization and application / J. Poortmans, V. Arkhipov. – Leuven, Belgium : John Wiley & Sons, Ltd. IMEC, 2006. – 471 p.

## ДОДАТОК А

Таблиця 3 – Таблиця фізичних констант

Фізична величина	Значення	Одиниці
$q$ – елементарний заряд	$1,602176\ 487 \cdot 10^{-19}$	Кл
$m_o$ – маса електрона	$9,109\ 382\ 15 \cdot 10^{-31}$	кг
$h$ – стала Планка	$6,626\ 06896 \cdot 10^{-34}$	Дж·с
$c$ – швидкість світла	$2,99792458 \cdot 10^9$	м/с
$k$ – стала Больцмана	$1,3806504 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
$\varepsilon_0$ – діелектрична стала	$8,854\ 187\ 817 \cdot 10^{-19}$	Ф/м

Електронне навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни **«Електронні системи в  
геліоенергетиці»**  
для студентів *171 «Електроніка»*  
освітньої програми «Електронні системи»  
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк  
Редактор О. Ф. Дубровіна  
Комп'ютерне верстання О. А. Доброжан

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 4.18. Обл.-вид. арк. 4.08.

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