МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Фізико-математичний факультет

Кафедра фізики та методики її навчання

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри
_____ Слюсаренко М.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)
Протокол №_____
«____» _____2021 р.

Реєстраційний номер №_____
«____» _____2021 р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Кваліфікаційна робота студентки
групи ФМм-16
ступінь вищої освіти ____магістр____
спеціальності
0.14.08 Середня освіта (Фізика)
Дешевих Олени Валентинівни

Керівник: доктор фіз.–мат. наук, професор
Балабай Р. М.

Оцінка:
Національна шкала_____

Шкала ECTS____Кількість балів___

Голова ЕК_____ _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

Члени ЕК _____ _____
_____ _____
_____ _____
_____ _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

Кривий Ріг – 2021

ЗМІСТ

ВСТУП 3
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПИТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 5
1.1. Сонячні елементи. Механізм роботи та основні характеристики 5
1.2. Типи фотовольтаїчних перетворювачів 7
1.3. Фізичні характеристики фотовольтаїчних перетворювачів 14
1.4. Сучасні тенденції в кремнієвій сонячній фотовольтаїці 18
Висновки до розділу 1 21
РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ 23
2.1. Опис обладнання та принципова електрична схема стенду для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів 23
2.2. Складання вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик фотовольтаїчних перетворювачів на основі отриманих даних 29
2.3. Дослідження залежності вольт-амперної та люкс-вольтної характеристики від довжини хвилі падаючого опромінення 35
Висновки до розділу 2 42
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ: «ФОТОВОЛЬТАЇЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ» ДЛЯ СЕРЕДНЬОЇ ШКОЛИ 43
Висновки до розділу 3 51
ВИСНОВКИ 52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 54

ВСТУП

У XXI столітті сфера видобутку електроенергії з викопного палива зазнала деяких проблем. Згідно досліджень, було встановлено, що таке паливо здійснює викид канцерогенних речовин та парникових газів у атмосферу. Ще одна проблема полягає в тому, що кількість викопного палива не безкінечне і в довгостроковій перспективі не зможе забезпечити потребу людства в енергоспоживанні.

У результаті були прийняті міри для пошуку альтернативних джерел енергії, які могли б відновлюватися з часом. Одним з таких джерел енергії прийнято вважати сонячне світло.

Фотовольтаїка – це процес перетворення сонячного світла безпосередньо в електроенергію за допомогою сонячних елементів. Сьогодні це швидко зростаюча і все більш важлива відновлювана альтернатива традиційному виробництву електроенергії, але у порівнянні з іншими технологіями виробництва електроенергії, ця технологія відносно нова.

Багато переваг фотовольтаїки дозволяють їй стати одним із основних засобів видобутку електроенергії на основі відновлювальних джерел енергії. Світло світить на кристал і виробляє електричний струм. Джерело енергії (сонячне світло) є безкоштовним і широко розповсюдженим. Однак для того, щоб фотовольтаїка могла розкрити свій повний потенціал, потрібна була революція напівпровідників і прогрес у виробництві.

У 1960-х роках дослідження та розробки фотовольтаїки отримали свій перший значний поштовх завдяки космічній промисловості, яка вимагала окремого джерела від «мережевої» енергії для використання її у супутниках.

Протягом останніх двох десятиліть фотовольтаїка була найбільш швидкозростаючою галуззю для своїх розмірів. Вона знайшла застосування не тільки у космічних дослідженнях, але і в людському побуті. Дана робота має на меті надихнути студентів та учнів середньої школи на вивчення цієї нової технології.

Мета наукової праці – визначити принцип роботи фотовольтаїчних перетворювачів та дослідити їх характеристики

Для досягнення окресленої мети були поставлені наступні завдання:

1) Визначити фізичний механізм роботи та основні характеристики сонячних елементів;

2) Прослідкувати за сучасними тенденціями в кремнієвій сонячній фотовольтаїці;

3) Ознайомитися з фотовольтаїчними перетворювачами різних типів;

4) Створити стенд для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів та дослідити їх основні характеристики;

5) Формувати результати дослідження задля можливості їх впровадження в розвиток STEM-освіти учнів старшої школи для отримання ними більш технічно складних навичок.

Об’єкт дослідження – фотовольтаїчні перетворювачі.

Предмет дослідження – вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики фотовольтаїчних перетворювачів.

Структура роботи. Магістерська праця складається зі вступу, трьох розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи – 55 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПИТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1. Сонячні елементи. Механізм роботи та основні характеристики

Фотовольтаїка – це розділ науки на стику фізики, фотохімії та електрохімії, який вивчає явища перетворення світла в електричний струм за допомогою напівпровідникових матеріалів, які виявляють фотовольтаїчний ефект.

Термін «фотовольтаїка» походить від грецького φῶς (phōs), що означає світло і від «вольт» - одиниці електрорушійної сили, яка в свою чергу походить від прізвища італійського фізика Алессандро Вольта, винахідника акумуляторів.

Фотовольтаїчні установки можуть бути наземними, даховими, настінними або плавучими. Кріплення можна зафіксувати або використовувати сонячний трекер, щоб стежити за сонцем по небу. Фотовольтаїчний ефект комерційно використовується для виробництва електроенергії та в якості фотодавача для виявлення світла чи іншого електромагнітного випромінювання поблизу видимого діапазону або для вимірювання інтенсивності світла [8].

Найбільш відомим пристроєм, який використовується для виробництва електричної енергії шляхом перетворення енергії від Сонця в потік електронів за допомогою фотовольтаїчного ефекту є сонячні батареї. Сонячні батареї виробляють електроенергію постійного струму з сонячних променів, яку можна використовувати для живлення обладнання або для зарядки акумуляторів [12].

Перше практичне застосування фотовольтаїки знайшло себе в якості живлення орбітальних супутників та інших космічних кораблів, але сьогодні більшість фотовольтаїчних модулів використовується для мереж, пов'язаних з енергією. У цьому випадку для перетворення постійного струму в змінний потрібен інвертор.

Існує ще менший ринок автономних систем для віддалених житлових приміщень, човнів, транспортних засобів, електромобілів, придорожніх телефонів екстреної допомоги, дистанційного зондування та ін.

Сонячні батареї являють собою сукупність фотоелектричних комірок (також відомі як фотоелементи, сонячні елементи чи фотоелектричні перетворювачі – ФЕП). Сонячні батареї часто мають тонкий шар скла з боку сонця, що пропускає світло, захищаючи напівпровідникові пластини.

Сонячні батареї зазвичай з'єднані послідовно. Паралельне з'єднання дає більший струм. Однак, такі ефекти, як тіні, можуть вимкнути слабший (менш освітлений) паралельний ряд, що спричинить істотну втрату потужності [6].

Сонячний елемент складається з двох типів напівпровідників, званих кремнієм p-типу та n-типу. Кремній p-типу одержують шляхом додавання атомів, таких як бор або галій, які мають на своєму зовнішньому енергетичному рівні на один електрон менше, ніж кремній. Оскільки бор має на один електрон менше, ніж потрібно для утворення зв'язків з оточуючими атомами кремнію, створюється порожнє місце з позитивним зарядом або "дірка" [5].

Кремній n-типу виготовляється шляхом включення атомів, які мають на своєму зовнішньому рівні на один електрон більше, ніж кремній, наприклад фосфор. На зовнішньому енергетичному рівні фосфору є п’ять електронів, а не чотири. Він зв’язується з сусідніми атомами кремнію, але один електрон не бере участі у зв’язку. Натомість він може вільно переміщатися всередині кремнієвої структури [9].

Сонячна батарея складається з шару кремнію p-типу, розміщеного поруч із шаром кремнію n-типу (рис. 1.1). У шарі n-типу є надлишок електронів, а в шарі p-типу-надлишок позитивно заряджених дірок. Поблизу місця перетину двох шарів електрони з одного боку переходу (шар n-типу) переміщаються в отвори з іншого боку переходу (шар p-типу). Це створює область навколо переходу, звану зоною виснаження, в якій електрони заповнюють дірки.

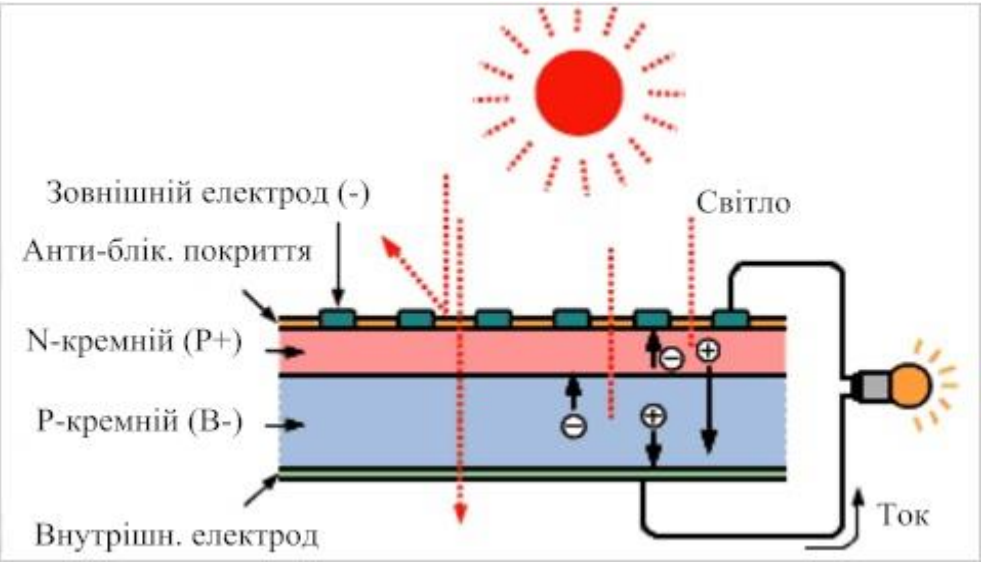


Рис.1.1. Будова сонячного елементу

Коли всі дірки заповнені електронами в зоні виснаження, сторона p-типу зони виснаження (де спочатку були отвори) тепер містить негативно заряджені іони, а сторона n-типу зони виснаження (де присутні електрони) тепер містить позитивно заряджені іони. Наявність цих протилежно заряджених іонів створює внутрішнє електричне поле, яке перешкоджає електронам у шарі n-типу заповнювати дірки в шарі p-типу [11].

Коли сонячне світло потрапляє на сонячну батарею, електрони в кремнії викидаються, що призводить до утворення «дірок». Якщо це станеться в електричному полі, поле перемістить електрони до шару n-типу, а дірки-до шару p-типу. Якщо з'єднати шари n-типу та p-типу з металевим дротом, електрони будуть рухатись від шару n-типу до шару p-типу, перетинаючи зону виснаження, а потім пройдуть через зовнішній провід назад з n- типу, створюючи потік електричного струму.

1.2. Типи фотовольтаїчних перетворювачів

Фотовольтаїчним елементам потрібне лише денне світло, а не прямі сонячні промені, що означає, що вони також можуть виробляти електричну енергію навіть у похмурі дні, але стандартні типи фотоелементів мають дуже

низьку ефективність. Чим вища ефективність фотоелементів, тим більше електроенергії вони виробляють для певної зони впливу сонячного світла. Для стандартних кремнієвих фотоелементів ефективність рівна приблизно 8%, збільшуючись до 25% для більш дорогих типів [14].

Ефективність можна збільшити приблизно до 40% за допомогою концентруючих дзеркал та лінз. Це пояснюється тим, що більшість сонячного світла, що надходить на поверхню елементів, проходить прямо крізь них, практично не впливаючи на вихідну потужність.

Також надлишок енергії фотонів, який не перетворюється в електроенергію, витрачається на нагрівання. Нагрівальний ефект кремнієвого елемента призводить до того, що максимальна ефективність при гарячому сонячному світлі є дуже низькою.

Саме тому одними з основних факторів при виборі даного напівпровідникового матеріалу для використання в якості фотоелектричного матеріалу є його максимальна ефективність та вихідна потужність.

Фотоелементи можна виготовити різними способами та з різних матеріалів. Незважаючи на цю відмінність, усі вони виконують однакову функцію.

В основному сонячні елементи виготовлені з кремнію (Si, силіцію), другого за поширеністю елемента в земній корі (після оксигену). Кремній сам по собі не дуже чистий, тому його очищають до 99,99%, перш ніж його використовувати в якості напівпровідникового матеріалу у багатьох різних типах фотоелементів, транзисторів або цифрових мікросхем. Кремній утворює однорідні фотоелементи синього кольору, які ми звикли бачити в сонячних батареях.

Два основних типи використовуваних фотоелектричних елементів - це кристалічний і тонкоплівковий кремній, які відрізняються один від одного з точки зору ефективності поглинання світла, ефективності перетворення енергії, технології виробництва та вартості виробництва.

Кристалічні кремнієві фотоелементи є найпоширенішим типом фотоелектричних елементів, які використовуються сьогодні, а також є одним з найдавніших успішних фотоелектричних пристроїв [2].

Три загальних типи фотоелементів, виготовлених з кремнію:

1. монокристалічний кремній (рис. 1.2 (а));
2. полікристалічний кремній (рис. 1.2 (б));
3. тонкоплівковий кремній (рис. 1.2 (в)).

Кристалічні сонячні елементи називаються елементами першого покоління. Це найпоширеніша технологія виробництва фотоелектричних типів елементів, що становить близько 90% сучасного ринку.

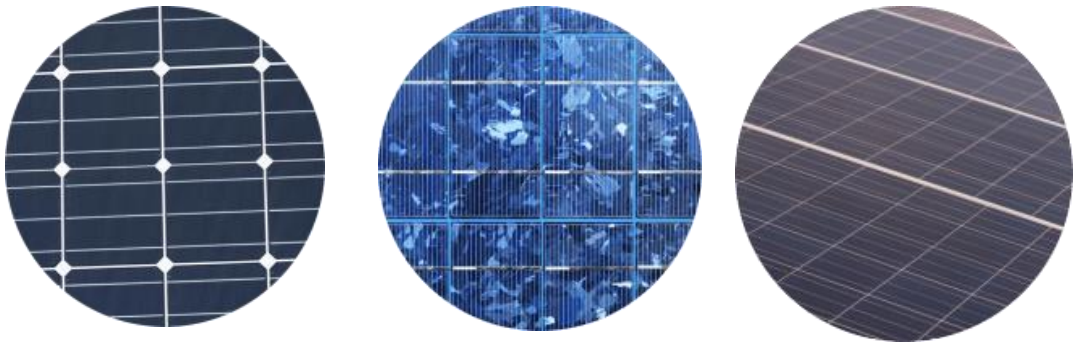


Рис. 1.2. Типи фотоелементів: а – монокристалічний, б – полікристалічний, в – тонкоплівковий.

Кристалічні фотоелектричні типи виготовляються з кремнію, який спочатку розплавляється, а потім кристалізується у злитки з чистого кремнію. Тонкі скибочки кремнію, які називаються пластинами, вирізаються з монокристалу кремнію (монокристалічний) або з блоку кристалів кремнію (полікристалічний). Ефективність для цих типів фотоелементів становить від 10% до 20%.

Монокристалічний кремній - це тип фотоелементу, виготовлений із монокристалічної структури кремнію, яка має однорідну форму, оскільки вся структура вирощена з одного кристала [2].

Порівняно з некристалічними елементами, однорідна молекулярна структура кремнієвої пластини робить її ідеальною для передачі електронів через матеріал, що призводить до високої ефективності перетворення енергії - коливається від 15 до 20%.

Монокристалічні панелі мають високу вихідну потужність, займають менше місця і служать найдовше. Звичайно, це також означає, що вони є найдорожчими. Ще одна перевага, яку слід враховувати, це те, що вони, як правило, дещо менше зазнають впливу високих температур у порівнянні з полікристалічними панелями [17].

Молекулярна структура полікристалічного кремнію складається з кількох менших груп кристалів, які вводять межі між ними. Полікристалічні фотоелементи менш енергоефективні, ніж попередні монокристалічні кремнієві фотоелементи, оскільки ці межі обмежують потік електронів через них, заохочуючи негативні електрони рекомбінувати з позитивними дірками, зменшуючи вихідну потужність елементу [16].

Результат цього означає, що полікристалічний фотоелектричний елемент має ефективність перетворення енергії від 10 до 14%. Однак ці типи фотоелементів набагато дешевші у виробництві, ніж еквівалентні монокристалічні.

Сонячні елементи другого покоління є різними типами тонкоплівкових елементів і в основному використовуються для фотоелектричних електростанцій, інтегрованих у будівлі або невеликі системи сонячних батарей.

Вони спочатку були розроблені для застосування в космічних технологіях, оскільки мають кращі співвідношенням потужності до розміру та ваги порівняно з попередніми пристроями з кристалічним кремнієм. Тонкоплівкові фотовольтаїчні елементи виробляють шляхом друку або розпилення тонкого напівпровідникового шару матеріалу на скляну, металеву або пластикову фольгу [19].

Застосовуючи ці матеріали тонкими шарами, загальна товщина кожного фотоелементу значно менша за еквівалентний розрізаний кристалічний елемент, звідси і назва «тонка плівка».

Оскільки фотоелектричні матеріали, що використовуються у цих типах фотоелектричних елементів, розпилюються безпосередньо на скляну або металеву основу, процес виробництва, таким чином, стає більш швидким, а отже і дешевшим, що робить технологію тонкої плівки більш життєздатною для використання в домашніх сонячних батареях, оскільки їх час окуплення коротший.

Телурид кадмію (CdTe) - полікристалічний напівпровідниковий матеріал, виготовлений з кадмію та телуру. Тонкоплівковий телурид кадмію має високий рівень поглинання світла, тому необхідна кількість CdTe може бути досить мінімальною, і для ефективного поглинання сонячного світла для роботи сонячного пристрою потрібно менше 1,0 мкм напівпровідникового матеріалу [21].

Хоча процес розпилення або друку тонкої плівки відносно простий, що робить дешевим виробництво таких типів фотоелектричних елементів, основний матеріал, кадмій - токсичний важкий метал, може забруднювати навколишнє середовище, якщо елемент пошкоджений або зламаний. Іншим недоліком цих типів фотоелектричних елементів є те, що ефективність конверсії для фотоелементу з телуриду кадмію може бути низькою і складати менше 10%.

Аморфний кремній - це некристалічна форма кремнію, яка широко використовується в калькуляторах, побутовій електроніці та сонячних виробах для саду, які потребують невеликого струму при низькій напрузі [20].

З різних типів фотоелементів, аморфний кремній має найвищий рівень поглинання світла - в 40 разів вище, ніж кристалічний кремній. Перевага цього полягає в тому, що для виготовлення тонкоплівкового фотоелемента, що зменшує витрати на виробництво та ціну, потрібен набагато тонший шар аморфного кремнію.

Елементи з аморфного кремнію мають різні переваги та недоліки. Позитивним моментом є те, що аморфний кремній може бути нанесений на різноманітні недорогі жорсткі та гнучкі основи, такі як полімери, тонкі метали та пластмаси, а також тоноване скло для будівництва. Однак, з мінусів, двома основними недоліками аморфного кремнію є його дуже низька ефективність перетворення, що коливається від 7 до 9%, коли він новий, та погіршується протягом кількох місяців перебування на сонці до менш ніж 5%.

Мідний диселенід індію - ще один тип полікристалічного напівпровідникового матеріалу, що складається з міді, індію та селену (CuInSe2) [15]. Тонкоплівкові типи фотоелементів типу CIS можуть забезпечувати ефективність конверсії майже 10%, що майже вдвічі перевищує ефективність аморфного кремнію, не маючи тих самих проблем деградації на відкритому повітрі через їх товстішу плівки. Також елементи CIS є одними з найбільш світлопоглинаючих напівпровідникових сполук, що поглинають до 90% сонячного спектру.

Хоча елементи CIS є ефективними, складність рецептури напівпровідникової сполуки робить їх складними у виробництві та дорогими. Крім того, індій є відносно дорогим матеріалом через його обмежену доступність, що викликає занепокоєння щодо безпеки виробництва, оскільки селенід водню є надзвичайно токсичним газом.

Селенід міді-індію-галію (CIGS) - це ще один тип фотоелементів. В основному це полікристалічний тонкоплівковий матеріал на основі попереднього напівпровідникового матеріалу CIS. Додавання невеликої кількості сполуки Галію (Ga) дає фотоелемент з більшою ефективністю перетворення приблизно на 12% від тієї ж кількості сонячного світла [6].

Це пояснюється тим, що галій, який є рідиною, подібною до ртуті, при кімнатній температурі збільшує смугу поглинання світла елементом, яка більше відповідає сонячному спектру, тим самим покращуючи його провідність, дозволяючи електронам вільно рухатися по елементам до електродів.

Окрім загальновживаних типів фотоелементів, згаданих вище, і на які припадає близько 95% комерційного ринку, інші типи фотоелементів, які зараз розробляються, включають [12]:

1. багатоперехідні фотоелементи;
2. чутливі до барвника фотоелементи;
3. 3D фотоелементи.

Багатоперехідні фотоелементи - це типи фотоелектричних елементів, призначених для максимізації загальної ефективності елементу шляхом створення багатошарової конструкції, в якій два або більше фотовольтаїчних переходів розташовані один на одному. Елемент складається з різних напівпровідникових матеріалів у тонкоплівковій формі для кожного окремого шару.

Перевага цього методу полягає в тому, що кожен шар витягує енергію з кожного фотона з певної частини світлового спектру, що бомбардує елемент. Таке нашарування фотоелектричних матеріалів підвищує загальну ефективність і зменшує погіршення ефективності з часом, як, наприклад, в елементах з аморфними кремнієм.

Чутливі до барвника фотоелементи - цей тип технології належить до третього покоління. Для виробництва електроенергії фотоелементами використовується електроліт, рідина, гель або тверда речовина. Ці фотоелектричні типи елементів виготовляються з використанням мікроскопічних молекул світлочутливого барвника на нанокристалічній або полімерній плівці.

Світлова енергія фотона, що поглинається барвником, вивільняє електрони в зону провідності, викликаючи потік електроенергії через напівпровідник. Перевага чутливої до барвника нанокристалічної фотоелектричної батареї полягає в тому, що барвник може бути надрукований на будь-якій поверхні, що забезпечує ефективність перетворення близько 10%.

3D тип фотоелементів використовує унікальну тривимірну структуру для поглинання світлової енергії фотона з усіх напрямків, а не тільки зверху, як у

конвективних плоских фотоелементах. Елемент використовує 3D -масив мініатюрних молекулярних структур, які захоплюють якомога більше сонячного світла, підвищуючи його ефективність та вихідну напругу, зменшуючи при цьому його розмір, вагу та складність [6].

1.3. Фізичні характеристики фотовольтаїчних перетворювачів

Робота всіх сонячних елементів, незалежно від типу використовуваних матеріалів, характеризується такими параметрами:

1. напруга холостого ходу V_{OC} (Open Circuit Voltage);
2. струм короткого замикання I_{SC} (Short Curcuit Current);
3. коефіцієнт заповнення FF (Fill factor);
4. коефіцієнт корисної дії (ККД).

Графічно коефіцієнт заповнення FF – це міра «прямокутності» сонячного елемента, а також площа найбільшого прямокутника, який буде відповідати ВАХ (рис. 1.3) [3], [4].

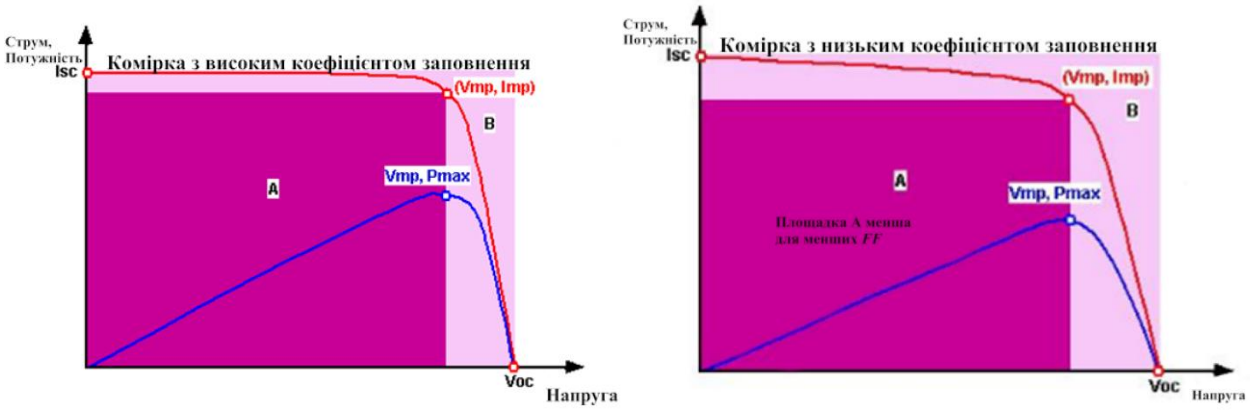


Рис. 1.3. Графік вихідного струму комірки (червона лінія) та потужності (синя лінія), як функції напруги для: а – високого FF, б – низького FF.

На рис. 1.3 також показані точки струму короткого замикання I_{SC} та напруги холостого ходу V_{OC} елементу, а також точка максимальної потужності (V_{mp}, I_{mp}).

Важливими вихідними даними для розрахунку вказаних параметрів є спектральні характеристики сонячного елементу, які визначають квантовий вихід структур, які до нього входять, в першу чергу – квантову ефективність. Квантова ефективність (КЕ) визначається як відношення числа носіїв заряду, який зібрав сонячний елемент, до числа падаючих фотонів даної енергії (в одиничному інтервалі спектру). КЕ ідеального сонячного елементу не залежить від фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, а для фотонів з меншою енергією КЕ дорівнює нулю. на відхилення форми кривої КЕ від ідеальної в короткохвильовій та довгохвильовій областях спектру поглинання впливає велика кількість факторів, які приводять до втрат корисної енергії (у кремнієвих сонячних елементів, в першу чергу, якість пассивації поверхні кремнію). У центральній області спектру поглинання визначальними є втрати на відбиття, а також на низьке значення довжини дифузії фотоіндукованих носіїв [13].

Другою найважливішою характеристикою сонячних елементів є спектральна чутливість SR (photovoltaic spectral response), тобто відношення потоку, який генерується у фотовольтаїчному шарі, до потужності поглинутого в ньому випромінення у одиничному інтервалі частот. Залежність спектральної чутливості від частоти випромінення ω при кімнатній температурі для деяких матеріалів (кристалічний кремній, германій, основні многокомпонентні полупровідники) може бути наближено замінена ідеалізованою залежністю: $SR=0$ для фотонів з енергією нижче ширини забороненої зони (формули 1.1-1.2).

$$E_g = \hbar\omega_g \tag{1.1}$$

та

$$SR = \frac{e}{\hbar\omega} \tag{1.2}$$

для фотонів з більш високою енергією (тут e – заряд електрону, $\hbar$ - постійна Планка). Однак для більшості фотоелектричних матеріалів функції $SR(\omega)$ мають інший вигляд та по-різному залежать від температури. Квантова

ефективність та спектральна чутливість визначають робочий діапазон частот сонячних елементів [3], [4].

У сонячному елементі діодного типу величина фотоструму визначається числом надлишкових носіїв заряду, які створюються світлом у результаті фотоефекту та розділяються p-n-переходом або границею напівпропідникових матеріалів. При цьому електрони з'являються в n-області, а дірки – в p-області. В ідеальному сонячному елементі фотострум I_{ph} є максимальний струм, який виникає під дією сонячного світла, тобто струм короткого замикання I_{sc}, який створюється коли освітлений сонячний елемент замкнений у зовнішньому ланцюзі накоротко. I_{sc} залежить від площі елементу S, від інтенсивності падаючого випромінення та його спектру та від коефіцієнту корисного поглинання сонячного елементу, який називається оптичною ефективністю. Цей коефіцієнт визначається втратами потужності падаючого світла, тобто втратами на відбиття, а у тонкоплівкових сонячних елементів – також втратами на паразитне проходження світла через фотоелектричний шар.

Оптична ефективність за можливістю робиться наближеною до 100%, для чого використовується широкополосне оптичне просвітлення та спеціальні структури для захоплення світла. При оцінному розрахунку фотоструму, який збирається з одиничної площадки сонячного елементу (формула 1.3)

$$J_{ph} = \frac{I_{sc}}{s}, \qquad (1.3)$$

$SR(\omega)$ множиться на спектральну густину потоку поглинутого випромінення $P_A(\omega)$ та інтегрується за шириною спектру. $P_A(\omega)$ являє собою добуток спектральної густини потоку падаючого сонячного випромінення, яку показано на рисунку 1.4., на коефіцієнт корисного поглинання. Такий спрощений розрахунок дає оптимістичну оцінку густини фотоструму J_{ph} в діодному сонячному елементі, яка також залежить від вірогідності розділу носіїв, яка, в свою чергу, визначається пассивацією поверхні діода та часом життя носіїв заряду [3], [4].

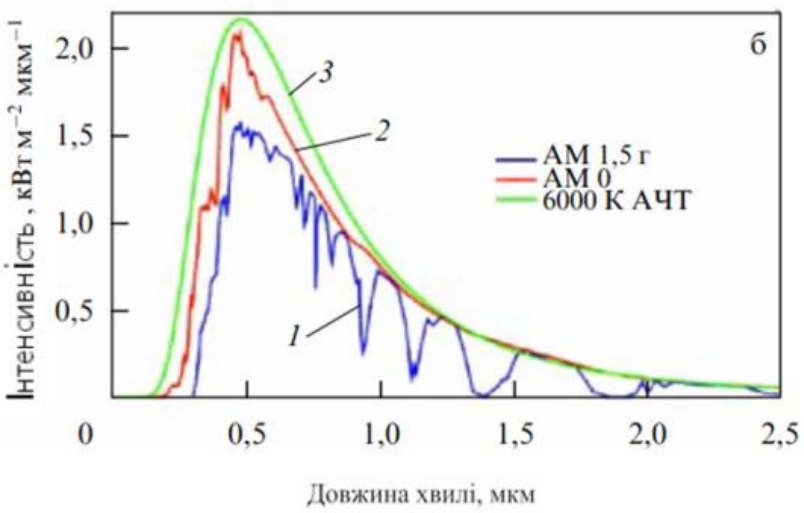


Рис. 1.4. Спектри сонячного випромінення у поверхні землі

АМ – повітряна маса, АМ 1,5G – на широті 50° (крива 1) та АМ 0 – на навколоземній орбіті (крива 2). Для порівняння показано спектр абсолютно чорного тіла з температурою фотосфери сонця (крива 3) [18].

Коефіцієнт заповнення FF – параметр, який у поєднанні з фотострумом (струмом короткого замикання) та напругою холостого ходу визначає максимальну потужність на виході сонячного елемента. FF визначається як відношення максимальної потужності сонячного елемента до добутку $I_{sc}V_{oc}$ та дорівнює максимальній площі прямокутника, який можна вписати у вольт-амперну криву сонячного елементу на рисунку 3.1 (формула 1.4).

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{S_A}{S_B} \quad , \tag{1.4}$$

P_{MP} – максимальна потужність сонячного елементу;

V_{OC} – напруга холостого ходу;

I_{SC} – струм короткого замикання.

ККД визначається як відношення потужності, яку виробляє сонячний елемент, до потужності падаючого на нього сонячного випромінення та є параметром порівняння різних сонячних елементів. ККД можна представити у вигляді добутку інтегральної (за спектром) квантової ефективності на наступні множники: коефіцієнт заповнення, інтегральну оптичну ефективність та

гранична ефективність (*UCE – максимальна ефективність перетворення*) [3], [4].

1.4. Сучасні тенденції в кремнієвій сонячній фотовольтаїці

Як обговорювалося вище, фотоелектричні компоненти, особливо сонячні елементи, повинні мати [10]:

1. низьку ціну;
2. високу ефективність;
3. тривалий термін служби;
4. відсутність обмежень постачання матеріалів;
5. перспективи подальшого зниження витрат.

В даний час цим вимогам найкраще відповідають модулі з кристалічного кремнію. Зростає інтерес до технології пасивації задньої поверхні кремнієвої пластини, що дозволяє підвищити ефективність фотоелементів. А також зростає інтерес до двофазних модулів, у яких відбите випромінювання можна використовувати для збільшення вихідної потужності.

Термін служби модулів залежить від матеріалів та технологій, що використовуються у процесі ламінування, особливо від матеріалу задньої обкладинки. При використанні пластикових плівок термін служби досягає 25 років, тоді як при використанні скляних листів тривалість життя становить 30-40 років.

Більший термін служби скляного модуля обумовлений кращою стійкістю до більш високих температур, вологості та УФ –умов. Крім того, він має кращу механічну стійкість, зменшуючи ризик утворення мікротріщин під час монтажу та експлуатації. Незважаючи на збільшену вагу та ціну, скляні модулі будуть використовуватися більшою мірою переважно у зв'язку з двосторонньою технологією [22].

У той же час поточна вартість модулів з кристалічного кремнію є нижчою, ніж вартість модулів з інших матеріалів через масштабне виробництво кремнієвої сировини, сонячних елементів та модулів.

В даний час модулі технології тонкої плівки відстають від модулів кристалічного кремнію як за ефективністю, так і за вартістю, і мають дещо менший термін служби. Перевага тонкоплівкових модулів полягає в меншому падінні ефективності з температурою, що вигідно для областей з високою інтенсивністю сонячного випромінювання.

Тонкоплівкові технології також можуть бути використані для створення інтегрованих фотоелектричних систем, а CIGS (Селенід міді-індію-галію) може мати багато застосувань в якості гнучких фотоелектричних модулів. Навіть ефективність модулів CdTe та CIGS зросла з 10–13% до 14–16%. Частка тонкоплівкових модулів зменшується, в даний час це близько 5% загального виробництва, причому найбільше скорочення спостерігається у виробництві аморфних кремнієвих модулів [7].

Хоча технологія багатоперехідних елементів має найвищу ефективність, опубліковані дані [7] показують, що ринок не прийняв це. Причинами є, з одного боку, деякі недоліки даних систем (використання лише компонента прямого опромінення, необхідність охолодження елементів та відсутність стандартизації технології виробництва), а з іншого боку, стрімке зниження цін на модулі з кристалічного кремнію. Вихід на ринок нових технологій (таких як органічні фотоелектричні елементи) був практично неможливим через низьку конкурентоспроможність витрат в останні роки [10].

З органічних фотоелементів найбільш перспективними є нещодавно розроблені гібридні перовскітні елементи. Сонячні батареї з перовскіту мають великий потенціал стати однією з провідних технологій у фотоелектричній промисловості завдяки своїй високій ефективності (близько 20%) та низьким виробничим витратам [10].

Є два шляхи подальшого розвитку. Перший – виготовлення тонкоплівкових елементів перовскіту на гнучких підкладках, другий – тандеми з

кристалічного кремнію та тонкоплівкових елементів, де ефективність може перевищувати 30% , використовуючи переваги технології на основі пластин [1].

Перевірена технологія з кристалічного кремнію може служити дуже хорошою нижньою пластиною в поєднанні з верхньою пластиною з перовскіту, роблячи перспективний шлях для майбутнього розвитку.

Серйозною проблемою перовскітових структур була низька стійкість. Поліпшення якості та стабільності модулів перовскіту все ще є предметом інтенсивних досліджень та розробок. Подальше підвищення вартості та терміну служби буде важливим для досягнення конкурентоспроможності [10].

Висновки до розділу 1

Фотоелектрична сонячна енергія отримується шляхом перетворення сонячного світла в електричну енергію. Найбільш відомими пристроями, які допомагають перетворювати енергію сонця на потік електронів є сонячні батареї, які набули широкого використання як в космічній галузі, так і в побутовій. Зараз стало дуже розповсюджено розміщувати сонячні панелі у якості невеликих генераторів для власного споживання або використовувати великі фотоелектричні установки.

Фотоелектрична сонячна енергія є чистим, відновлюваним джерелом енергії. Сонячні панелі являють собою сукупність фотоелектричних комірок, з'єднаних послідовно. Фотовольтаїчні технології базуються на використанні напівпровідників (частіше кремнієвих) p- та n-типу, які розміщені поруч.

Фотоелементи, виготовлені з кремнію, бувають монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові.

Монокристалічний кремній – це тип фотоелементу, що виготовлено з монокристалічної структури кремнію, яка має однорідну форму, у той час як молекулярна структура полікристалічного кремнію складається з кількох менших груп кристалів. Така структура полікристалічних елементів робить їх менш ефективними, ніж монокристалічні, оскільки електронам складніше протікати через них.

Робота всіх сонячних елементів, незалежно від їх типу, характеризується напругою холостого ходу, струмом короткого замикання, коефіцієнтом заповнення та коефіцієнтом корисної дії. Також, ще однією найважливішою характеристикою є спектральна чутливість.

Сонячні елементи повинні мати низьку ціну, високу ефективність, тривалий термін служби, відсутність обмежень постачання матеріалів та перспективи подальшого зниження витрат. Технологія сонячних елементів все ще не бездоганна, але вона має декілька шляхів подальшого розвитку. Вони

спрямовані на підвищення вартості та терміну служби фотоелементів, що є важливим для досягнення конкурентоспроможності.

РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1. Опис обладнання та принципова електрична схема стенду для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів

У даній роботі проводилися дослідження з двома фотовольтаїчними перетворювачами.

Перший фотоелемент (PET Solar Panel FYD-022)

З 2006 року китайська компанія Findy Solar займається проектуванням та виробництвом на замовлення сонячних панелей преміум-класу, високої ефективності.

Маючи понад 15-річний досвід роботи в сонячній індустрії, Findy Solar розробила повний асортимент індивідуальних сонячних панелей різних розмірів, форм, матеріалів для широкого спектру застосувань.

Компанія Findy Solar використовує найсучасніші та передові технології в галузі. Наприклад, автоматизовані машини для лазерного різання сонячних батарей, автоматичні машини для натяжки сонячних батарей, ламінатори та інше професійне обладнання для тестування не тільки підвищує ефективність виробництва, але також забезпечує якість продукції та значно заощаджує витрати і собівартість панелей.

Основним компонентом сонячної панелі є сонячний елемент, який безпосередньо впливає на електричні характеристики та стабільність самої сонячної панелі. Тому для досягнення оптимальної та максимальної ефективності надзвичайно важливо, використовувати лише високоякісні та найефективніші конфігурації сонячних елементів. Findy Solar обирає сонячні батареї, які одночасно високоефективні та мають чудову продуктивність при слабкому освітленні.

Окрім використання традиційних високоефективних сонячних батарей із кристалічного кремнію, компанія також активно використовує високоефективні

сонячні батареї із зворотним контактом, щоб задовольнити специфічні потреби кожного з індивідуальних клієнтів. Одним з виробів компанії Findy Solar є сонячна панель PET Solar Panel (рис. 2.1.).

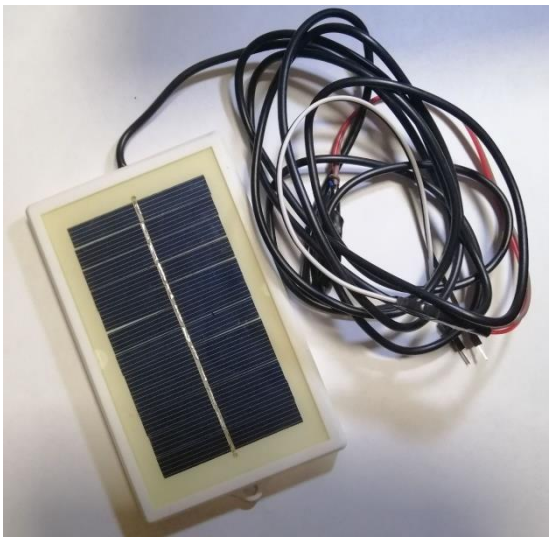


Рис. 2.1. Сонячна панель PET Solar Panel FYD-022

Це полікристалічна панель з ефективністю понад 20 %. Максимальна потужність модуля 0,8 Вт, напруга при максимальній потужності – 6 В, а сила струму – 0,13 А. Напруга відкритого ланцюга батареї – 7,4 В, а струм короткого замикання – 0,143 А.

Сонячна панель PET має наступні габарити:

- Ширина – 1134 мм;
- Довжина – 2279 мм;
- Товщина – 35 мм.

Товщина скла рівна 3,2 мм, а вага 28 кг.

PET Solar Panel – високоефективна полікристалічна панель яка є досить потужною і якісною. При вихідній потужності 90% гарантія діє протягом 12 років, а при потужності 80% - 25 років.

Другий фотоелемент (фотоелемент садового ліхтаря SBF-107)

Одним з можливих застосувань сонячних батарей є їх встановлення на вуличних або садових ліхтарях. Вдень, завдяки фотоелементам, заряджається

влаштований акумулятор, а в ночі ця електроенергія витрачається на забезпечення необхідного рівня освітлення. Заряду батареї вистачає на 8 годин безперервної роботи.

Сонячна батарея, влаштована в садові ліхтарі SBF-107 є полікристалічною. Забезпечує напругу при максимальній потужності – 2 В.

Резистор

Змінний резистор, або потенціометр являє собою пристрій, здатний розділяти та регулювати напругу за допомогою коригування опору. Змінні резистори мають три виводи. Два з них підключаються до резистивного елемента і з'єднані шляхом постійного опору. Третій приєднують до ковзного по цій поверхні контакту.

Це дозволяє приладу виконувати функцію резистора, роботу якого можна регулювати. Така функція здійснюється за допомогою переміщення ковзного контакту з окремим виводом по спеціальному елементу. Положення, в якому вони перебувають один до одного і видаватиме поточне значення напруги.

Резистор змінний 16K1 100kOm – це осьовий однооборотний монопотенціометр з номінальною напругою 100 кОм і номінальною потужністю 0,2 Вт.

Даний резистор по характеру зміну опору є лінійним, тобто опір змінюється в прямій залежності від кута повороту ковзкого контакту. А кут поворотного механізму у даного приладу 300 ± 5°. Матеріал доріжки - вуглецевий.

Резистор змінний 16K1 має робочу напругу 150 В. Похибка опору приладу – до 10%. Розмір корпуса 16×8,5 мм.

Мультиметр універсальний DT-830B

Мультиметр універсальний DT-830B має основний набір функцій - вимірювання напруги, постійного струму і опору, також має діодний тест.

Постійна напруга даного пристрою – 1000 В, змінна напруга – 750 В. При цьому постійний струм – 10 А, опір – 2 МОм.

Мультиметр універсальний DT-830B має такі додаткові функції, як перевірка коефіцієнта посилення транзисторів (PNP/NPN), тест діодів, індикація розряду батареї, індикація навантаження.

Пристрій може працювати при діапазоні температур від -5 ºС до +23 ºС. Вологість – не більше 80 %.

Число положень поворотного перемикача у даного мультиметра – 19. Кількість гнізд: 3. А габаритні розміри: 12.6 × 7 × 2.8 см. Вага: 137 грам.

Для зручності підключення до макетної плати, щупи мультиметрів були змінені і спаяні з перемичками. Набір перемичок (джамперів) тато-тато зручно використовувати з макетною платою, оскільки вони добре паяються. Довжина перемичок - 20 см.

Макетна плата SYB-120 зроблена з термостійкого пластику, містить 700 отворів з кроком 2,5 мм. Зі зворотнього боку плати – двосторонній скотч, для зручного кріплення до поверхонь. Габаритні розміри макетної плати: 17.7 × 4.6 см.

Світлофільтри

Світлофільтр – це оптичний пристрій, який служить для виділення частини спектра електромагнітного випромінювання. Кожна марка скла має цифробуквенне позначення, яке відповідає робочій частині області спектру. При цьому спектральна характеристика скла різна залежно від варіння, умов зберігання та товщини скла.

Фіолетове скло ФС6 призначене для виділення областей спектра 290-460 нм.

Помаранчеве скло ОС6 слугує для колориметрії та фотометрії.

Синьо-зелене скло СЗС22 призначене для поглинання областей спектру 580-700 нм.

Зелене скло ЗС1 призначене для поглинання областей спектру 430-650 нм.

ПС13 – скло, що пропускає УФ випромінення до 240 нм.

Кольорове скло застосовується для вибіркового пропускання випромінювання відповідно до певної частини спектра. Залежно від завдань,

умов виготовлення та фізичних характеристик виробу, світлофільтр здатний ефективно працювати в діапазоні від ультрафіолетових до середніх інфрачервоних хвиль.

Використовуючи прилади, з характеристиками яких ми щойно ознайомились, складемо принципову електричну схему (рис. 2.2) стенду для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів для отримання вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик при опроміненні видимим світлом.

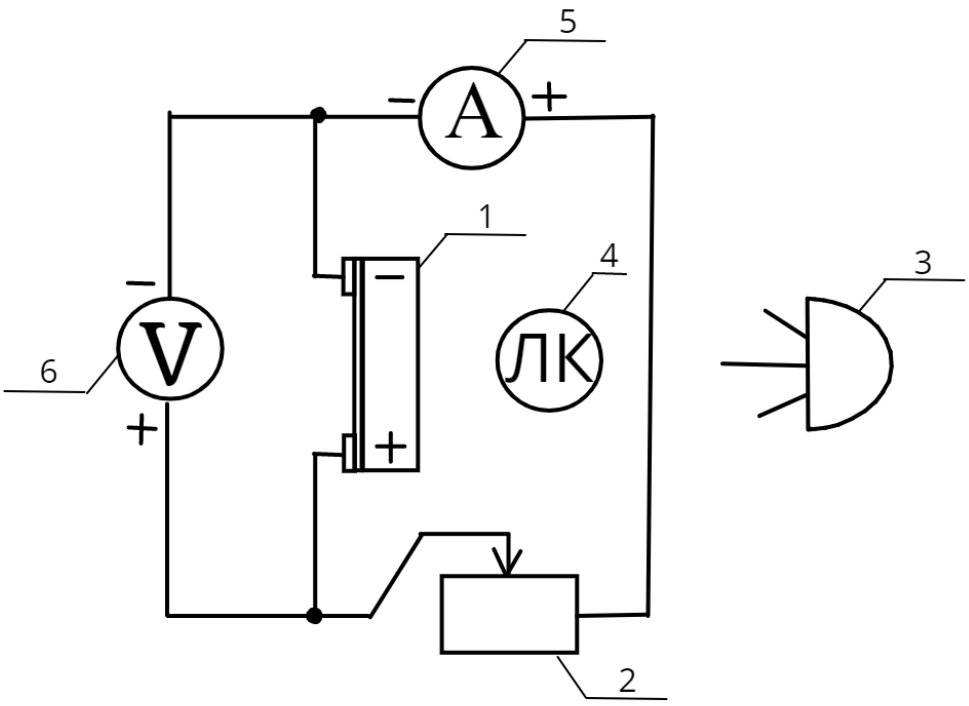


Рис. 2.2. Принципова електрична схема стенду для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів для отримання вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик.

Для отримання даних з фотоелементу (1) використовувалися два мультиметри DT-830B. Один з них виконував роль вольтметра (6) та під’єднувався паралельно, інший – у якості амперметра (5), та під’єднувався послідовно. Через підключення амперметра виникали втрати напруги у колі, тому було вирішено під’єднати у коло перемінний резистор 16K1 100kOm (2).

Для вимірювання освіченості використовувався люксметр MS6610 (4). У якості джерела світла використовувався потужний металічний ліхтарик POLICE-1101 (3).

Експериментальні установки, з якими ми працювали в даній роботі можна побачити на рис. 2.3 (а) та рис. 2.3 (в).

(a)

(b)

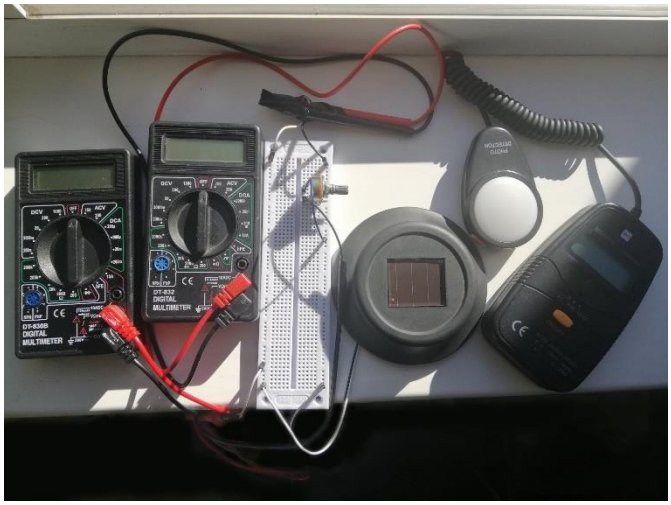


Рис.2.3. Експериментальна установка для визначення вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик фотоелементів (a) – PET Solar Panel FYD-022, (b) – фотоелементу з садового ліхтаря

Результати вимірювань, люкс-вольтні та вольт-амперні характеристики даних фотоелементів дивись 2.2.

2.2. Складання вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик фотовольтаїчних перетворювачів на основі отриманих даних

При віддалені ліхтарика від фотоелементу PET Solar Panel FYD-022 ми штучно поступово знижували освіченість, отримавши дані у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022

ЛК	*I, μA*	*U, B*
57000	55	5,74
48500	54	5,70
45600	54	5,65
37000	53	5,53
26000	51	5,30
13200	47	4,90
7440	46	4,86
6100	45	4,79
5020	45	4,70
3290	44	4,60
2080	43	4,53
1280	42	4,42
1120	40	4,24
780	38	4,01
650	36	3,81
540	34	3,66

410	32	3,40
250	30	3,26
190	28	2,99
129	26	2,87
98	24	2,61
87	22	2,43
71	20	2,20
65	18	1,96
48	16	1,75
42	14	1,64
28	12	1,44
20	10	1,17
16	8	0,97
14	6	0,81
13	4	0,60
12	2	0,40
0	0	0

За результатами даних таблиці 2.1. отримано вольт-амперну (рис 2.3) та люкс-вольтну (рис. 2.4) характеристики фотоелементу PET Solar Panel FYD-022.

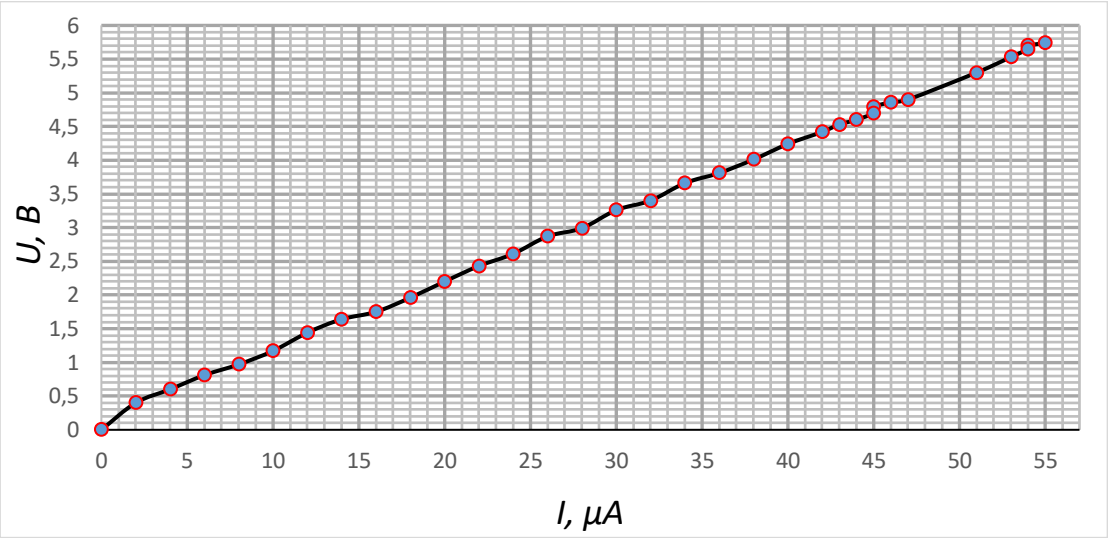


Рис. 2.3. Вольт-амперна характеристика фотоелементу PET Solar Panel FYD-022

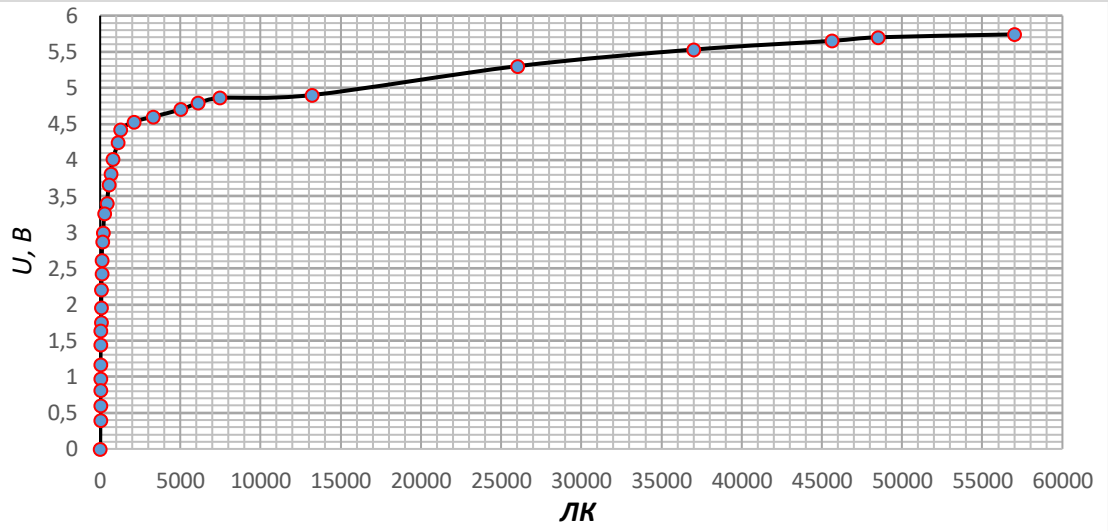


Рис. 2.4. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу PET Solar Panel FYD-022.

Аналогічні дії були виконані і для фотоелементу 2. Результати дослідження представлені у таблиці 2.2 та на рис. 2.5, рис. 2.6.

Таблиця 2.2.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу 2

ЛК	*I, μA*	*U, B*
11860	14,6	1,5
6100	14,4	1,48
4570	14,2	1,46
3190	14,0	1,43
2740	13,6	1,40
2120	13,5	1,38
1710	13,2	1,36
1350	13,0	1,34
1160	12,8	1,32
1030	12,6	1,30
880	12,5	1,28
760	12,2	1,26
581	12,1	1,24
468	11,8	1,22
455	11,7	1,20
417	11,5	1,18
350	11,3	1,16
345	11,1	1,14
330	10,9	1,12
321	10,6	1,10
320	10,5	1,08
286	10,3	1,06
263	10,0	1,04
259	9,9	1,02
234	9,8	1,00

221	9,5	0,98
211	9,3	0,96
196	9,1	0,94
186	8,9	0,92
179	8,8	0,90
165	8,5	0,88
152	8,3	0,86
145	8,1	0,84
138	8,0	0,82
134	7,8	0,80
125	7,6	0,78
119	7,3	0,76

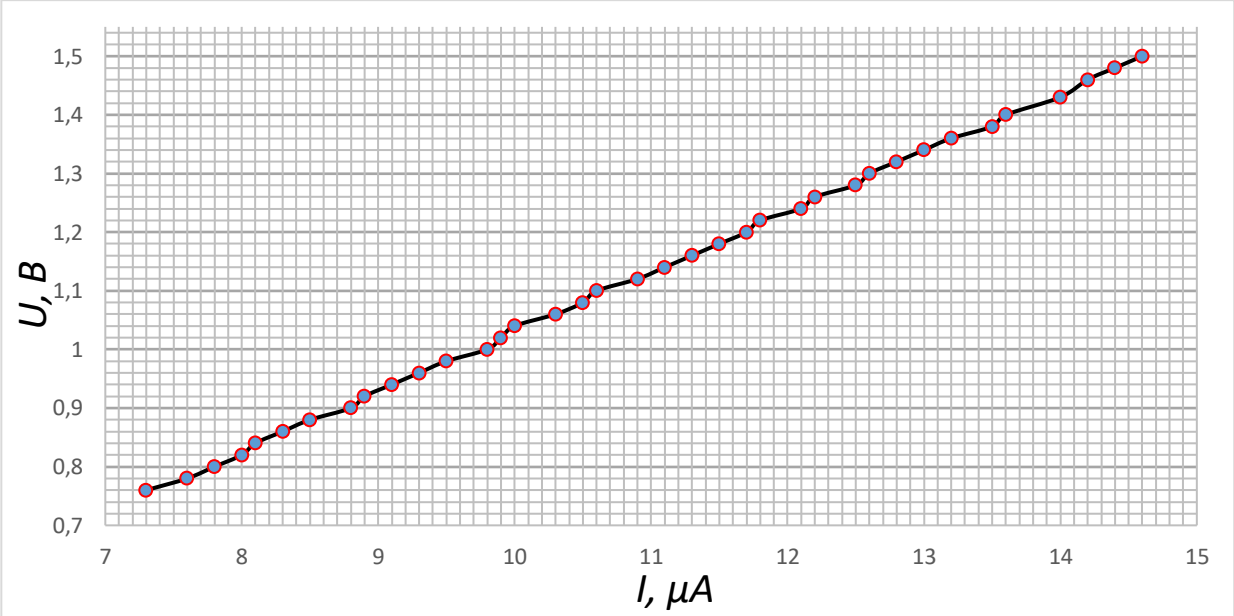


Рис. 2.5. Вольт-амперна характеристика фотоелементу 2

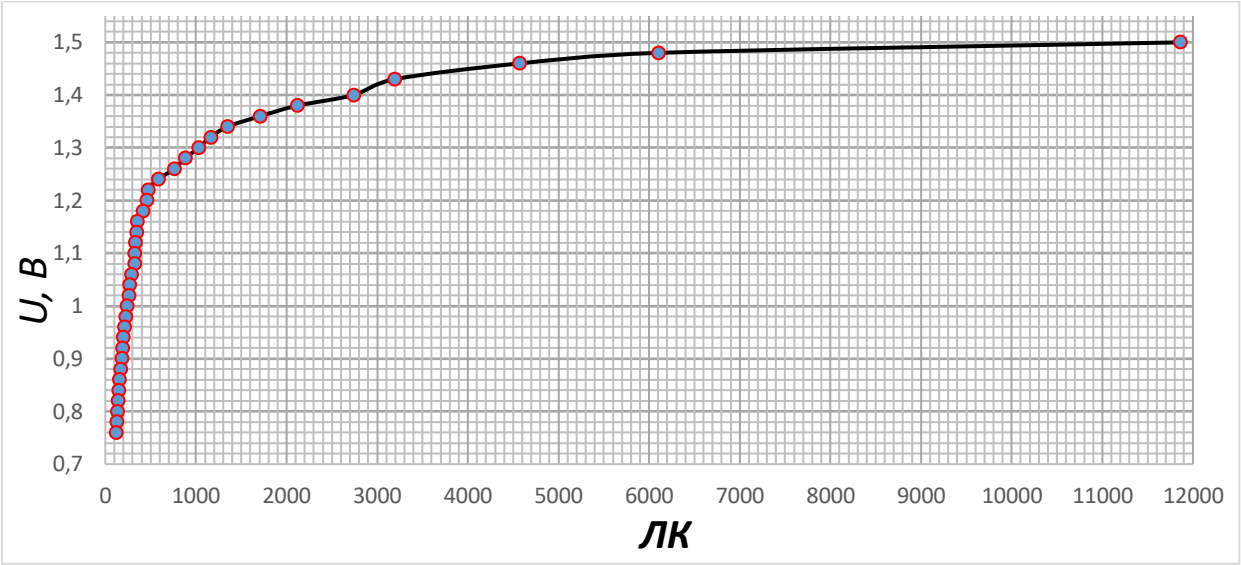


Рис. 2.6. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу 2

Проаналізуємо дані, отримані під час дослідження.

По-перше, при однаковій освітленості фотоелемент PET Solar Panel FYD-022 та фотоелемент 2, узятий з садового ліхтарика, відрізняються напругою, яку можуть виробити. Так, наприклад, при освітленні 5000 ЛК фотоелемент PET Solar Panel FYD-022 видає нам 4,7 В, а фотоелемент 2 – 1,46 В. Така різниці у результатах може бути, насамперед, через те, що площі поверхонь обох елементів різна (площа фотоелементу PET Solar Panel FYD-022 більша).

По-друге, можемо побачити, що вольт-амперні характеристики обох фотоелементів для діапазонів напруг та струмів, які досліджувалися, мають лінійний вигляд, тобто мають низький коефіцієнт заповнення (див. розділ 1). Максимальна напруга, зафіксована на фотоелементі PET Solar Panel FYD-022 – 5,74 В, що відповідає його напрузі при максимальній потужності – 6 В, а у фотоелементу 2 – 1,5 В.

Тепер проаналізуємо люкс-вольтні характеристики фотоелементів. Зі збільшенням освітленості росте напруга на сонячних батареях, згідно графіків, ця зміна має нелінійних характер – чим менше освітленість, тим швидше зменшується напруга.

2.3. Дослідження залежності вольт-амперної та люкс-вольтної характеристики від довжини хвилі падаючого опромінення

У розділі 2.2 було проаналізовано вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики двох фотоелементів при видимому світлі, але, як ми знаємо з розділу 1.3, фотовольтаїчні перетворювачі – спектрально чутливі прилади. Це означає, що покази сонячних панелей залежать також від довжини хвилі падаючого опромінення.

Було проаналізовано цю залежність та характер змін показів фотоелементу PET Solar Panel FYD-022 при опроміненні світлом, яке пройшло крізь світлофільтри ПС-13, ЗС-1, СЗС-22, ОС-16 та ФС-6.

Результати вимірювань характеристик сонячного елементу можна побачити у таблицях 2.3-2.7.

Вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики фотоелементу, опроміненого світлом, яке пройшло крізь світлофільтри знаходяться на рисунках 2.7 – 2.16.

Слід зазначити важливий момент. Для точності отриманих даних, дослідження проводилося у темряві. Це необхідно щоб на фотоелементи потрапляло лише світло тієї довжини хвилі, яка відповідає світлофільтру.

Таблиця 2.3.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022 при ультрафіолетовому світлі ПС-13

ЛК	17	22	33	41	52	60
U, В	0,35	0,52	0,88	1,03	1,18	1,24
I, μA	3,4	4,9	8,6	10,0	11,4	12,0

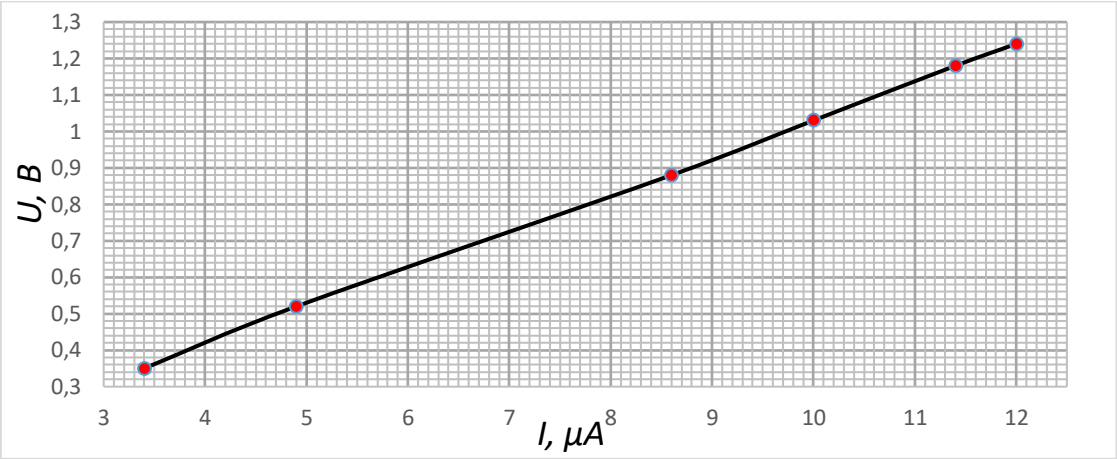


Рис. 2.7. Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ПС-13

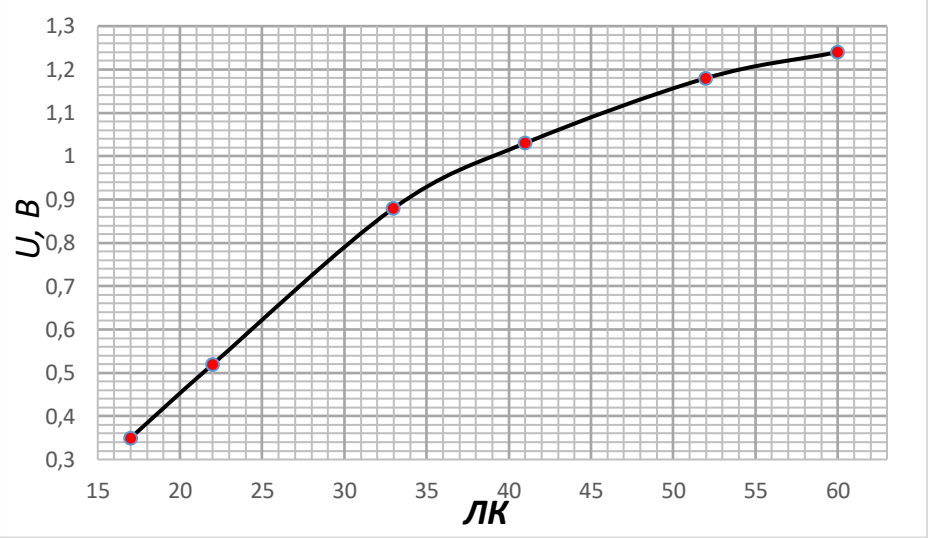


Рис. 2.8. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ПС-13

Таблиця 2.4.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022 при зеленому світлі ЗС-1

ЛК	40	50	67	75	86	129
U, В	0,63	0,91	1,20	1,38	1,52	1,85
I, μА	6,0	8,7	10,3	13,0	14,4	17,8

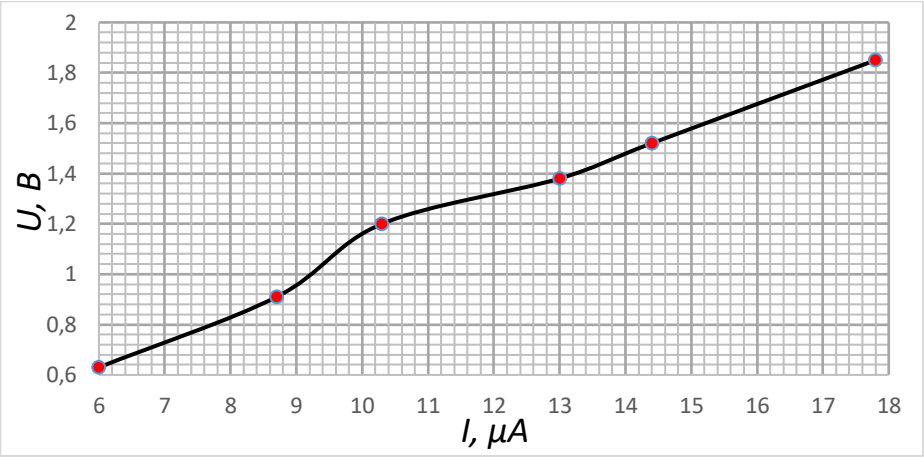


Рис. 2.9. Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ЗС-1

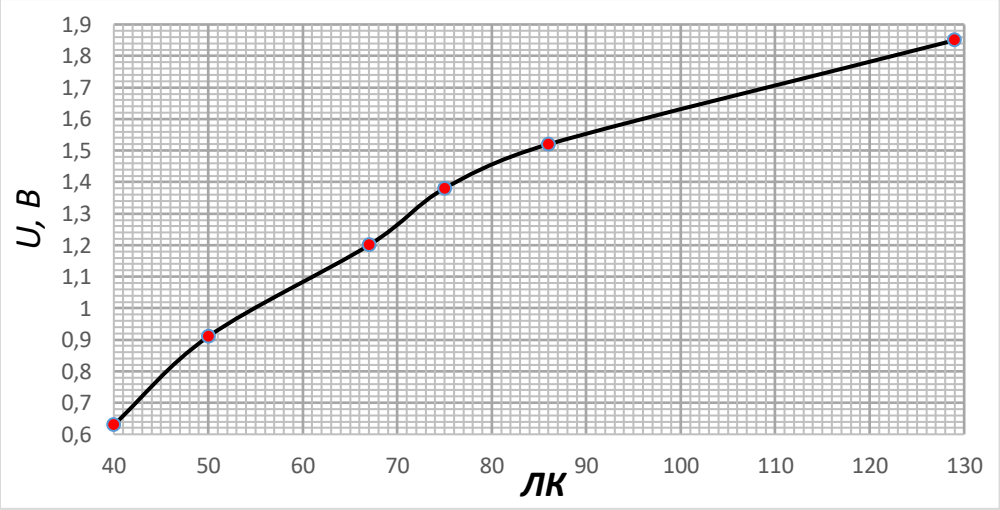


Рис. 2.10. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ЗС-1

Таблиця 2.5.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022 при синьо-зеленому світлі СЗС-22

ЛК	33	40	42	55	61	67	76	104	141	172	219
U, В	0,61	0,82	0,86	1,17	1,25	1,38	1,46	1,90	1,95	2,01	2,06
I, μA	5,7	7,4	7,8	11,2	12,3	13,4	13,5	18,6	18,7	19,1	19,3

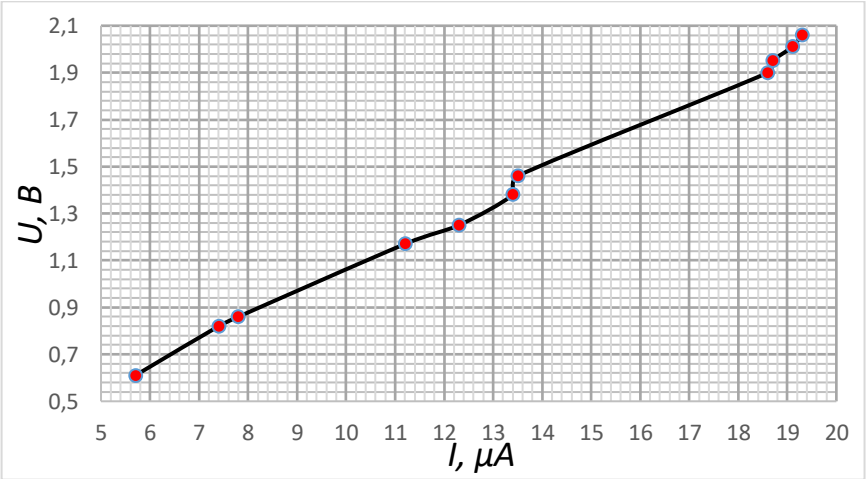


Рис. 2.11. Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр СЗС-22

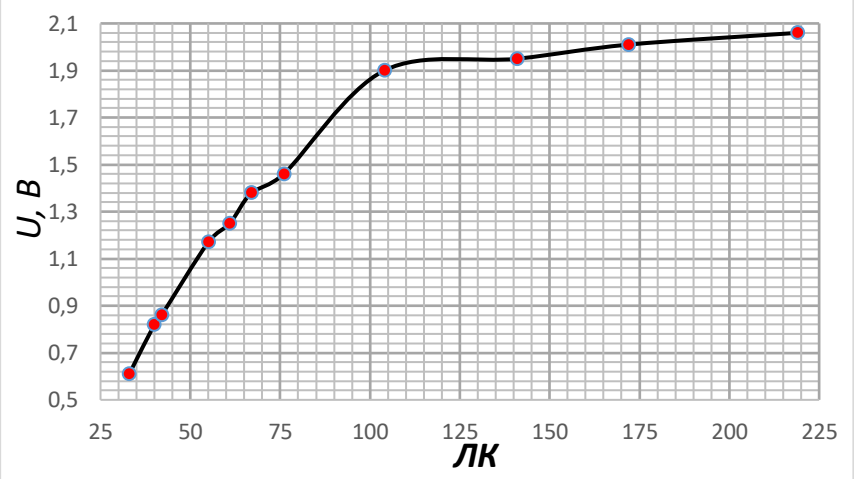


Рис. 2.12. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр СЗС-22

Таблиця 2.6.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022 при помаранчевому світлі ОС-16

ЛК	14	16	18	21	26	31	40	54	74
U, В	0,27	0,34	0,47	0,52	0,73	0,92	1,16	1,29	1,45
I, μA	2,6	3,2	4,4	5,0	6,7	9,1	11,3	12,3	14,0

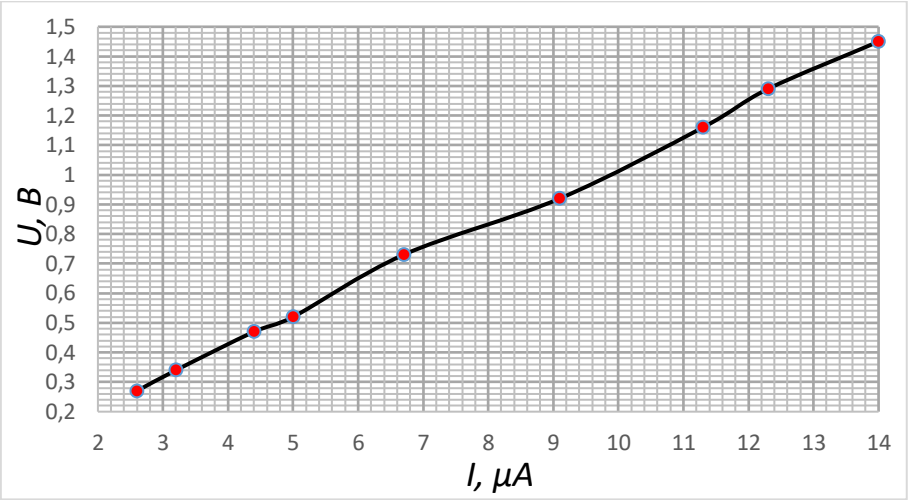


Рис. 2.13. Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ОС-16

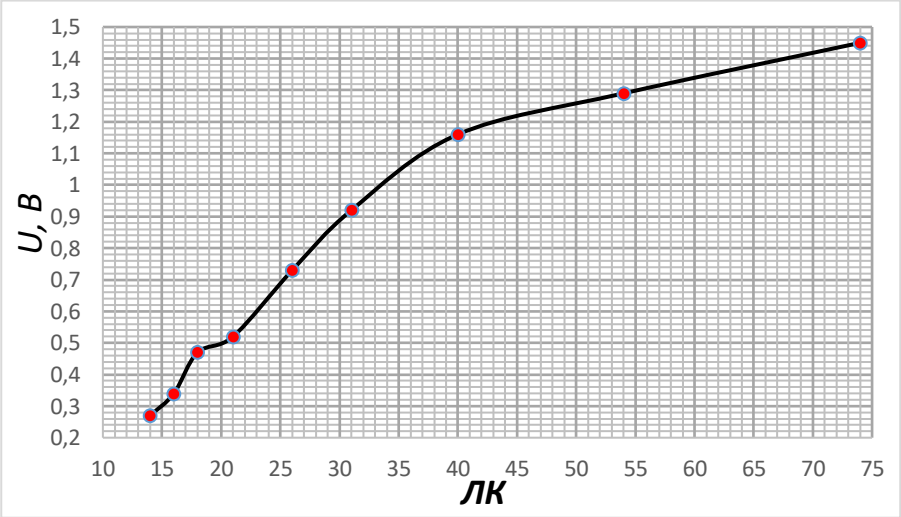


Рис. 2.14. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ОС-16

Таблиця 2.7.

Результати вимірювань вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу PET Solar Panel FYD-022 при фіолетовому світлі ФС-6

ЛК	11	12	13	14	16	18	24	28	33
U, В	0,05	0,07	0,10	0,13	0,17	0,21	0,28	0,30	0,31
I, μА	0,3	0,5	0,9	1,1	1,6	1,9	2,6	2,8	2,9

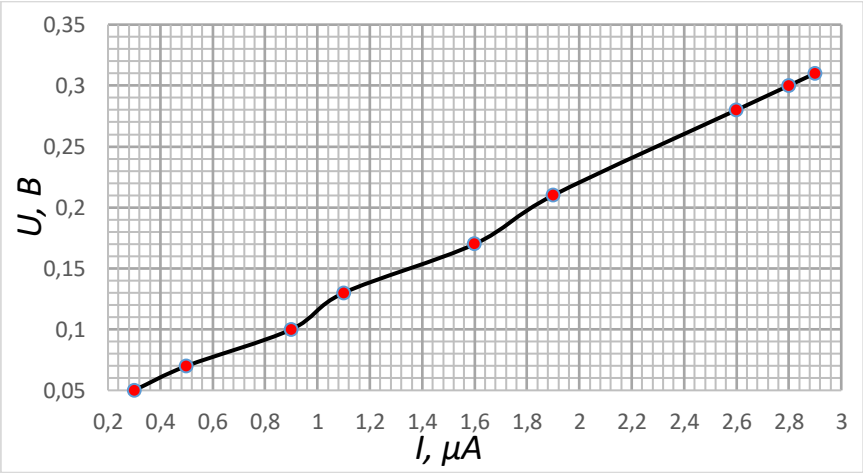


Рис. 2.15. Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ФС-6

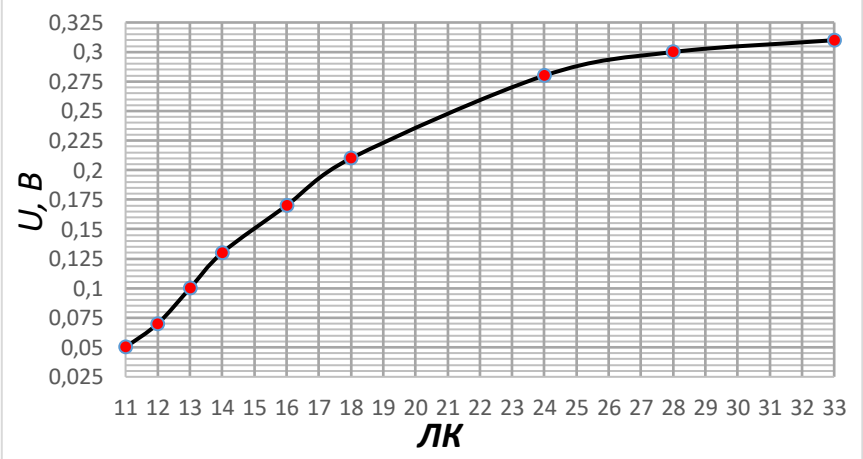


Рис. 2.16. Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні світлом, що пройшло крізь світлофільтр ФС-6

Як видно на рисунках 2.7, 2.9, 2.11, 2.13 та 2.15, вольт-амперні характеристики фотоелементів при освітлені світофільтрами ПС-13, ЗС-1, СЗС-22, ОС-16 та ФС-6 лінійні на діапазонах напруг та струмів, при яких відбувалося дослідження, тобто мають низькі коефіцієнти заповнення.

Криві люкс-вольтних характеристик на рисунках 2.8, 2.10, 2.12, 2.14 та 2.16 мають нелінійних характер, які у порівнянні з рисунком 2.4 (коли освічували фотоелемент PET Solar Panel FYD-022 видимим світлом) мають менш виражений характер.

Порівняємо отримані на рисунках 2.8, 2.10, 2.12, 2.14 та 2.16 люкс-вольтні характеристики. Якщо дивитися в порядку від «теплих» довжин хвиль до «холодних» за шкалою електромагнітних хвиль, можна помітити, що чим ближче опромінення наближається до «холодної» частини спектру, тим менш вираженою стає дуга люкс-амперної характеристики. На рисунку 2.16 видно, що при освітленні фіолетовим світлом крива більш розгорнута у порівнянні з кривою на рисунку 2.14.

Максимальна напруга, яку можна було отримати при опроміненні помаранчевим світлом складає 1,45 В (74 ЛК), зеленим – 1,85 В (129 ЛК), синьо-зеленим – 2,06 В (219 ЛК), фіолетовим – 0,31 В (33 ЛК), ультрафіолетовим – 1,24 В (60 ЛК).

Візьмемо на графіках люкс-вольтних характеристик фіксоване значення освітленості 33 ЛК та порівняємо значення напруги на фотоелементі при освітленні світлом, що пройшло крізь світофільтри.

ПС-13: 0,88 В;

ЗС-1: дані відсутні, <0,91 В;

СЗС-22: 0,61 В;

ОС-23: 0,96 В;

ФС-6: 0,31 В.

Можна зробити висновок, що чим «тепліше» світло за шкалою електромагнітних хвиль потрапляє на фотоелемент, тим більше значення напруги ми отримуємо. Виняток – ультрафіолетове випромінювання.

Висновки до розділу 2

Було досліджено вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики фотоелементів при опроміненні їх видимим світлом, та світлом, що пройшло крізь світлофільтри.

На першому етапі роботи аналізувалися дані двох фотоелементів. Дивлячись на отримані дані, можна зробити висновок, що вольт-амперні характеристики обох фотоелементів (і при видимому світлі, і при світлі різних довжин хвиль) мають вигляд прямої лінії на діапазонах напруг та струмів, при яких відбувалося дослідження, тобто мають низькі коефіцієнти заповнення.

Люкс-вольтні характеристики фотоелементів мають нелінійний вигляд. Чим менше освітленість, тим стрімкіше значення напруги наближається до нуля, а зі збільшенням освітленості, напруга наближається до свого максимального значення.

Графік люкс-вольтної характеристики при видимому світлі віглядає чітко вираженим, точним, у той час, як графіки, отримані при опроміненні фотоелемента світлом з різними довжинами хвиль – не на стільки чіткі. Якщо дивитися в порядку від «теплих» довжин хвиль до «холодних» за шкалою електромагнітних хвиль, можна помітити, що чим ближче опромінення наближається до «холодної» частини спектру, тим менш вираженою стає дуга люкс-амперної характеристики.

Завдяки графікам люкс-вольтних характеристик було визначено значення напруги, яку можна отримати на фотоелементі при освітлені світлом, що пройшло крізь світлофільтри ПС-13, ЗС-1, СЗС-22, ОС-16 та ФС-6. Звідси отримано висновок: чим «тепліше» світло за шкалою електромагнітних хвиль потрапляє на фотоелемент, тим більше значення напруги ми отримуємо. Виняток – ультрафіолетове випромінювання.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ: «ФОТОВОЛЬТАЇЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ» ДЛЯ СЕРЕДНЬОЇ ШКОЛИ

Мета роботи: визначити принцип роботи фотовольтаїчних перетворювачів та дослідити їх характеристики.

Теоретичні відомості

Фотовольтаїка – це процес перетворення сонячного світла безпосередньо в електроенергію за допомогою сонячних елементів. Сьогодні це швидко зростаюча і все більш важлива відновлювана альтернатива традиційному виробництву електроенергії, але у порівнянні з іншими технологіями виробництва електроенергії, ця технологія відносно нова.

Найбільш відомими пристроями, які допомагають перетворювати енергію сонця на потік електронів є сонячні батареї, які набули широкого використання як в космічній галузі, так і в побутовій.

Фотоелектрична сонячна енергія є чистим, відновлюваним джерелом енергії. Сонячні панелі (батареї) являють собою сукупність фотоелектричних комірок, з’єднаних послідовно. Фотовольтаїчні технології базуються на використанні напівпровідників (частіше кремнієвих) p- та n-типу, які розміщені поруч [III].

Кремній p-типу одержують шляхом додавання атомів, таких як бор або галій, які мають на своєму зовнішньому енергетичному рівні на один електрон менше, ніж кремній. Оскільки бор має на один електрон менше, ніж потрібно для утворення зв'язків з оточуючими атомами кремнію, створюється порожнє місце з позитивним зарядом або "дірка" [II].

Кремній n-типу виготовляється шляхом включення атомів, які мають на своєму зовнішньому рівні на один електрон більше, ніж кремній, наприклад фосфор. На зовнішньому енергетичному рівні фосфору є п’ять електронів, а не чотири. Він зв’язується з сусідніми атомами кремнію, але один електрон не бере

участі у зв’язку. Натомість він може вільно переміщатися всередині кремнієвої структури [IV].

Сонячна батарея складається з шару кремнію p-типу, розміщеного поруч із шаром кремнію n-типу (рис. 1). У шарі n-типу є надлишок електронів, а в шарі p-типу-надлишок позитивно заряджених дірок. Поблизу місця перетину двох шарів електрони з одного боку переходу (шар n-типу) переміщаються в отвори з іншого боку переходу (шар p-типу). Це створює область навколо переходу, звану зоною виснаження, в якій електрони заповнюють дірки.

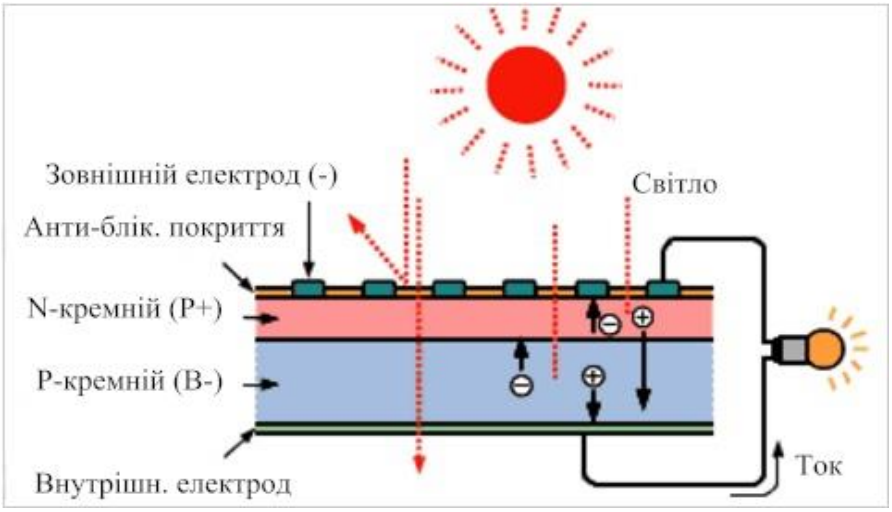


Рис.1 Будова сонячного елементу

Коли всі дірки заповнені електронами в зоні виснаження, сторона p-типу зони виснаження (де спочатку були отвори) тепер містить негативно заряджені іони, а сторона n-типу зони виснаження (де присутні електрони) тепер містить позитивно заряджені іони. Наявність цих протилежно заряджених іонів створює внутрішнє електричне поле, яке перешкоджає електронам у шарі n-типу заповнювати дірки в шарі p-типу [V].

Коли сонячне світло потрапляє на сонячну батарею, електрони в кремнії викидаються, що призводить до утворення «дірок». Якщо це станеться в електричному полі, поле перемістить електрони до шару n-типу, а дірки-до шару p-типу. Якщо з'єднати шари n-типу та p-типу з металевим дротом, електрони

будуть рухатись від шару n-типу до шару p-типу, перетинаючи зону виснаження, а потім пройдуть через зовнішній провід назад з n- типу, створюючи потік електричного струму.

Фотоелементи, виготовлені з кремнію, бувають монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові.

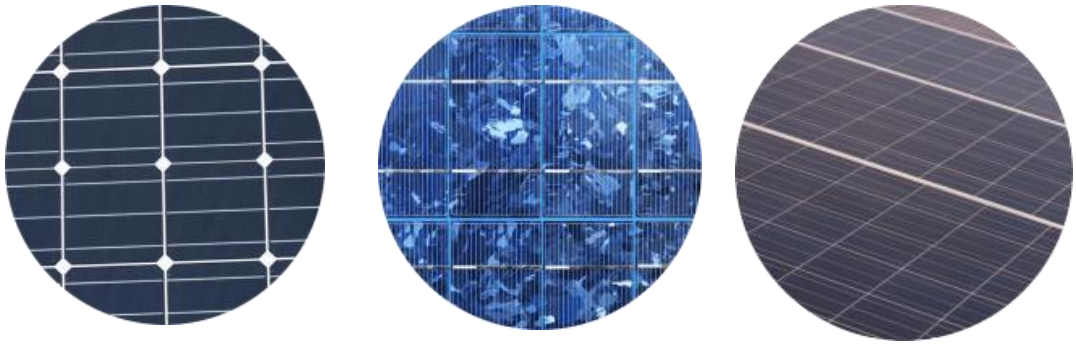


Рис.2 Типи фотоелементів: а – монокристалічний, б – полікристалічний, в – тонкоплівковий.

Монокристалічний кремній – це тип фотоелементу, що виготовлено з монокристалічної структури кремнію, яка має однорідну форму, у той час як молекулярна структура полікристалічного кремнію складається з кількох менших груп кристалів. Така структура полікристалічних елементів робить їх менш ефективними, ніж монокристалічні, оскільки електронам складніше протікати через них [I].

Робота всіх сонячних елементів, незалежно від їх типу, характеризується напругою холостого ходу, струмом короткого замикання, коефіцієнтом заповнення та коефіцієнтом корисної дії. Також, ще однією найважливішою характеристикою є спектральна чутливість.

Опис установки

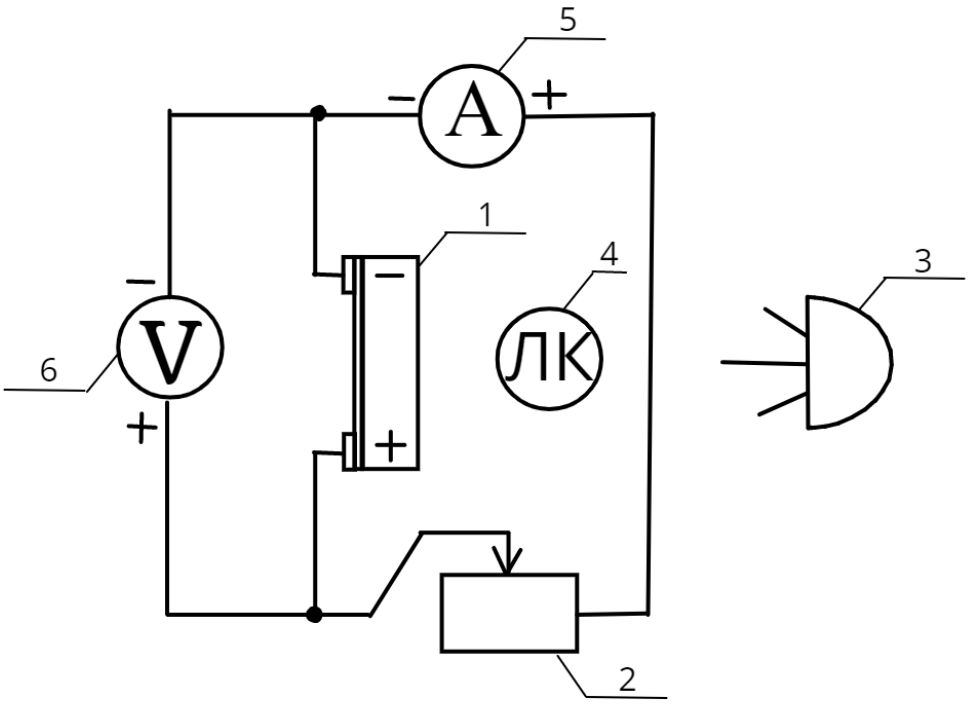


Рис. 3. Принципова електрична схема стенду для лабораторного дослідження фотовольтаїчних перетворювачів для отримання вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик.

Для отримання даних з фотоелементу (1) використовуються два мультиметри DT-830B. Один з них виконує роль вольтметра (6) та під’єднується паралельно, інший – у якості амперметра (5), та під’єднується послідовно. Через підключення амперметра можуть виникали втрати напруги у колі, тому у коло під’єднується перемінний резистор 16K1 100kOm (2).

Для вимірювання освіченості використовується люксметр MS6610. У якості джерела світла використовується потужний ліхтарик (3).

Вигляд експериментальних установок можна побачити на рис. а та рис. в

Рис. 4. Експериментальна установка для визначення вольт-амперної та люкс-вольтної характеристики фотоелементу

План виконання роботи

Експеримент №1. Визначення вольт-амперної та люкс-вольтної характеристик сонячного елементу при видимому світлі

1) Уважно ознайомтеся з описом установки. Розгляньте шкали наявних у вас вимірювальних приладів.

2) Складіть експериментальну установку за схемою на рисунку 3. Розташуйте прилади як показано на рисунку 4.

3) Визначте покази люксметра, напруги та сили струму при максимальному освітленні сонячних панелей. Занесіть дані до таблиці 1.

4) Поступово віддаляйте джерело світла та реєструйте дані до таблиці кожні 0,2 μA.

5) За отриманими даними складіть вольт-амперну та люкс-вольтну характеристики фотоелементу. Зробіть висновок про поведінку отриманих графіків.

Таблиця 1. Видиме світло

ЛК								
U, В								
I, μA								

Експеримент №2. Порівняння вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик сонячного елементу при освітленні світлом різних довжин хвиль

Примітка! Даний дослід повинен проводитися у добре затемненому приміщенні заради того, щоб світло непотрібних довжин хвиль не потрапляло на люксметр то сонячну пластину.

1) Підготуйте світлофільтри червоного, синього та фіолетового кольорів.

2) Повторіть пункти 3-5 експерименту №1 розміщуючи світлофільтри по-черзі перед джерелом світла. Занесіть дані до таблиць 2-4.

3) За отриманими даними складіть вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики фотоелементу. Порівняйте отримані графіки між собою та між графіками, отриманими у експерименті №1. Зробіть висновок про поведінку отриманих графіків.

Таблиця 2. Червоне світло

ЛК								
U, В								
I, μA								

Таблиця 3. Синє світло

ЛК								
U, В								
I, μA								

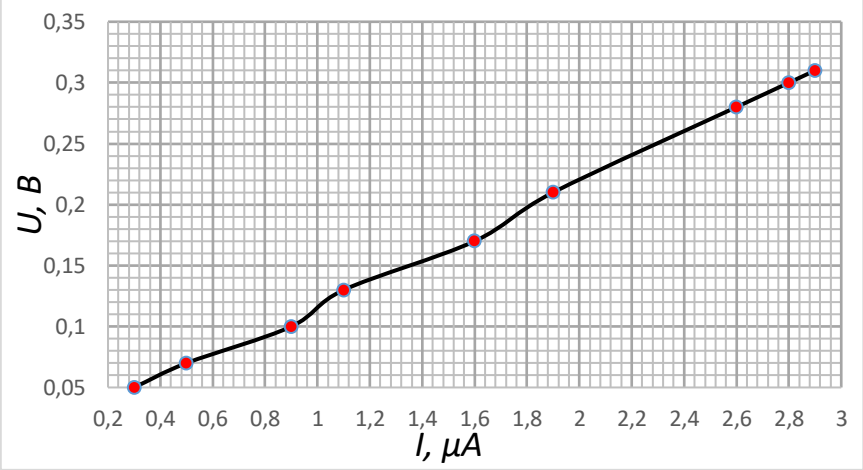
Таблиця 4. Фіолетове світло

ЛК								
U, В								
I, μA								

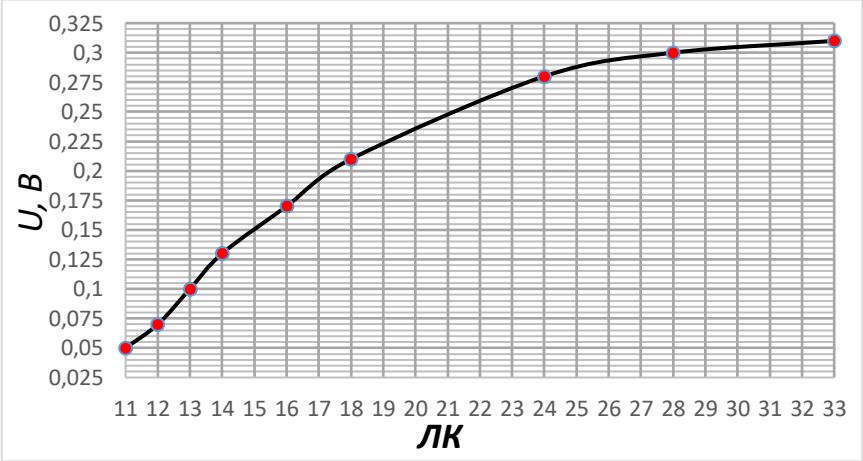
Приклад дослідження сонячної панелі

Таблиця. Фіолетове світло

ЛК	11	12	13	14	16	18	24	28	33
U, В	0,05	0,07	0,10	0,13	0,17	0,21	0,28	0,30	0,31
I, μA	0,3	0,5	0,9	1,1	1,6	1,9	2,6	2,8	2,9



Вольт-амперна характеристика фотоелементу при опроміненні фіолетовим світлом



Люкс-вольтна характеристика фотоелементу при опроміненні фіолетовим світлом

Контрольні запитання

1) Фотовольтаїка – це…

2) Сонячна батарея – це…

3) Люкс – це…

4) За якими характеристиками можна вивчати фотовольтаїчні перетворювачі?

5) На якому принципі працюють фотовольтаїчні перетворювачі?

6) Що таке p-, n- та p-n-перехід?

Список рекомендованої літератури

I. Golla E. Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI. Florida: CRC Press, 2014. 264 p.

II. Kittel. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 680.

III. Marti A., Luque A. Next Generation Photovoltaics. Boca Raton: CRC Press, 2003. 136 p.

IV. Rashid H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. NY: Pearson, 2009. 880 p.

V. Weller P. An analogy for elementary band theory concepts in solids // J. Chem. Edu. 1967. Vol. 44, № 7. P. 391.

Висновки до розділу 3

На основі отриманих результатів дослідження було розроблено методичні рекомендації до лабораторної роботи на тему: «Фотовольтаїчні перетворювачі» задля можливості їх впровадження в розвиток STEM-освіти учнів старшої школи для отримання ними більш технічно складних навичок.

Метою лабораторної роботи є визначити принцип роботи фотовольтаїчних перетворювачів та дослідити їх характеристики.

Робота включає у себе мету, короткі теоретичні відомості, опис лабораторної установки, план виконання роботи та приклад дослідження сонячної панелі, теоретичні відомості та список рекомендованої літератури.

Дану лабораторні роботу рекомендовано проводити під час вивчення теми «Електричній струм у напівпровідниках» учнями 11 класів, так як саме тоді вони вивчають p-n-перехід.

Робота складається з двох етапів: дослідження вольт-амперних та люкс-вольтних характеристик сонячної панелі при видимому світлі та при світлі, що пройшло крізь світлофільтри. Однак, другий етап роботи рекомендується проводити лише у добре затемненому приміщенні.

ВИСНОВКИ

Визначені фізичні механізми роботи та основні характеристики фотовольтаїчних елементів.

Фотоелектрична сонячна енергія є чистим, відновлюваним джерелом енергії. Зараз стало дуже розповсюджено розміщувати сонячні панелі у якості невеликих генераторів для власного споживання або використовувати великі фотоелектричні установки.

Сонячні панелі являють собою сукупність фотоелектричних комірок, з'єднаних послідовно. Фотовольтаїчні технології базуються на використанні напівпровідників (частіше кремнієвих) p- та n-типу, які розміщені поруч.

Робота всіх сонячних елементів, незалежно від їх типу, характеризується напругою холостого ходу, струмом короткого замикання, коефіцієнтом заповнення, коефіцієнтом корисної дії та спектральною чутливістю.

Сонячні елементи повинні мати низьку ціну, високу ефективність, тривалий термін служби, відсутність обмежень постачання матеріалів та перспективи подальшого зниження витрат. Технологія сонячних елементів все ще не бездоганна, але вона має декілька шляхів подальшого розвитку. Вони спрямовані на підвищення вартості та терміну служби фотоелементів, що є важливим для досягнення конкурентоспроможності.

Лабораторно досліджено вольт-амперні та люкс-вольтні характеристики фотоелементів (PET Solar Panel FYD-022 та садового ліхтаря SBF-107) при опроміненні їх видимим світлом, та світлом, що пройшло крізь світлофільтри.

Вольт-амперні характеристики фотоелементів, що досліджувалися, виявилися лінійними на діапазонах напруг та струмів, при яких відбувалося дослідження, тобто мали низький коефіцієнт заповнення.

Люкс-вольтні характеристики фотоелементів мають нелінійний вигляд. Чим менше освітленість, тим стрімкіше значення напруги наближається до нуля, а зі збільшенням освітленості, напруга наближається до свого максимального значення.

Графік люкс-вольтної характеристики при видимому світлі виглядає чітко вираженим, точним, у той час, як графіки, отримані при опроміненні фотоелемента світлом з різними довжинами хвиль є менш округлені. Якщо дивитися в порядку від «теплих» довжин хвиль до «холодних» за шкалою електромагнітних хвиль, можна помітити, що чим ближче опромінення наближається до «холодної» частини спектру, тим менш вираженою стає дуга люкс-амперної характеристики.

Визначено значення напруги, яку можна отримати на фотоелементі при освітлені світлом, що пройшло крізь світлофільтри ПС-13, ЗС-1, СЗС-22, ОС-16 та ФС-6. Чим «тепліше» світло за шкалою електромагнітних хвиль потрапляє на фотоелемент, тим більше значення напруги ми отримуємо. Виняток – ультрафіолетове випромінювання.

На основі отриманих результатів дослідження було розроблено методичні рекомендації до лабораторної роботи на тему: «Фотовольтаїчні перетворювачі» задля можливості їх впровадження в розвиток STEM-освіти учнів старшої школи для отримання ними більш технічно складних навичок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Galagan Y., Giacomo D., Gorter H. Roll-to-roll slot die coated perovskite for efficient flexible solar cells // Advanced Energy Materials. 218AD. Vol. 8, № 32. P. 180–193.

2. Golla E. Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI. Florida : CRC Press, 2014. 264 p.

3. Green M. A. Solar cell fill factors : General graph and empirical expressions // Solid-State Electronics. 1981, №24. P. 788-789.

4. Jain A. Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2004, № 81(2). P. 106-110.

5. Kittel. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. New Jersey : John Wiley and Sons, 680.

6. Marti A., Luque A. Next Generation Photovoltaics. Boca Raton : CRC Press, 2003. 136 p.

7. Philipps S., Warmuth W. Photovoltaics report // Fraunhofer ISE. 2017. Vol. 15. P. 1–43.

8. Piano L., Mayumi S. Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic systems for electricity generation // Applied Energy. 2017. Vol. 186, № 2. P. 167–174.

9. Rashid H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. New York : Pearson, 2009. 880 p.

10. Vítězslav B. PV cells and modules – State of the art, limits and trends // Heliyon. 2020. Vol. 6, № 12.

11. Weller P. An analogy for elementary band theory concepts in solids // J. Chem. Edu. 1967. Vol. 44, № 7. P. 391.

12. Wolfgang P. Solar Power For The World: What You Wanted To Know About Photovoltaics. 1st ed. New York : Jenny Stanford Publishing, 2013. 800 p.

13. Yang W. J., Ma Z. Q., Tang X., Feng C. B., Zhao W. G., Shi P. P. Internal quantum efficiency for solar cells // ELSEVIER. 2008, №82(2). P. 106-110.

14. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. : Наука, 1989. 310 с.

15. Брауэр Г. Руководство по неорганическому синтезу. М. : Мир, 1985. Т. 3. 392 с.

16. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц Э.Я. Кремний и жизнь. Биохимия, токсикология и фармакология соединений кремния. 2-е изд. Рига : Зинатне, 1978. 588 с.

17. Горюнова Н.А. Органические полупроводники. 2-е изд. Москва : Букинист, 1968. 268 с.

18. Миличко В. А., Шалин А. С., Мухин И. С., ковров А. Э., Красилин А. А., Виноградов А. А., Белов П. А., Симовский К. А. Солнечная фотовольтаика : современное состояние и тенденции развития // Успехи физических наук. 2016, № 186(8). С. 801-852.

19. Миловзоров Д. Тонкоплёночный нанокристалический кремний // Нано-индустрия. 2010. Т. 111, № 3. С. 52–60.

20. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела. Москва : Высшая школа, 2000. 494 с.

21. Физика соединений AIIBVI / ed. Георгобиани А.Н., Шейнкмана М.К. Москва : Наука, 1986. 319 с.

22. Шульц М.М., Мазурин О.В. Современное представление о строении стёкол и их свойствах. Ленинград : Наука, 1988. 197 с.