

**Шифр „ РНОТОН ”**

**Галузь науки «Фізика та астрономія»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ  
АПАРАТНО- ПРОГРАМНИХ ПЛАТФОРМ  
ARDUINO**

2019

## ЗМІСТ

стор.

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ .....</b>	<b>4</b>
1.1. Основні параметри ідеальних сонячних елементів.....	4
1.2. Вольт-амперна характеристика реального сонячного елемента .....	6
<b>РОЗДІЛ 2 СУЧАСНІ МЕТОДИКИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....</b>	<b>9</b>
2.1. Особливості дослідження фотоелектричних перетворювачів .....	9
2.2. Професійне експериментальне обладнання .....	14
2.3. Градування еталонних сонячних елементів.....	19
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ARUINO-СУМІСНИХ ЗАСОБІВ .....</b>	<b>21</b>
3.1. Апаратна частина характеріографа .....	21
3.2. Програмне забезпечення та інтерфейс користувача .....	25
3.3. Визначення параметрів сонячного елемента за його вольт-амперною характеристикою .....	27
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>31</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>32</b>

## ВСТУП

Одним з найбільш ефективних методів перетворення сонячної енергії у електричну є використання фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Перетворення енергії у ФЕП засноване на фотовольтаїчному ефекті, який виникає в неоднорідних напівпровідникових структурах при дії на них сонячного випромінювання. Неоднорідність структури ФЕП може бути отримана шляхом легуванням одного і того ж напівпровідника різними домішками (створення р-n - переходів) або шляхом з'єднання різних напівпровідників з неоднаковою шириною забороненої зони та іншими фізичними характеристиками. Для перетворення сонячної енергії використовуються також МДН структури.

Для підвищення ефективності сонячних елементів (СЕ) необхідна оптимізація властивостей як окремих шарів так і конструкції фотоперетворювача в цілому, що можливо шляхом дослідження фізичних процесів, що відбуваються у приладі.

При роботі СЕ відбуваються наступні процеси:

- генерація електронно-діркових пар під дією випромінювання;
- дифузія неосновних фотогенерованих носіїв до р-n переходу;
- розділення носіїв переходом;
- їх збирання омичними контактами

На основні фотоелектричні параметри реального СЕ, такі як вольт-амперна характеристика (ВАХ) і спектральна чутливість, впливають як оптичні, так електрофізичні властивості напівпровідника. Лише детальний аналіз дозволяє визначити причину недостатньо високої ефективності даного конкретного СЕ. Однак для цього перш за все необхідно провести виміри основних його характеристик [1-4], що й дасть можливість зрозуміти причини виникнення, природу і переважаючий тип втрат.

## РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

### 1.1 Основні параметри ідеальних сонячних елементів

При дослідженні ВАХ СЕ та розрахунках їх основних параметрів може бути використана схема заміщення, яка представлена на рис. 1.1. Фотоперетворювач може бути представлений у вигляді діода та джерела струму. Джерело струму  $J$  моделює створений у фотогальванічному елементі під дією фотонів світла струм. При постійній температурі та потужності сонячного випромінювання він постійний, і на еквівалентній схемі заміщення позначається, як  $I_{sc}$  [5].

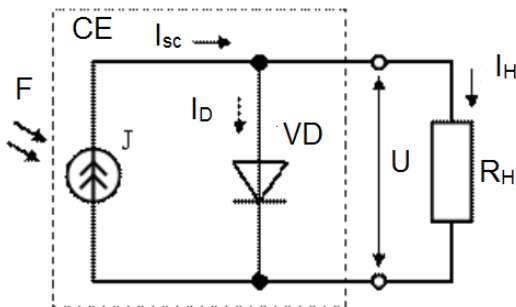


Рис. 1.1. Еквівалентна схема ідеального СЕ

Вихідний струм СЕ на основі р-п переходу, у відповідності до рис. 1.1, можна знайти за законом Кірхгофа:

$$I = I_{sc} - I_D = I_0 \left[ \exp\left(\pm \frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

де  $I$  – вихідний струм фотоелемента;

$I_D$  – струм діода еквівалентної схеми заміщення;

$I_0$  – зворотний струм насичення діоду;

$e$  – заряд електрона;

$U$  – вихідна напруга фотоелемента;

$k$  – стала Больцмана;

$A$  – діодний коефіцієнт або коефіцієнт ідеальності переходу;

$T$  – температура р-п переходу.

При розгляді роботи реальних СЕ потрібно враховувати їх послідовний опір та опір витоку. Тоді вираз для опису ВАХ запишеться у вигляді

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{e(U - IR_{II})}{AkT} - 1 \right] + \frac{(U - IR_{II})}{R_{III}}, \quad (1.2)$$

де  $R_{II}$  - послідовний опір фотоелементу;

$R_{III}$  - шунтуючий опір.

Коефіцієнт корисної дії фотоперетворювача розраховується за формулою

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P}, \quad (1.3)$$

де  $P$  – потужність випромінювання, що падає на СЕ;

$FF$  – фактор заповнення ВАХ, який дорівнює (рис.1.2)

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_{oc}}, \quad (1.4)$$

де  $I_m$  та  $U_m$  – густина струму та напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу.

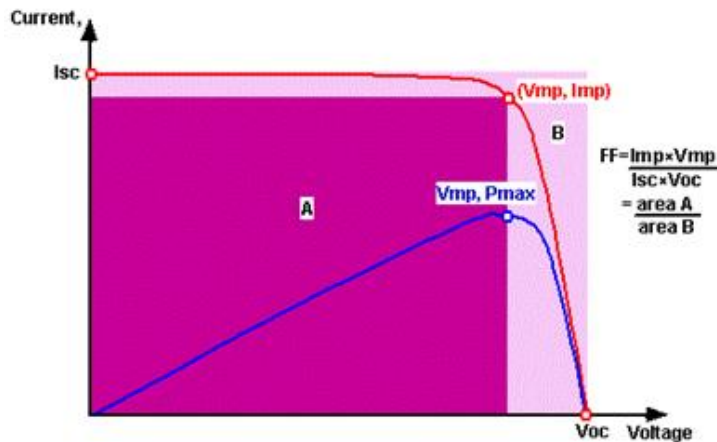


Рис.1.2. Визначення фактора заповнення  $FF$  світлової ВАХ ідеального СЕ [5]

Отже зі світлових ВАХ СЕ визначаються такі важливі параметри фотоелектричних приладів як:

- напруга холостого ходу  $U_{OC}$  ( $U_{xx}$ );
- струм короткого замикання  $J_{SC}$  ( $I_{кз}$ );
- фактор заповнення  $FF$ ;
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .

На ефективність СЕ впливає велика кількість параметрів як самого приладу так і напівпровідникових матеріалів на основі яких він створений. Але основні втрати енергії пов'язані з відбиттям сонячного випромінювання від поверхні перетворювача, проходженням частини світла через фотоелемент без поглинання, поверхневою, міжфазною та об'ємною рекомбінацією генерованих носіїв заряду, внутрішнім та контактним опором приладу тощо [6-9].

## 1.2. Вольт-амперна характеристика реального сонячного елемента

Як було зазначено вище для реальних СЕ необхідно враховувати вплив послідовного та шунтуючого опорів, тому схеми їх заміщення мають наступний вигляд (рис.1.3).

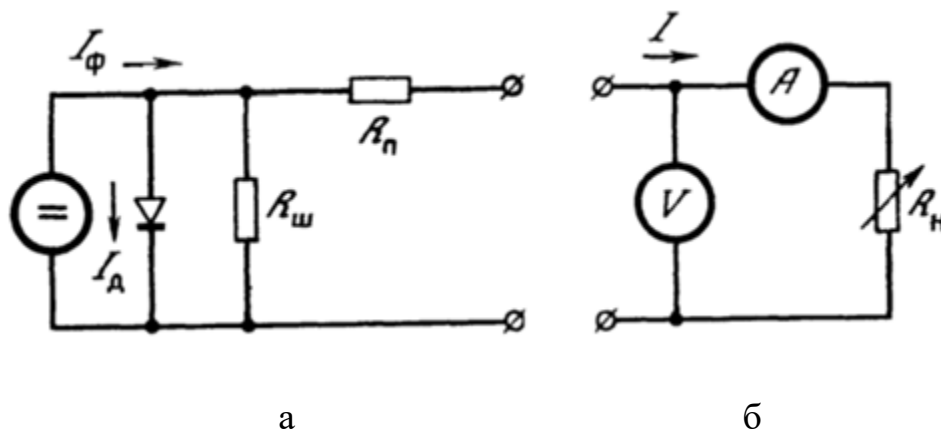


Рис.1.3. Еквівалентна (а) та вимірна (б) електричні схеми реального СЕ [10]

Для розімкнутого зовнішнього кола, коли його опір безмежно великий, а струм  $I=0$ , із приведених вище рівнянь та у відповідності з рис.1.3, можна визначити напругу холостого ходу сонячного елемента  $U_{xx}$

$$U_{xx} = \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1\right) \frac{kT}{q}$$

Для реального СЕ характерним є наявність послідовного опору контактних шарів - опорів кожної із  $p$ - та  $n$ -областей елемента, перехідних опорів метал-напівпровідник, а також шунтуючого опору  $R_{ш}$ , який відображає можливі поверхневі та об'ємні витоки струму на опорі, паралельному до  $p$ - $n$ -переходу. Врахування цих опорів та рекомбінаційних процесів у  $p$ - $n$ -переході дозволяє одержати і записати розгорнутий вираз для вольт-амперної характеристики:

$$\ln\left(\frac{I + I_{\phi}}{I_0} - \frac{U - IR_{п}}{I_0 R_{ш}} + 1\right) = \frac{q}{AkT} (U - IR_{п})$$

Через коефіцієнт  $A$ , що введений у співвідношення, враховується ступінь наближення параметрів реального приладу до характеристик ідеального.

Розрахунок ВАХ за цим співвідношенням дозволяє наглядно представити вплив послідовного та шунтуючого опорів на властивості СЕ. Результати таких розрахунків представлено на рис. 1.4.

У сучасних кремнієвих СЕ коефіцієнт  $FF$  (4) досягає зазвичай 0,75-0,8. Як видно із рисунка, зменшення шунтуючого опору від безмежного до такого малого як, наприклад 100 Ом, мало впливає на форму ВАХ, а отже і на вихідну потужність СЕ. У той же час невеликі зміни послідовного опору, наприклад від 1 до 5 Ом, приводять до значного погіршення форми ВАХ і, відповідно, до відчутного зниження вихідної потужності.

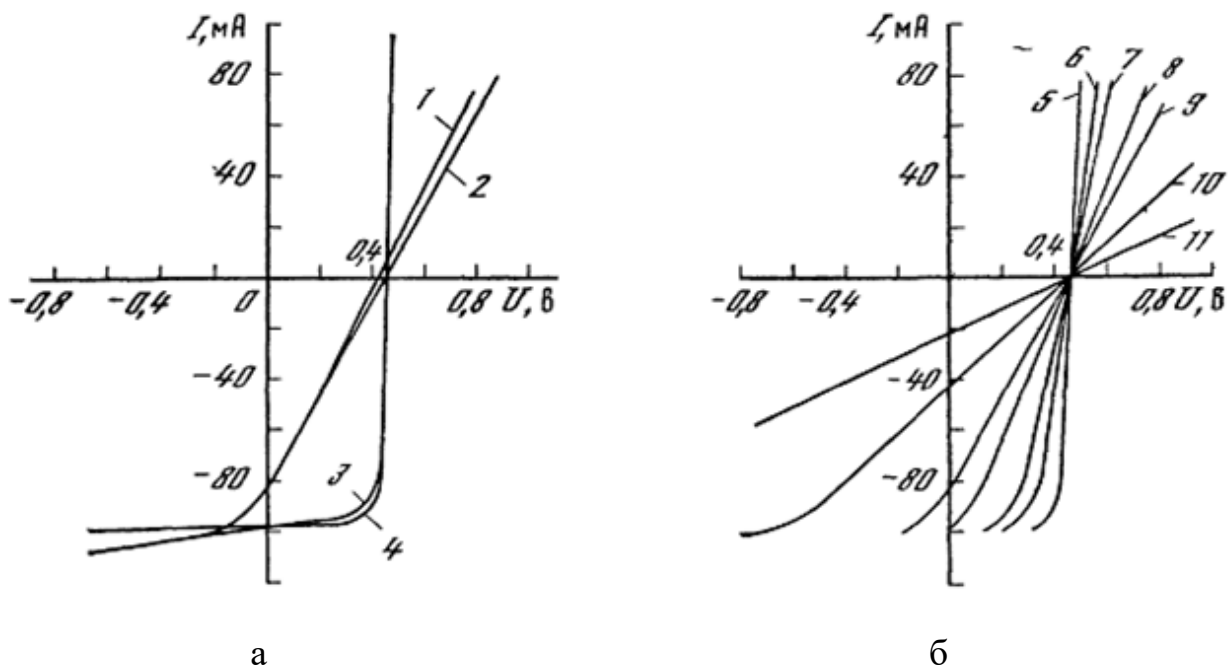


Рис.1.4. Розрахункові ВАХ СЕ із різним співвідношенням послідовного ( $R_{\Pi}$ ), та шунтуючого ( $R_{\text{ш}}$ ) опорів (а), а також із різними послідовними опорами за безмежного шунтуючого опору (б) ( $I_{\phi}=0,1\text{A}$ ;  $I_0=10^{-9}\text{A}$ ;  $q/KT=40\text{ V}^{-1}$ ):

- 1-  $R_{\Pi}=50\text{Om}$ ,  $R_{\text{ш}}=100\text{Om}$ , 2-  $R_{\Pi}=50\text{Om}$ ,  $R_{\text{ш}}=\infty$ ; 3 -  $R_{\Pi}=0$ ,  $R_{\text{ш}}=100\text{Om}$ ;  
 4 -  $R_{\Pi}=0$ ,  $R_{\text{ш}}=\infty$ ; 5-11 -  $R_{\Pi}=0$ , 1, 2, 3.5; 5, 10 і 20 Ом відповідно

Більш детальне дослідження світлової і темної ВАХ СЕ виявило, що для деяких елементів у залежності від величини рівня напруги механізм протікання зворотного через  $p$ - $n$ -перехід струму насичення може змінюватися. Зазвичай, цей струм є сумою двох струмів, тому рівняння ВАХ для сонячного елемента записують у такому вигляді

$$I = I_{01} \left( \exp \frac{q}{AkT} U - 1 \right) + I_{02} \left( \exp \left( \frac{q}{AkT} U \right) - 1 \right) - I_{\phi}$$

де  $I_{01}$ , - зворотний струм насичення, що визначається дифузійними механізмом протікання струму через тонкий  $p$ - $n$ -перехід;  $I_{02}$  - зворотний струм насичення, що визначається, що виникає внаслідок рекомбінації в області  $p$ - $n$ -переходу, а коефіцієнт  $A$ , як правило, дорівнює 2.



## РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ МЕТОДИКИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 2.1. Особливості дослідження фотоелектричних перетворювачів

У першу чергу сонячне випромінювання характеризується таким параметром, як інтенсивність, тобто потужність, що падає на поверхню певної площі. Цей параметр відрізняється в різних регіонах Землі, причому максимальна інтенсивність сонячного випромінювання на нашій планеті перевищує 1300 Вт на кв. метр, але для зручності при вимірах приймають стандартне значення на рівні 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Іншим важливим параметром є розподіл сонячного випромінювання за довжинами хвиль, тобто спектральний склад світла. Для його характеристики введено поняття «повітряної чи атмосферної маси» (АМ – Атмосферна маса): так спектральний склад випромінювання з повітряною масою АМ0 відповідає спектру сонячного світла за межами атмосфери Землі; АМ1 відповідає випромінюванню на поверхні Землі за умови, що Сонце знаходиться строго над точкою спостереження, тобто промені світла пройшли крізь 1 атмосферу. При вимірах стандартом є АМ1.5, що відповідає сонячному випромінюванню, яке пройшло 1,5 атмосфери (рис.2.1).

І ще одною умовою проведення стандартних вимірювань параметрів сонячних елементів є температура. Справа в тому, що характеристики сонячних елементів дещо погіршуються при підвищенні температури, тому дуже важливо, щоб вона не змінювалася при проведенні вимірювань. За стандартом прийнято, що тестування проводиться при 25<sup>0</sup>С.

Під час тестування сонячного елемента необхідно проміряти різні параметри, серед яких струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальна потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД). На питання, яке було

поставлено вище, дає відповідь параметр максимальної потужності СЕ, а ККД показує яка частина падаючої потужності призведе до появи електричної потужності на навантаженні.

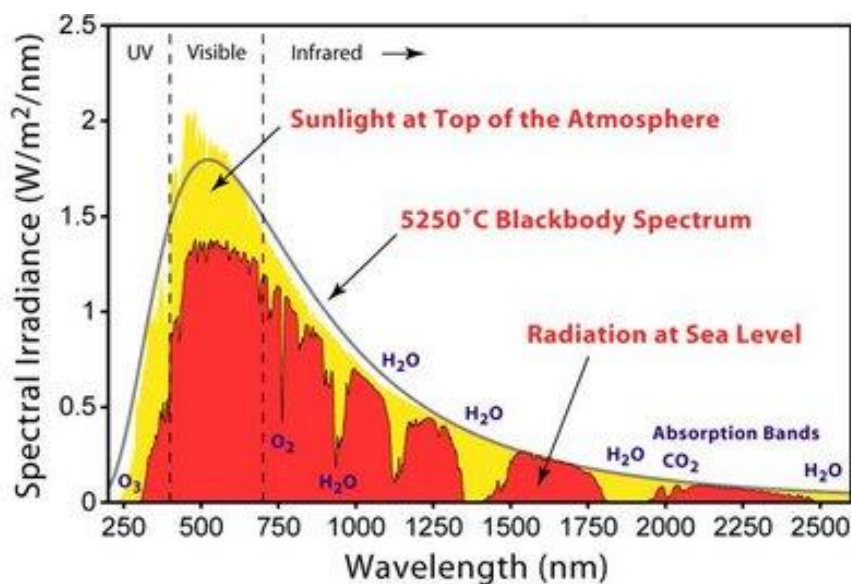


Рис.2.1. Спектр сонячного випромінювання [11]. Показана різниця між випромінюванням за межами атмосфери Землі і біля поверхні Землі на рівні моря

Для проведення вимірювань параметрів сонячних елементів використовуються тестери або тестери-сортувальники (рис.2.2). Вони бувають як імпульсними, так і з опроміненням неперервної дії. Імпульсні тестери цікаві тим, що під час практично миттєвого вимірювання елемент не встигає нагрітися і тому похибка є меншою. Також тестери відрізняються за типом ламп, якими створюється освітленість поверхні СЕ, що впливає на спектральний склад випромінювання.

Зазвичай тестер містить еталонний сонячний елемент і вбудований комп'ютер, який перераховує виміряні параметри і приводить їх до стандартних умов вимірювання. На перший погляд здається, що вимірювання є досить простим завданням - необхідно просто змінювати напругу і вимірювати

відповідні струми. Проте насправді необхідно враховувати ряд додаткових факторів, серед яких найбільш важливими є наступні:

- оскільки генерований елементом струм прямо пропорційний освітленості, то вона повинна бути точно відомою і постійною;
- необхідно домогтися високої однорідності світла на поверхні тестованого елемента;
- спектральний розподіл освітленості повинен бути якомога ближчим до спектрального розподілу природного світла;
- необхідно точно знати температуру вимірюваного елемента;
- необхідно виключити будь-яке падіння напруги на контактах і в колі елемента, що вносить додаткові помилки при вимірах



Рис.2.2. Промисловий тестер - сортувальник CE [11]

Для забезпечення однорідності випромінювання існують два найбільш поширених способи: використовувати спеціальну оптику з відбиваючими і розсіюючими елементами або ж застосовувати точкове джерело випромінювання. У першому варіанті необхідно часто контролювати і налаштовувати обладнання, а також компенсувати вплив рефлектора та інших оптичних елементів на спектральний розподіл за допомогою додаткової

фільтрації, що призводить до великих труднощів у використанні. У другому варіанті необхідна однорідність досягається за рахунок рознесення джерела та тестованого зразка на значну відстань.

Більш складним завданням є отримання необхідного спектрального розподілу освітленості. Для цього можливе застосування 4 типів джерела світла:

1. *Лампи розжарювання.* При цьому температура джерела світла становить приблизно 3200К, в той час як поверхня сонця має температуру близько 5800К. Недоліком ламп розжарювання є велика яскравість в червоній та інфрачервоній областях спектру і мала яскравість у синій та ультрафіолетовій областях спектру.

2. *Металогалогенні лампи.* Ці джерела дозволяють отримати випромінювання у видимому діапазоні, яке є дуже близьким до природного світла. Але спектр таких ламп має ряд ліній, які дуже важко фільтрувати.

3. *Ксенонові дугові лампи неперервної дії.* Цей тип джерела дає спектральний розподіл у видимому діапазоні найбільш близький до природного світла, але також необхідно фільтрувати деякі лінії в ІЧ-області. При опроміненні великих поверхонь оптична система сильно ускладнюється і необхідно компенсувати нагрів тестованого зразка.

4. *Імпульсні ксенонові лампи.* Ці лампи мають спектральний розподіл близький до АМ0, а використання додаткових фільтрів дозволяє легко отримати спектр АМ1,5. Нагрівання ж зразка під час спалаху є надзвичайно малим.

Найбільш поширеними в промисловості є імпульсні тестери з ксеноновим лампою.

Паралельність променів в більшості сучасних імітаторів досягається за рахунок застосування коліматорів (як правило, параболоїдних дзеркал або лінз Френеля), у фокусі яких розміщується зображення тіла розжарення джерел випромінювання, яке, в свою чергу, створюється концентраторами (найчастіше еліпсоїдами з великим кутом обхвату).

Джерелом випромінювання більшості зарубіжних імітаторів служить ксенонова лампа високого тиску. Спектр корегують інтерференційними світлофільтрами (рис. 2.3), що дозволяють наблизити спектр лампи до спектру позаатмосферного Сонця.

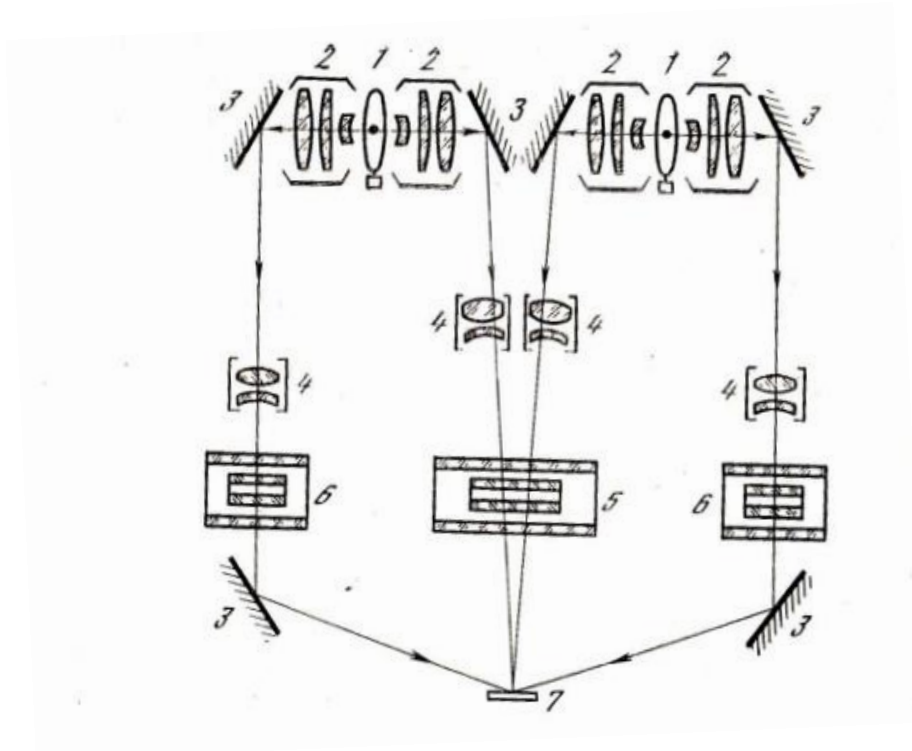


Рис. 2.3. Оптична схема імітатора прямого і розсіяного (дифузного) потоку наземного сонячного випромінювання:

1 - вольфрамові галогенні лампи; 2 - конденсори; 3 - плоскі фацетні відбивачі; 4 - об'єктиви; 5,6 - світлофільтри для імітації спектрального складу прямого(5) і розсіяного (дифузного) (6 ) потоку випромінювання; 7 - вимірюваний сонячний елемент

## 2.2. Професійне експериментальне обладнання

Розробці і стандартизації методів і засобів вимірювань параметрів СЕ приділяється велика увага в світі, що пояснюється потребою в їх точній і економічній атестації в умовах наростаючого виробництва. До теперішнього часу найбільший розвиток отримала метрологія планарних СЕ, перетворюючих пряме (неконцентроване) сонячне випромінювання. Активне використання нанотехнологій при створенні структур для СЕ, а також освоєння космосу визначили розвиток нового напрямку в сонячній фотоенергетиці – перетворення концентрованого сонячного випромінювання. Використання концентраторів випромінювання, виготовлених із дешевих матеріалів, в поєднанні з високоефективними концентраторними СЕ малої площі дозволяє підняти ефективність перетворення сонячного випромінювання і знизити вартість вироблюваної фотоелектричними установками енергії, а отже відкриває шлях до широкого застосування фотоелектричного методу перетворення концентрованого сонячного випромінювання. У той же час, ускладнення конструкцій наногетероструктурних СЕ, працюючих при високих щільностях випромінювання, і фотоелектричних модулів (ФЕМ) з концентраторами випромінювання вимагає створення спеціальних методів досліджень характеристик як окремих елементів ФЕМ, так і модулів в цілому. Однак, в даний час, ці методи досліджень не отримали належного розвитку. Метрологія концентраторних СЕ припускає розробку і створення не тільки методів прямих і непрямих вимірювань характеристик СЕ, концентраторів і інших елементів конструкції ФЕМ, але і методів коректного моделювання робочих режимів елементів ФЕМ у лабораторних умовах для прогнозування їх реальних робочих характеристик при натурних випробуваннях та експлуатації [4].

Як приклад установка (рис.2.3) призначена для вимірювання спектральних залежностей зовнішнього квантового виходу сонячних елементів

на основі багат шарових гетероструктур, в тому числі і багатоперехідних з (кількість робочих р-n переходів - до трьох) у діапазоні довжин хвиль 320-1850 нм. Визначення значень зовнішнього квантового виходу в абсолютних одиницях виконується шляхом порівняння фотовідкликів досліджуваного СЕ і контрольного фотоприймача при попаданні на них монохроматичного випромінювання модулюючого по частоті механічним переривником. Вимірювання спектральних залежностей окремих переходів багатоперехідного СЕ виконується з варійованим кроком сканування 10-50 нм в умовах засвічення світлодіодами підвищеної яскравості.



Рис. 2.3. Установа для дослідження спектральних характеристик багатоперехідних СЕ

Вимірювання спектрального коефіцієнта дзеркального відображення СЕ проводиться методом порівняння фотострумів контрольних фотоприймачів при попаданні на них монохроматичного випромінювання, причому на другий контрольний фотоприймач випромінювання потрапляє після відбиття від досліджуваного зразка. Вимірювання спектрального коефіцієнта  $\Gamma$  пропускання проводиться аналогічним методом, при цьому другий контрольний фотоприймач реєструє світловий потік, що пройшов через досліджуваний зразок.

Завдання режимів роботи установки, керування процедурою вимірювання та обробка отриманих значень здійснюється за допомогою спеціалізованої програми. Результати вимірювань подаються в графічному і табличному видах.

Науково-технічні та конструкційні рішення, реалізовані в установці, вперше дають можливість вирішувати завдання всебічного комплексного дослідження спектральних характеристик не тільки багатоперехідних сонячних елементів, але і анти-відбиваючих покриттів і оптичних матеріалів.

Багатофункціональний імпульсний тестер (рис.2.4) для характеристики наногетероструктурних сонячних елементів призначений для проведення досліджень сонячних елементів (СЕ) на основі багат шарових наногетероструктур і малорозмірних фотоелектричних модулів з концентраторами випромінювання [3,4].



Рис. 2.4. Імпульсний тестер для СЕ

Тестер побудований на базі багатофункціонального імпульсного імітатора сонячного випромінювання і призначений для вимірювання навантажувальних вольт-амперних характеристик

(ВАХ) СЕ з кількістю робочих р-п переходів від одного до трьох і малорозмірних фотоелектричних модулів (ФЕМ) на їх основі, у тому числі з концентраторами випромінювання, в умовах імпульсного засвічення тривалістю до 1,5 мсек (час, протягом якого освітленість змінюється на  $\pm 5\%$ ), а також для



вимірювання темнових ВАХ СЕ. Освітлювач побудований на основі імпульсної ксенонової лампи в якості джерела випромінювання і забезпечує наступні робочі умови в площині розташування досліджуваного зразка або лінзи Френеля:

**Режим А:** Моделювання спектрального складу та щільності потоку випромінювання. Протягом одного світлового імпульсу вимірюється вся вольт-амперна характеристика. Режим використовується для дослідження СЕ з малим часом життя фотогенеруючих носіїв. Освітленість в площині розташування зразка варіюється шляхом зміни відстані між освітлювачем і елементом (на зразку малого розміру досягається щільність потоку випромінювання еквівалентна 5000 крат). Нерівномірність розподілу опромінення в площині випробувань складає не більше 3-5%

**Режим В:** Моделювання спектрального складу та щільності потоку випромінювання протягом одного світлового імпульсу. ВАХ вимірюється за кілька (15-25) світлових спалахів. Протягом одного світлового імпульсу тривалістю 1 мсек вимірюється одна пара значень «струм - напруга» в момент закінчення «плоскої» частини імпульсу. Даний режим призначений для вимірювання сонячних елементів з великим часом життя нерівноважних носіїв заряду.

**Режим С:** Відтворюється спектр, опромінення і кутова розбіжність (32 кут. хвилини) сонячного випромінювання в площині розташування досліджуваного зразка або лінзи, що концентрує випромінювання на СЕ. Світловий потік формується затіняючою діафрагмою діаметром 2,3 мм і оптичним коллиматором апертурою 100 мм. Протягом одного світлового 2 імпульсу вимірюється вся вольт-амперна характеристика. Нерівномірність розподілу освітленості в робочій області не більше 5%. Режим призначений для вимірювання вольт-амперних характеристик пари «лінза - СЕ» в діапазоні температур СЕ від +20 до +150 °С або, в комплекті з двокоординатної приставки

для переміщення малорозмірних фотоприймача, для вимірювання оптико-енергетичних характеристик концентраторів.

Імпульсний тестер концентраторних фотоелектричних модулів на основі наногетероструктурних сонячних елементів призначений для вимірювання та запису вольт-амперних характеристик (ВАХ) фотоелектричних модулів з концентраторами сонячного випромінювання і сонячними елементами на основі многопереходних наногетероструктур (рис.2.5). Вихідна імпульсна щільність потужності випромінювання відповідає умовам освітлення прямим сонячним випромінюванням потужністю  $1 \text{ kW/m}^2$  зі спектром AM 1,5 D [4].



Рис. 2.5. Імпульсний тестер концентраторних ФЕМ

Багатоламповий імпульсний тестер сонячних батарей призначений для вимірювання ВАХ СЕ площею до  $3 \times 2 \text{ м}$  при освітленні в умовах, відповідних спектру AM0.

Ці умови контролюються каліброваним сонячним елементом зі спектром фоточутливості, відповідним спектром фоточутливості елементів, що складають сонячну батарею. У тестері використовується активне електронне навантаження, що дозволяє реєструвати як пряму, так і зворотну гілку вольт-амперної характеристики, в тому числі і без освітлення. Тривалість вимірювання світлової характеристики 1.5 мсек, тривалість одного циклу вимірювань «темнова характеристика + світлова характеристика» - 3 мсек. Імпульс світла з постійною інтенсивністю випромінювання формується шляхом

складання світлових потоків від декількох ксенонових ламп при автоматичному регулюванні інтенсивності і моменту включення кожної лампи.

Таким чином, сучасні комплекси методик і засобів досліджень дають можливість виробляти не тільки високоточні вимірювання характеристик концентраторних СЕ і ФЕМ, але і забезпечують коректне моделювання різних режимів їх роботи, що дозволяє прогнозувати характеристики СЕ і ФЕМ в реальних умовах експлуатації на основі результатів лабораторних вимірювань. Надалі оптимізація наявних методів і засобів вимірювань дозволить скоротити час і вартість кваліфікаційних випробувань СЕ і ФЕМ і сприятиме їх більш широкому застосуванню.

### **2.3. Градування еталонних сонячних елементів**

Абсолютне градування еталонних СЕ це трудомісткий процес, який потребує тривалого часу і значних витрат, тому еталони, що пройшли таке градування, використовують тільки як первинні еталони зразкового засобу вимірювання. Для щоденних цілей використовують світловимірні прилади - як вторинні і робочі еталони [3].

Еталонні елементи працюють в режимі короткого замикання, і їх градування полягає у визначенні струму короткого замикання при нормованих умовах спектрального складу і густини потоку сонячного випромінювання(позаатмосферного або наземного).

Можливі два принципіально відмінні типи градування еталонних СЕ. На природному сонячному випромінюванні і в лабораторії із використанням засобів вимірювань, що повірені на державному еталоні, із вимірюванням спектральної чутливості еталонних СЕ за удосконаленими методиками.

Для градування еталонних СЕ, призначених для роботи налаштування імітаторів позаатмосферного випромінювання, використовуються багато

методів першого типу: вимірювання на космічних апаратах, ракетах, кулях-зондах, висотних літаках, на поверхні Землі.

При градуюванні на космічних апаратах і ракетах значення струму  $I_{к.з}$  отримують із результатів безпосередніх вимірів, які проводяться на висотах не менших за 100 км. При використанні куль-зондів, виміри здійснюються на висотах 30-40 км, де потрібно враховувати вплив на виміри озону і аерозолів, що роблять введенням поправок. Виміри на літаках, що піднімаються на висоту 12-13 км, починають виконувати при підйомі на висоті 3-4 км і закінчують верхню межею, а значення  $I_{к.з}$  для позаатмосферних умов отримують екстраполяцією результатів до нульової атмосферної маси.

Метод, який найчастіше використовується для при градуюванні під природнім сонячним випромінюванням на поверхні Землі (здебільшого у високогірних умовах) полягає в екстраполяції результатів вимірів до нульової атмосферної маси. Для цього послідовно заміряють струм  $I_{к.з}$  еталонних СЕ для різних значень атмосферної маси (для різної висоти Сонця), а позаатмосферне значення струму одержують шляхом лінійної екстраполяції залежності логарифма струму ( $\lg I_{к.з}$ ) від відносної атмосферної маси ( $m$ ) до її нульового значення. Через експериментальні точки логарифмів значень струму проводиться пряма лінія, яка і лінійно екстраполюється до значення струму при нульовій атмосферній масі. Такі виміри проводять в сухих гірських районах, де спостерігається найвища прозорість атмосфери і для яких у певні періоди року є характерною стійкість оптичних властивостей атмосфери [3].

Результати градуювання еталонних СЕ різними методами показують, зазвичай, достатньо хороше співпадання отримуваних значень.

## РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ARDUINO-СУМІСНИХ ЗАСОБІВ

### 3.1. Апаратна частина характеріографа

В цьому розділі наведено схеми для створення власного характеріографа на основі Arduino для дослідження СЕ, з живленням від USB із комп'ютерним інтерфейсом. Він працює на базі таких продуктів з відкритим кодом як Arduino, а інтерфейс користувача використовує програмне середовище Processing. Прилад був розроблений для зняття ВАХ СЕ, який значно дешевше відповідного сучасного промислового обладнання. Вимірювання проходить за рахунок варіювання напруги, яка подається на сонячний елемент і вимірювання струму при заданій напрузі. Прилад може використовуватися і для інших вимірювань [12].

Основний ланцюг апаратної частини стенду виглядає наступним чином:

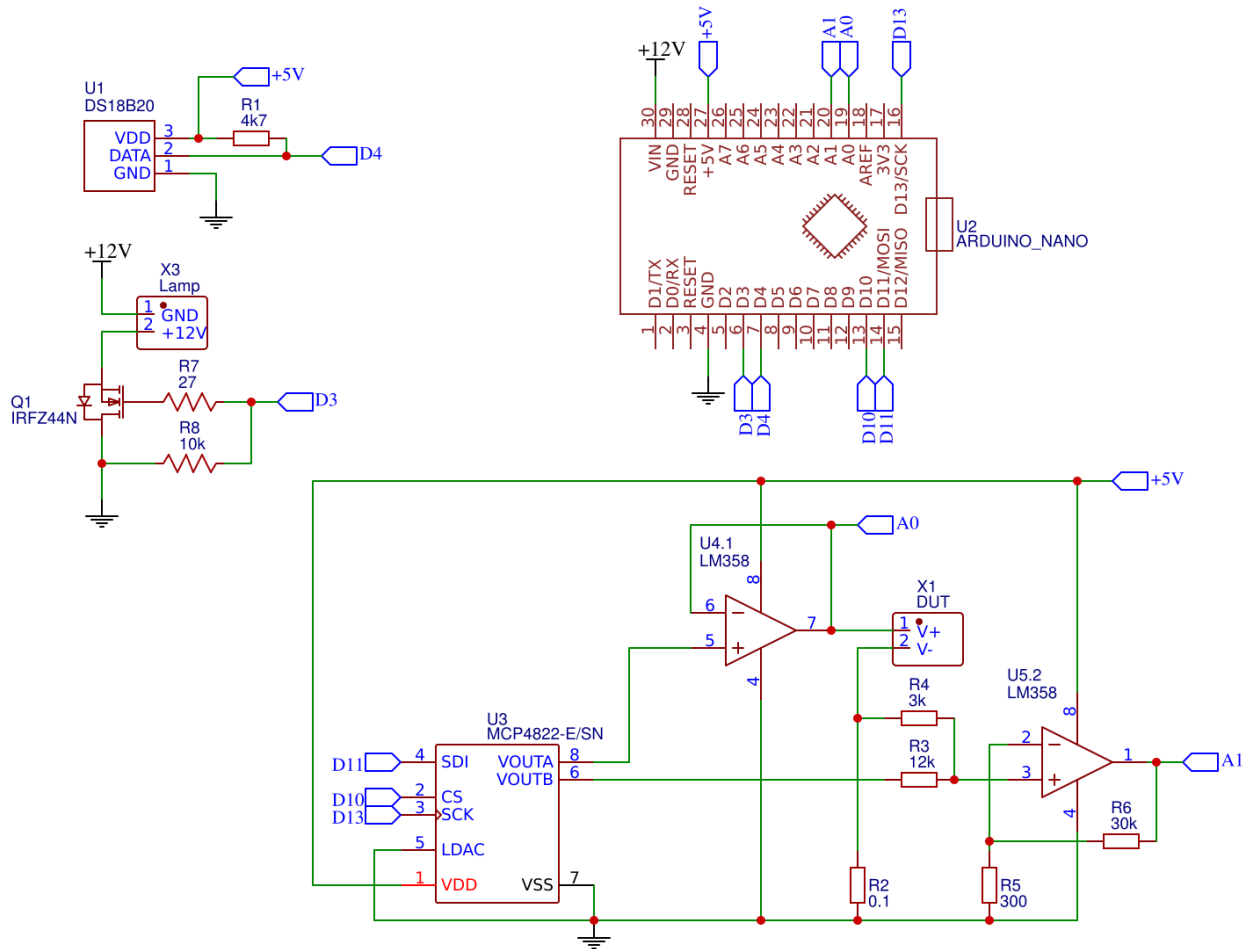
- Мікроконтролер Arduino Nano використовує 3 цифрових виходи для керування двоканальним ЦАП.
- ЦАП генерує дві напруги
  - Перша напруга подається на прилад, що тестується (в нашому випадку сонячний елемент). Для ізоляції ЦАП від струму через вимірюваний прилад між ними розміщується буферний підсилювач (в нашому випадку операційний підсилювач (ОП) включений як повторювач напруги). Також напруга після повторювача зчитується одним з аналогових виходів мікроконтролера.
  - Друга напруга використовується як частина сумуючого підсилювача, щоб зробити струм читабельним для Arduino (деталі нижче).
- Струм через вимірюваний прилад перетворюється в напругу, падаючи на резисторі 0,1 Ом, тепер його можна прочитати на одному з аналогових входів мікроконтролера. Негативний вихід вимірюваного пристрою і друга напруга з ЦАП через резистори, підведені до неінвертуючого входу ОП, включеного як

сумуючий підсилювач. Значення резисторів були підібрані так, щоб перетворити очікуваний діапазон струмів ( $\pm 30$  мА, що падає через резистор  $0,1$  Ом,  $\pm 3$  мВ, за законом Ома) до внутрішньої опорної напруги Arduino ( $0 - 1.1$  В). Пояснення використання сумуючого підсилювача для такого типу перетворень наведено дослідниками [12]. Слід відмітити, що значення опорів мають бути досить точними. Відхилення приведуть до незначного масштабування вимірювання. Ця розбіжність може бути виправлена за допомогою функції `current ReadingmA` в кодї Arduino.

Принципова електрична схема вимірювального ланцюга та зовнішній вигляд характеріографа на основі Arduino [12] приведена на рис.3.1. Щоб включити сонячний елемент у прямому зміщенні до затискача  $V+$ , потрібно підключити сторону р-типу, а для зворотного включення n-типу.

Компоненти повинні бути точними, хоча вони можуть вимагати невеликих змін у програмному забезпеченні:

- друкована плата – 1 шт.;
- мікроконтролер Arduino Nano – 1 шт.;
- цифро-аналоговий перетворювач MCP4822 – 1 шт.;
- операційний підсилювач LM358 – 2 шт.;
- резистор  $0.1$  Ом  $\pm 1\%$ ,  $1W$  – 1 шт.;
- резистор  $300$  Ом  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- резистор  $3$  кОм  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- резистор  $12$  кОм  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- резистор  $30$  кОм  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- резистор  $10$  кОм  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- резистор  $27$  Ом  $\pm 1\%$ ,  $0,25W$  – 1 шт.;
- польовий транзистор IRFZ44N – 1 шт.;
- датчик температури DS18B20 – 1 шт.



а



б

Рис.3.1. Принципова електрична схема (а) та зовнішній вигляд (б) апаратної частини характеріографа

Як джерело освітлення використано галогенову лампу, яка дозволяє отримати випромінювання у видимому діапазоні (рис.3.2), спектр якого подібний до природного світла відповідної області (рис.2.1) [11].

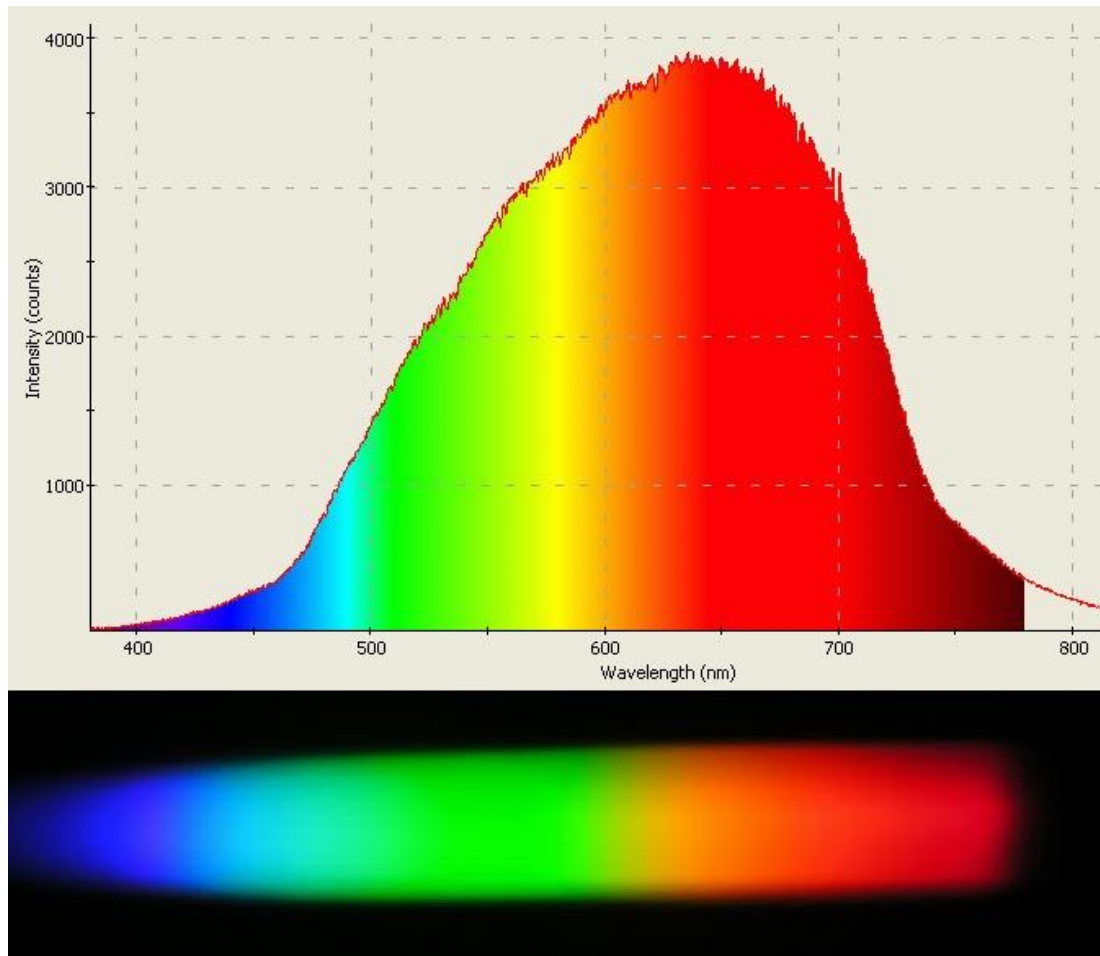


Рис.3.2. Спектр випромінювання галогенної лампи

Слід відмітити, що у запропонованій нами схемі нами передбачено регулювання інтенсивності джерела освітлення при використанні схеми на польовому транзисторі IRFZ44N та контроль за дотриманням температурного режиму на основі датчика температури DS18B20.



### 3.2. Програмне забезпечення та інтерфейс користувача

Встановлення програмного забезпечення здійснюється в наступній послідовності. Спочатку необхідно встановити програмне середовище Arduino IDE та відповідні драйвери. Див. довідкові сторінки Arduino [13].

Потім завантажити та розархівуйте архів [12]. Перейти до “source” > “IVy\_arduino.pde” за допомогою Arduino IDE. Скомпілювати код і завантажити його на плату Arduino. Слід відмітити, що додатково запрограмоване регулювання інтенсивності джерела освітлення СЕ та контроль за дотриманням температурного режиму.

Після того як плата Arduino запрограмована, запустити плату, використовуючи програму Processing. Для зручності код Processing вже скомпільований і експортований у виконуваний формат для Linux 32/64-bit, Mac OSX і Windows 32/64-bit. Вони знаходяться в папці “application”. В цій папці перейти до папки, яка відповідає вашій платформі.

Підключити плату Arduino до комп'ютера та запустити виконуваний файл. Відкриється вікно з інтерфейсом користувача IVy (рис.3.3) [12]. У розділі "З'єднання" є випадаюче меню з усіма доступними послідовними COM-портами. Виберіть COM-порт, який використовується платою Arduino, а потім натисніть кнопку "Connect". Якщо з'єднання пройшло успішно, то рядок стану знизу має відобразити напис “Connected”.

Доки інтерфейс IVy залишається відкритим і плата Arduino залишається фізично підключеною до комп'ютера через USB, цей крок не потрібно повторювати. Після встановлення з'єднання, можна почати вимірювання. Підключити пристрій (наприклад, сонячний елемент, резистор тощо) до клем схеми характеріографа. Встановити параметри вимірювання в розділі «Settings». "Start voltage" і "Stop voltage" визначають діапазон розгортки напруги. І "Start voltage", і "Stop voltage" повинні бути в діапазоні від 0 до 4 В.

Оскільки вимірювальні контакти не можуть перемикає полярність, необхідно вручну перемкнути кабелі до пристрою для отримання даних у зворотному зміщенні. Коли пристрій підключено в зворотному зміщенні, натиснути на кнопку "Reverse" у розділі "Settings". Це дозволить програмі записувати в до графіку вхідні дані з негативними напругами. Щоб почати знімати характеристики вимірюваного елемента, натиснути кнопку "Start Sweep". Точки даних повинні з'являтися на графіку в реальному часі, і в рядку стану має відобразитись "Running...". А після завершення в рядку стану відобразиться "Voltage Sweep Complete".

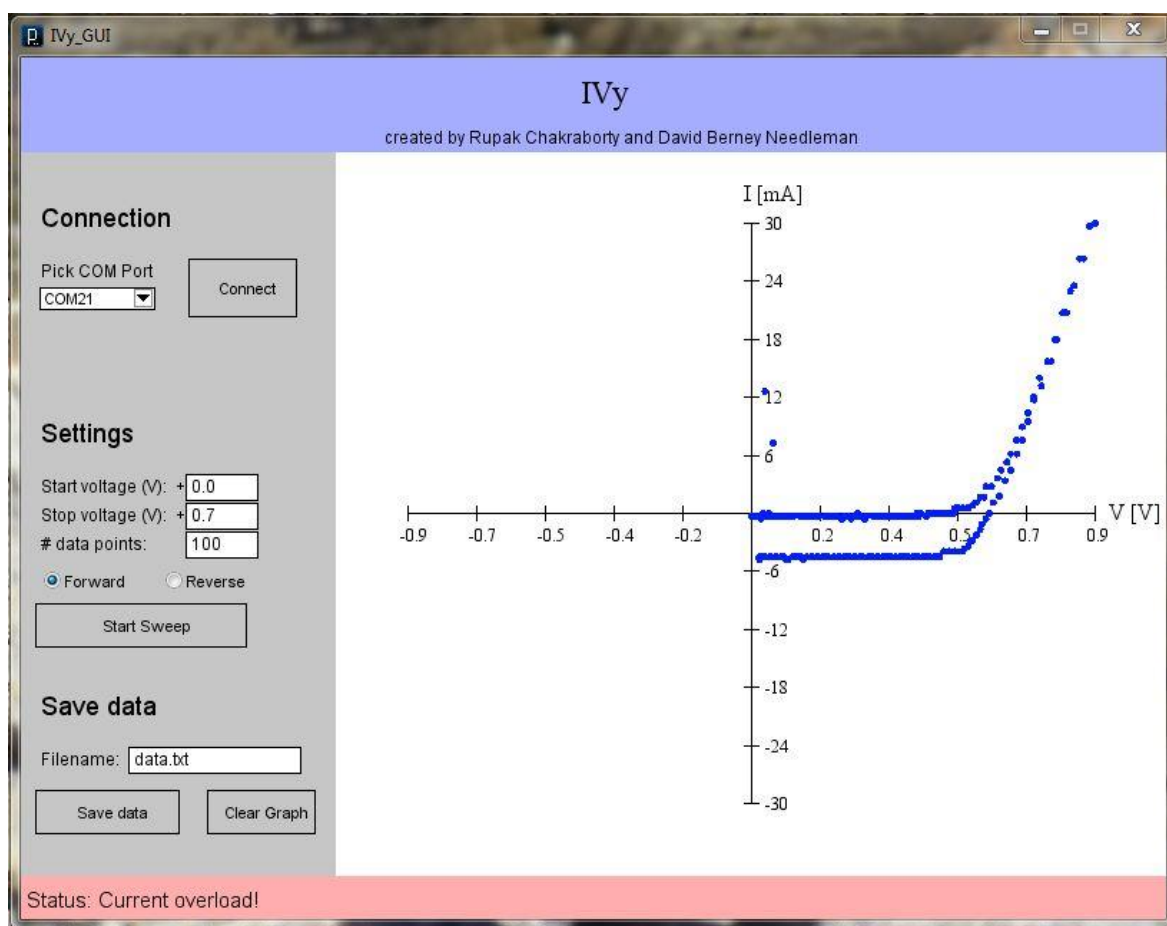


Рис.3.3. Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача

У розділі "Save data" введіть ім'я файлу та натисніть кнопку "Save data". Це збереже дані у вигляді файлу, розділеного комами, з парою "напруга, струм" у

кожному рядку. За замовчуванням цей файл зберігається в тій же папці, що й файл виконуваного інтерфейсу IVу. Існує можливість збереження дані, змінюючи параметри, знову починаючи розгортку і зберігаючи дані з іншим ім'ям файлу. Графік буде накладати поточні дані поверх попередніх. Якщо це не бажано, натисніть кнопку «Glean Graph» внизу перед наступним розгорткою.

Якщо плата Arduino не відповідає, необхідно закрити програму IVу для побудови ВАХ (рис.3.3) і відключити плату. Повторно підключити плату і знову відкрити IVу.

Опис програмного коду:

IVу\_arduino.pde: Прошивка для завантаження на плату Arduino редагується в програмі Processing.

IVу\_GUI.pde, serialCommWithArduino.pde: Processing код графічного інтерфейсу користувача IVу. Ці два файли взаємозалежні. Подробиці про необхідні бібліотеки можна знайти в заголовках коментарів коду [12].

Для редагування цього коду необхідно завантажити Processing IDE.

### **3.3. Визначення параметрів сонячного елемента за його вольт-амперною характеристикою**

На даний час розроблено достатньо точних методик [3,4], які дозволяють за вимірами темнових та світлових ВАХ СЕ розрахувати і визначити значення -  $I_0$ ,  $R_L$ ,  $R_{sh}$ , коефіцієнта  $A$ , і виявити, таким чином, ті фізичні процеси, що приводять до недостатньо високої ефективності СЕ для деяких напівпровідникових матеріалів.

На рис 3.4 представлена типова ВАХ: світлова, заміряна на імітаторі позаатмосферного Сонця, і темнова, заміряна з прикладеним зовнішнім зміщенням у темноті у прямому (IV- квадрат) і зворотному (II квадрат) напрямку. Частини світлової характеристики, розміщеної в I квадраті, та її

продовження в IV квадраті представляють пряму лінію. Нахил цієї прямої до вісі струмів характеризує послідовний опір СЕ (рис.1.3)

$$R_{\text{п}} = \Delta U_{\text{пр.с}} / \Delta I_{\text{пр.с}},$$

де виміри  $\Delta U_{\text{пр.с}}$ , та  $\Delta I_{\text{пр.с}}$  проводять у області, наближеній до  $U_{\text{к.к.}}$ .

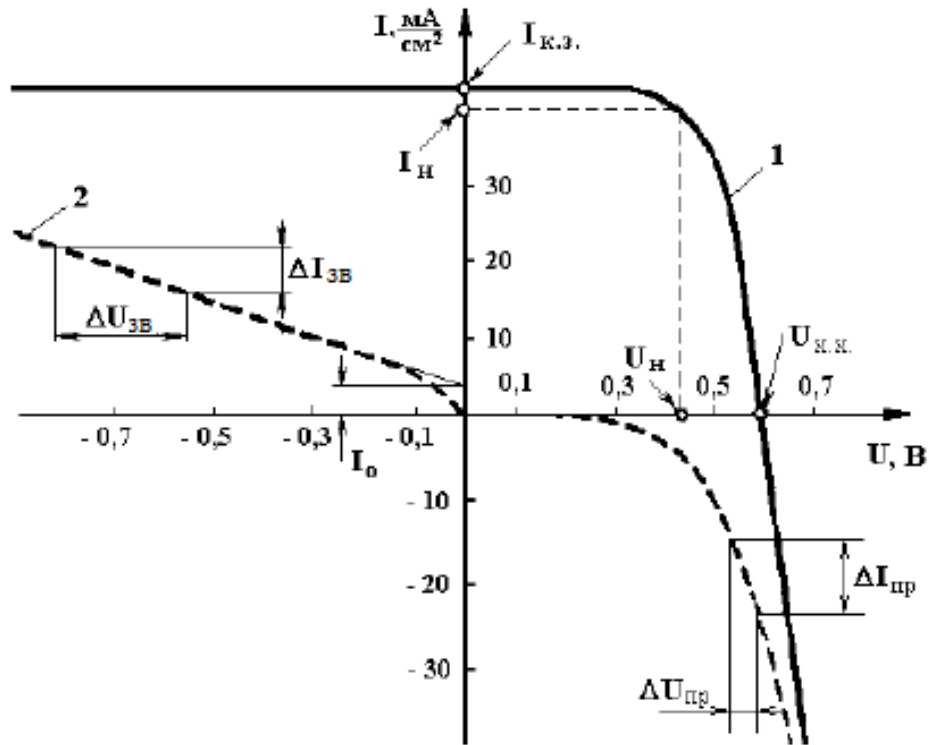


Рис. 3.4. Типова вольт - амперна характеристика СЕ на основі кристалічного кремнію при вимірюванні на імітаторі [4] позаатмосферного Сонця. Крива 1 - світлова характеристика, крива 2 - темнова. На рисунку також проілюстровані методи визначення деяких параметрів еквівалентної схеми заміщення СЕ

Частина характеристики у I квадраті та її продовження у II квадраті також є прямою лінією. Нахил її до вісі напруг характеризує шунтуючий опір СЕ –

$$R_{\text{ш}} = \Delta U'_{\text{пр.с}} / \Delta I'_{\text{пр.с}},$$

де -  $\Delta U'_{\text{пр.с}}$  та  $\Delta I'_{\text{пр.с}}$  заміряють в області, наближеній до  $I_{\text{к.з.}}$ .

У зв'язку із тим, що на світловій ВАХ нахил прямої біля точки  $I_{кз}$  заміряти важко, визначення  $R_{ш}$  зручніше проводити за нахилом саме темної ВАХ

$$R_{ш} = \Delta U_{зв} / \Delta I_{зв}.$$

Побудова темної ВАХ дозволяє також знайти зворотний струм насичення  $I_0$ . Відрізок на вісі ординат від початку координат до точки перетину із продовженням лінійної ділянки зворотної вітки темної характеристики і дає шукане значення  $I_0$ .

Однак зауважимо, що так як  $p$ - $n$ -перехід СЕ у робочому режимі під'єднаний у прямому напрямку (вплив світлового випромінювання та поява завдяки йому надлишкової кількості нерівноважних носіїв у областях напівпровідника з обох сторін  $p$ - $n$ -переходу є аналогічні під'єднанню напруги у прямому напрямку), правильніше буде визначати саме струм насичення, а також розраховувати коефіцієнт А за прямою віткою темної ВАХ або за світловою ВАХ (що має назву навантажувальної світлової характеристики СЕ). Для першого із цих методів можна скористатися темною характеристикою діода, записавши її у вигляді рівняння прямої у відрізках

$$\ln(I_d + I_0) = \ln I_0 + \frac{qU}{AkT}$$

Дане рівняння використовують для розрахунків при умові  $I_d > I_0$  у випадку великих струмів, а також рекомбінаційного механізму протікання зворотного струму насичення через  $p$ - $n$ -перехід, тому у знаменник показника експоненти в рівнянні вводиться коефіцієнт А, про який ми вже згадували вище. Ділянка великих струмів і напруг( характерна для робочої навантажувальної точки СЕ) прямої вітки темної характеристики використовується для побудови залежності  $\ln I_d = f(U)$ . Тангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює  $q/AkT$ , а відрізок, що відтинається на вісі ординат дає значення  $\ln I_0$ .

За іншим методом визначення  $I_0$  та  $A$  в умовах наближених до робочих умов використання СЕ світлова ВАХ заміряється при декількох (хоча б двох) різних густинах падаючого випромінювання від імітаторів Сонця.

Для цього запишемо рівняння із врахуванням падіння напруги на послідовному опорі і при рекомбінації в  $p$ - $n$ -переході:

$$I = I_0 \left( \exp \frac{q}{AkT} (U - IR_{\Pi}) - 1 \right) - I_{\phi}$$

У режимі холостого ходу  $I=0$ ,  $U=U_{xx}$ , а при  $R_{\Pi}=0$  фотострум можна вважати рівним  $I_{кз}$ . Тоді

$$\ln(I_{кз} + I_0) = \ln I_0 + \frac{qU_{xx}}{AkT}$$

Для кожного нового значення густини потоку випромінювання лабораторного імітатора Сонця, яке встановлюється за допомогою еталонного СЕ з лінійною залежністю струму короткого замикання від освітленості, проводять заміри значень  $I_{кз}$  та  $U_{xx}$  досліджуваного СЕ. Потім будується залежність  $\ln I_{кз} = f(U_{xx})$ . Тангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює  $q/AkT$ , а на вісі ординат вона відтисає значення  $\ln I_0$ .

Таким чином, із світлових ВАХ вдається також визначити параметри  $A$  та  $I_0$ , причому саме ті їх значення, які є характерні для СЕ в робочому режимі.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз методів і засобів вимірювання ВАХ фотоперетворювачів і виявлено їх обмеженість для умов експлуатації СЕ; показано переваги імпульсних методів і засобів вимірювання і необхідність їх вдосконалення; зроблено огляд особливостей використання еталонів СЕ.

2. Розроблений характеріограф фотоелектричних сонячних елементів на основі Arduino і персонального комп'ютера хоча і має простоту реалізації, однак виконує вимірювання основних параметрів сонячних елементів у заданих режимах (напруги розімкнутого ланцюга, струм короткого замикання та інші) з високою точністю і виводить графік ВАХ сонячного елемента на монітор; всі вимірні параметри та ВАХ автоматично зберігаються в файли та можуть бути розглянуті пізніше; перевагами характеріографів на основі Arduino є низька ціна і дуже гнучка реалізація вимірювальної схеми, що дозволяє досліджувати експериментальні зразки СЕ з різними характеристиками

3. Розглянуто особливості методик визначення параметрів фотоелектричних перетворювачів різних поколінь, встановлено, що експериментальні результати показують, зазвичай, достатньо добре узгодження з даними чисельного моделювання; вдосконалення методів і засобів вимірювання ВАХ фотоперетворювачів надзвичайно важливе для подальшого розвитку та популяризації сонячної енергетики.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zavorotnyi V.F. The laboratory tester of solar cells with dynamic reconfiguration of measuring system / V. F. Zavorotnyi, O.V. Borisov // *Microsyst Electron Acoust.* – 2018. – vol. 23, №. 1. – P. 23-29.

2. Рябко А. Використання сонячних модулів у лабораторному практикумі з фізики /А. Рябко, Р. Кухарчук // *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології.* – 2018, № 1 (75) . – С. 65-75.

3. Василюха Х. В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.02 / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2017. – 20 с.

4. Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2016. – 24 с.

5. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Числове моделювання робочих характеристик сонячних елементів з використанням програмного пакету SCAPS-3302» з дисципліни "Фізико-технологічні основи перетворення сонячної енергії" / укладачі Кобяков О.М., Єрмоменко Ю.С., Іващенко М.М., Опанасюк А.С. - Суми: СумДУ, 2015. - 28 с.

6. Ivashchenko M.M. Influence of substrate temperature on physical properties of SnS films deposited by close-spaced vacuum sublimation / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, O.O. Podoprygora] // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р.

7. Ivashchenko M.M. Numerical simulation of SnS/CdS(ZnO)/ITO solar cells / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, D.V. Kuzmin, O.O. Podoprygora] //



Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р.

8. Іващенко М.М. Моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі структури SnS/ZnS/FTO / [М.М. Іващенко, І.П. Бурик, Д.В. Кузьмін, І.А. Гришко, А.С. Опанасюк] // I Міжнародна науково-практична конференція «Елементи, прилади та системи електронної техніки», м. Запоріжжя, 14 – 16 листопада 2018 р.

9. Ivashchenko M. Current-voltage curves numerical simulation of photoconverters based on SnS/SnS<sub>2</sub>/FTO structure / [M. Ivashchenko, A. Opanasyuk, I. Buryk, D. Kuzmin, Yu. Stoliarchuk] // III Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2018, м. Дніпро, 21 – 23 листопада 2018 р.

10. Борисов О.В. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю.І. Якименка – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – 484 с.

11. Еволюція сонячної енергетики [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/osnovi-tehnologiyi-virobnitstva-kremniyevih-sonyachnih-fotoperetvoryuvachiv/>

12. Photovoltaic research laboratory [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://pv.mit.edu/home/education/resources-for-educators/build-your-own-sourcemeater/>

13. Arduino [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/>