

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Вплив оптичного випромінювання на вихідні характеристики сонячних елементів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПм-18

Вдовіченко К.В

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро- та нано системна техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та нано електронні прилади і пристрої»

Керівник Доц., к фіз-мат. наук. Фролова Т.І

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 153 «Мікро- та наносистемна техніка» _____

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ І.М.Бондаренко

« _____ » _____ 2019р.

**ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Вдовіченко Костянтину Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Вплив оптичного випромінювання на вихідні характеристики сонячних елементів _____

затверджена наказом по університету від 04 листопада 2019р. № 1636ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 12.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи кілька штучних джерел випромінювання, які мають спектральну характеристику в діапазоні довжин хвиль від 200-1100 нм

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі ВАХ сонячної панелі при різних відстанях від джерел випромінювання
вплив складу спектра джерел світла на електричну потужність;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (16 слайдів) комп'ютерна презентація 16 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання вихідних даних до роботи	08.09-15.09	
2	Аналіз літературних джерел	16.09-25.10	
3	Розробка експериментального стенду	26.10-1.11	
4	Проведення експериментальної частини	02.11-05.11	
5	Аналіз експерименту	06.11-08.11	
6	Розрахунок енергетичних характеристик	09.11-12.11	
7	Оформлення атестаційної роботи	13.11-20.11	
8	Оформлення графічного матеріалу	21.11-23.11	
9	Проходження нормо контролю	24.11	
10	Перевірка на плагіат	25.11-29.11	
11	Отримання рецензії	30.11-02.12	
12	Захист	18.12	

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

Вдовіченко К.В

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Фролова Т.І
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 57 сторінки 30 рисунка, 7 таблиць, 22 джерел, 3 додатки

ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ІМІТАТОРИ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, КРЕМНІЙ, СПЕКТР.

Існуючі на даному етапі розвитку електронних пристроїв сонячні панелі на основі комірок елементів мають ряд технічних недоліків, зокрема низький ККД при слабкому освітленні поверхні. Для вивчення впливу освітленості слід з'ясувати, яким чином впливає спектр на ВАХ сонячного елемента. Метою дослідження є вплив спектра випромінювання на ВАХ сонячного елемента та панелі з елементів. Об'єктом дослідження ВАХ і спектральні характеристики сонячної панелі. Предметом дослідження розглянуто вплив спектра на ВАХ сонячної панелі.

Методами дослідження використовувалися – експериментальний метод, в ході якого була проведена порівняльна характеристика різних типів випромінювань на поверхню сонячного елемента. В ході експериментальних досліджень, ми визначили спектр різних типів випромінювачів світла, а так само провели порівняльну характеристику з прямим сонячним світлом. Були проведені вимірювання ВАХ сонячного елемента, з використанням різних джерел штучного освітлення, що містять різний спектр. Проведена залежність потужності сонячного елемента від напруги при освітленості різними типами джерела штучного освітлення.

При аналізі отриманих в ході експерименту даних, визначено, що зміна спектра штучного освітлення значно впливає на характеристичні криві сонячного елемента. Вивчивши спектральні характеристики випромінювачів, визначено, що для максимального ККД перетворення підходить світлодіодна лампа повного спектру.

ABSTRACT

A 57 page explanatory note contains 30 figures, 7 tables, 22 references.

OPTICAL RADIATION, SUNNY ELEMENT, SOLAR EMITATORS, SILICON, SPECTRUM.

At this stage of development of electronic devices, solar panels based on cell cells have a number of technical disadvantages, including low efficiency in low surface illumination. In order to study the effect of illumination, it is necessary to find out how the spectrum affects the solar cell's CVC. The purpose of the study is the effect of the radiation spectrum on the solar cell and the panel of the elements. The object of the study is the VAC and the spectral characteristics of the solar panel. The subject of the study considered the effect of the spectrum on the CVC solar panel.

Research methods were used - the experimental method, during which a comparative characterization of different types of radiation on the surface of the solar cell was carried out. In the course of the experimental studies, we determined the spectrum of different types of light emitters, as well as performed a comparative characteristic with direct sunlight. The measurements of the CVC of the solar cell were carried out using different artificial light sources containing different spectra. The dependence of the solar cell power on the voltage at illumination by different types of artificial light source is performed.

In the analysis of the data obtained during the experiment, it is determined that the change in the spectrum of artificial light significantly affects the characteristic curves of the solar cell. Having studied the spectral characteristics of the emitters, it is determined that a full spectrum LED lamp is suitable for maximum conversion efficiency.

ЗМІСТ

1 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ. ТЕОРІЯ І ПРИНЦИП РОБОТИ	11
1.1 Сонячна енергетика в світі	11
1.2 Заснування та історія застосування сонячних елементів	14
1.3 Шляхи удосконалення сонячних панелей	19
1.3.1 Новітні матеріали та технологічні процеси створення сонячних панелей	19
1.3.2 Типи структур сонячних панелей та технології їх виготовлення	20
1.4 Імітатори сонячного випромінювання для тестування сонячних панелей	26
1.4.1 Штучні джерела оптичного випромінювання для ICB	28
1.5. Світлодіоди. Світлодіодні лампи і світлодіодні збірки та їх спектральні характеристики.	31
1.6 Перспективи застосування сонячних панелей	35
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	38
2.1 Постановка задачі.....	38
2.2 Вимірювання спектральних характеристик за допомогою спектрометра	42
2.3 ВАХ сонячної панелі при різних відстанях від джерел випромінювання	46
2.4 Розрахунок енергетичних характеристик випромінювання	50
2.5 Розподіл фотонів в діапазоні довжин хвиль	51
ВИСНОВКИ.....	54

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	56
ДОДАТОК А. ВІДОМІСТЬ АТЕСТАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ	58
ДОДАТОК Б. ПРЕЗЕНТАЦІЯ	58
ДОДАТОК В. ТЕЗИ ДОПОВІДІ З МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ФІЗИЧНІ ЯВИЩА В ТВЕРДИХ ТІЛАХ»	67

ПЕРЕЛІКУМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГК – газовокварцеві;

ІСВ – імітатор сонячного випромінювання;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЛР – лампа розжарювання.

СБ – сонячна батарея.

ВСТУП

При виборі вихідного матеріалу для сонячних панелей в першу чергу необхідно враховувати ширину забороненої зони напівпровідника, яка обумовлює максимальну питому потужність. Саме сонячні панелі на основі комірок елементів, які виготовляються з монокристалічного і полікристалічного кремнію, вирощений методом витягування через фільєру профільовані стрічки кремнію, дендритні кремнієві стрічки, арсенід галію – складають 90% усього виробництва, мають ряд технічних недоліків, зокрема низький ККД (17%) при слабкому освітленні поверхні [1]. Для вивчення впливу освітленості слід з'ясувати, яким чином впливає спектр на вольтамперні характеристики (ВАХ) сонячного елемента. Для правильної роботи сонячної комірки, при її створенні, необхідно проведення практичних випробувань і вимірювання електричних характеристик. На виробництві, для тестування сонячних елементів використовують імітатори сонячного випромінювання (ICB). Існують різні класи ICB (класи А, В і С) [2]. Такі пристрої використовують еталонні штучні джерела випромінювання світла, що мають наближений розподіл світлової енергії до сонячного спектру. Також такі джерела освітлення можуть бути використані в похмурі дні, коли природного освітлення недостатньо, для регенерації додаткової електроенергії в зовнішню електромережу.

В роботі аналізуються вихідні оптичні характеристики різних джерел спектру, порівняно до характеристик наземного спектру Сонця. Проведено вимірювання ВАХ сонячного елемента при різних умовах штучного освітлення (потужності вихідного оптичного випромінювання, відстань та кут падіння світової хвилі) та знайдена її залежність від вихідних параметрів різних джерел штучного світла.

При аналізі отриманих в ході експерименту даних, буде визначено, як зміна спектра штучного освітлення впливає на характеристичні криві сонячного елемента. Проаналізувавши спектральні характеристики оптичних випромінювачів, також буде знайдено, які джерела оптичного випромінювання найбільш задовольняють для

використання в ІСВ, та для регенерації додаткової електроенергії. Буде розглянуто класифікацію ІСВ за потужністю та методом утворення випромінювання (газорозрядні, лампи розжарювання, сірчані лампи, світлодіоди на основі р-п переходу). Під час дослідження, буде визначено вплив спектра штучного освітлення на електричну потужність сонячного елемента і доведено залежність відстані штучного освітлювача від сонячного елемента до електричної потужності. Основним фактором електричної потужності сонячного елемента виступає саме спектральний склад випромінювання штучного освітлення, тому що кремній має область чутливості в діапазоні хвиль 349-849нм.

1 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ. ТЕОРІЯ І ПРИНЦИП РОБОТИ

1.1 Сонячна енергетика в світі

Сонячна енергетика – сучасний і найбільш успішний екологічно чистий варіант видобутку енергії, який може успішно конкурувати з більш звичними видами отримання енергії і тепла – тепло електростанціями, які використовують в якості палива – корисні копалини нашої планети. Сонячна енергія є невичерпним ресурсом, так як обсяг енергії, отриманої від сонця за 22 дня сонячної активності рівноцінний усім запасам органічного палива на землі.

За останнє десятиліття в сонячній енергетиці було встановлено більше потужностей, ніж у будь-якого іншого джерела енергії. Ці висновки містяться в звіті Bloomberg NEF і Програми Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища (ЮНЕП).

Всього за 10 років у всьому світі було встановлено 638 ГВт установок фотоелектричної енергії. В кінці 2009 року загальна потужність сонячних електростанцій становила 25 ГВт. Загальний обсяг інвестицій в сонячну енергетику за останні десять років дослідники оцінили в \$ 1,3 трлн. - це половина витрат на відновлювальну енергетику, виключаючи великі гідроелектростанції. При цьому вартість сонячних технологій за 2009–2019 рр. впала на 81% – з \$ 304 до \$ 57 за МВт * год.

Компанія WoodMackenzie [1] опублікувала звіт про стан відновлюваної електроенергетики в Китаї, зазначивши в ньому рубіжний момент: вперше енергія ВДЕ в середньому по країні стала дешевше, ніж електрика, отримане за рахунок спалювання газу. До 2026 році чистий енергія стане доступнішим і найдешевшого і брудного варіанта - вугільних ТЕС. Як зазначає Greentechmedia, падіння цін на ВДЕ

критично важливо для розвитку галузі в Китаї напередодні скасування пільг для проектів ВДЕ в 2021 році.

Вартість вироблення WoodMackenzie[1] оцінювала за показником нормованої вартості електроенергії – levelized cost of electricity (LCOE). Найдешевше мегават-годину отримати за рахунок спалювання вугілля – \$ 50. Найдорожче – за рахунок морської вітрової установки – \$ 116. Однак середня премія за використання чистої енергії становить близько 20%. У Шанхаї і Цинхай ціни на ВДЕ і вугілля вже вирівнялися, а по всій країні це станеться до 2026 року. У найвідсталіших районах за ВДЕ доводиться зараз платити на 70% більше.

Ще один важливий тренд – помітне падіння вартості енергії сонця; в цьому році в Китаї вона вперше стала нижче, ніж від вітрових турбін. На початку серпня була пройдена і ще одна відмітка - сонячна енергія стала дешевше, ніж середня ціна по мережі. Тобто проекти в цій сфері стали рентабельними без будь-яких застережень. При цьому 25 років тому в країні взагалі не було сонячних станцій, а тепер Китай – лідер за потужностями з мінімум дворазовим відривом від переслідувачів.

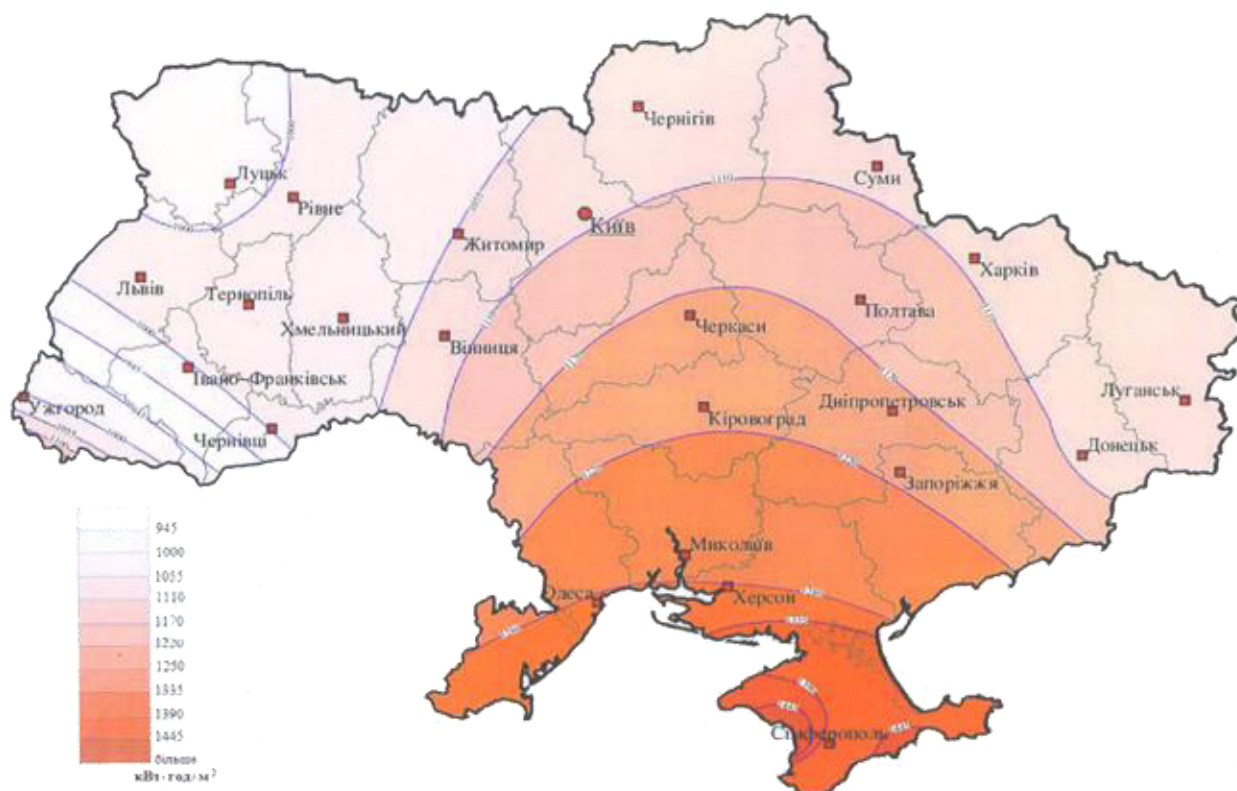
Річна кількість сонячного випромінювання на території України, варіюється від 1 070 кВт·год/м. кв. на півночі, та 1 400 кВт·год/м. в південних регіонах країни [2].

Максимальний ККД сонячних перетворювачів енергії можливо отримати лише у семи місяцях на рік. У випадку українського клімату, серед перетворювачів енергії слід використовувати саме фотоелектричні комірки та панелі. Великий запас сировини та великі потужності виробництва, високий рівень якості – дозволяє покрити потреби у обладнанні та тритину продукції відпускати на експорт.

На 01.10.19 року в Україні діяло 198 сонячних станцій загальною встановленою потужністю 1450 МВт, якими у 2019 році вироблено 985 млн. кВт*год електричної енергії[3].

Беручи до уваги досвід з впровадження сонячних електростанцій (далі – СЕС) в європейських країнах зі схожим рівнем сонячного випромінювання, а також з огляду на світові тенденції постійного зниження собівартості будівництва СЕС

внаслідок розвитку технологій, в Україні за рахунок вдосконалення технології та введення в експлуатацію нових потужностей виробництва електроенергії СЕС може бути значно збільшено [3]. В Україні є чотири зони по кількості випромінювання сонячної радіації (рис. 1.1).



Розподіл питомої сумарної сонячної радіації на території України протягом року
(Національний атлас України. – К.: ДНВП «Картографія», 2007)

Рисунок 1.1 – Розподіл сонячної активності по площі України

Досвід країн ЄС та північної Америки свідчить, що сонячна енергія може використовуватись в промисловому масштабі навіть вночі. В Іспанії і США є підприємства, що в темний час доби генерують електроенергію з тепла накопиченого в день.

Станції, що працюють на сонячній енергії (геліостанції), взагалі безшумні. Істотний недолік полягає у тому, що такі станції займають великі площі. Кожен 1 МВт потужності СЕС потребує відведення щонайменше 1,5 га землі. Мінусом також є те, що вихід енергії – непостійний. На СЕС сьогодні припадає близько 4%

виробленої електроенергії з відновлювальних джерел енергії у світі. Перетворення сонячної енергії в електричну відбувається в основному за рахунок використання фотоелектричних елементів.

За допомогою енергії Сонця можна частково забезпечити електроенергією мешканців приватного сектору, (паралельно з роботою електричної мережі). Для цього використовуються фотоелектричні елементи, які розташовуються на даху будинку.

У приватних будинках для вироблення тепла в системі гарячого водопостачання можна застосовувати сонячні колектори (СК). Сонячні колектори здатні нагрівати воду до 70°C . Вдень СК перетворює енергію Сонця в теплову, яка гріє воду, що накопичується в теплоізованих ємностях (баках-акумуляторах). Із баків-акумуляторів вода подається в систему гарячого водопостачання. СК встановлюються на даху будинку, а накопичувальна ємність та допоміжне обладнання монтуються в технічному приміщенні.

Для правильної роботи сонячної комірки, при її створенні, потребується проведення польових випробувань і зняття характеристик. На виробництві, при створенні сонячних елементів використовують імітатори сонячного випромінювання (ICB).

Такі пристрої допомагають в проведенні експериментів з різними матеріалами при створенні фотоелементів, використовуються в якості еталонного джерела випромінювання світла і можуть бути використані в якості джерела освітлення сонячних панелей в похмурі дні, коли природного освітлення недостатньо.

1.2 Заснування та історія застосування сонячних елементів

Пряме перетворення сонячної енергії в електричну може бути здійснено з використанням фотоелектричного ефекту. Елементи, які виготовлені зі спеціального напівпровідникового матеріалу, наприклад кремнію, при прямому сонячному опроміненні виявляють різницю потенціалів на поверхні, тобто наявність електричного струму.

На початку 1960-х рр. були створені перші сонячні фотоелементи з р-п переходом на основі арсеніду галію. Ці фотоелементи поступалися по ефективності кремнієвим, але були здатні працювати навіть при незначному нагріванні.

Перше практичне застосування вдосконалених сонячних батарей на основі арсеніду галію для енергетичних цілей було пов'язано із забезпеченням електропостачання радянських космічних апаратів, що працюють в околицях планети Венери, а також самохідних апаратів «Луноход-1» і «Луноход-2», які досліджували поверхню Місяця (1970 і 1972 роки).

Надалі, на увазі реальної користі і перспективність напрямку сонячної енергетики у вигляді прямого перетворення, були вивчені і розглянуті на практиці сонячні елементи на основі гетероструктур AlGaAs-GaAs .

В результаті був досягнутий різкий стрибок в ефективності фотоелектричного перетворення в кремнієвих фотоелементах. Пізніше з'явилися різні типи механічно зі стикованих двокаскадних сонячних елементів, більш ефективні, ніж фотоелементи з одним р-п переходом. Зараз в стадії практичного використання знаходяться трьох каскадні фотоелементи, але досвід їх використання дозволяє сподіватися на досягнення високих значень ККД в структурах з чотирма, п'ятьма, а може бути і більше каскадами [4].

Перші спроби використання сонячної енергії на комерційній основі відносяться до 80-х років XX століття. У Каліфорнії в 1994р. введено 480 МВт електричної потужності, причому вартість 1 кВт / год енергії – 7-8 центів [4].

У фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії використовується кремній з добавками інших елементів, що утворюють структуру з р-п-переходом. Схема роботи напівпровідникового кремнієвого фотоелемента досить проста: в р-шарі напівпровідника створюється "діркова" (позитивна) провідність, а в n-шарі - електронна (негативна). На кордоні шарів виникає потенційний бар'єр, що перешкоджає переміщенню носіїв (електронів і «дірок») з одного шару в інший (в такому стаціонарному стані струм не тече по всьому напівпровіднику) (рисунок 1.2). Коли ж на фотоелемент падає світло (потік фотонів), фотони, поглинаючись, створюють пари електрон-"дірка", які, підходячи до кордону шарів, знижують

потенційний бар'єр, даючи можливість носіям безперешкодно проходити з шару в шар. У напівпровіднику виникає наведена електрорушійна сила (ЕРС), і він стає джерелом електричного струму. Величина фото-ЕРС буде тим більше, чим інтенсивніше світловий потік[5].

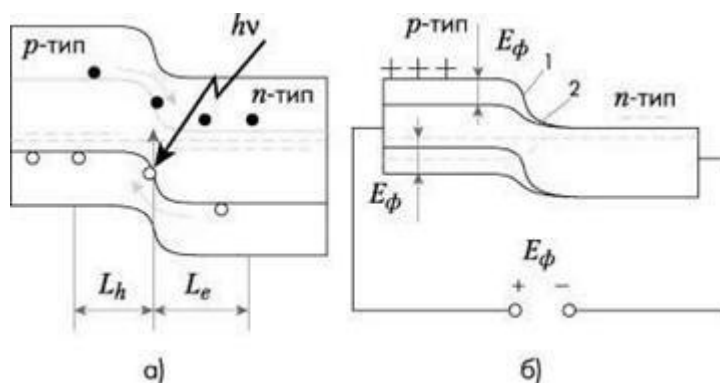


Рисунок 1.2 – Зонна модель розімкнутому р-п-переходу

де а) - в початковий момент освітлення;

б) - зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото ЕРС.

Величина сталої фотоЕРС при висвітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ) (рисунок 1.3):



Рисунок 1.3 – Вольт-амперна характеристика сонячного елементу

Ефективність сучасних кремнієвих (а також на основі арсеніду галію) фотоелементів досить висока (їх ККД досягає 10-20%), а чим вище ККД, тим менше необхідна площа сонячних панелей, яка навіть в малій енергетиці становить десятки квадратних метрів. Великим досягненням напівпровідникової промисловості стала розробка кремнієвих фотоелементів, що володіють ККД до 40%. Останній важливий напрямок у розвитку сонячної енергетики – створення більш дешевих і зручних фотоперетворювачів: стрічкових полікристалічних кремнієвих панелей, тонких плівок аморфного кремнію, а також інших напівпровідникових матеріалів. Самим високоефективним з них виявився алюміній-галій-миш'як, його промислова розробка тільки починається [5].

Завдяки стійкості до високих температур арсенід-галієві панелі дозволяють застосовувати до них концентратори сонячного випромінювання. Робоча температура панелі на GaAs доходить до 180°C, що вже є цілком робочими температурами і для теплових двигунів, паротурбінного. Тому загальний ККД установки, яка до того ж використовує і третій цикл відбору низькотемпературного тепла у охолоджуючої рідини після турбіни на обігрів приміщень – може бути навіть вище 50-60% (рис.1.4).

Середнє значення ККД(рис.1.5) у сонячних панелях на монокристалічному кремнії сьогодні близько 21%, хоча досягає і 35% [5]. Саме, в основному, кремнієві сонячні батареї можна бачити сьогодні на дахах будинків різних країн світу.

Схема подключения солнечных панелей и бытовой нагрузки

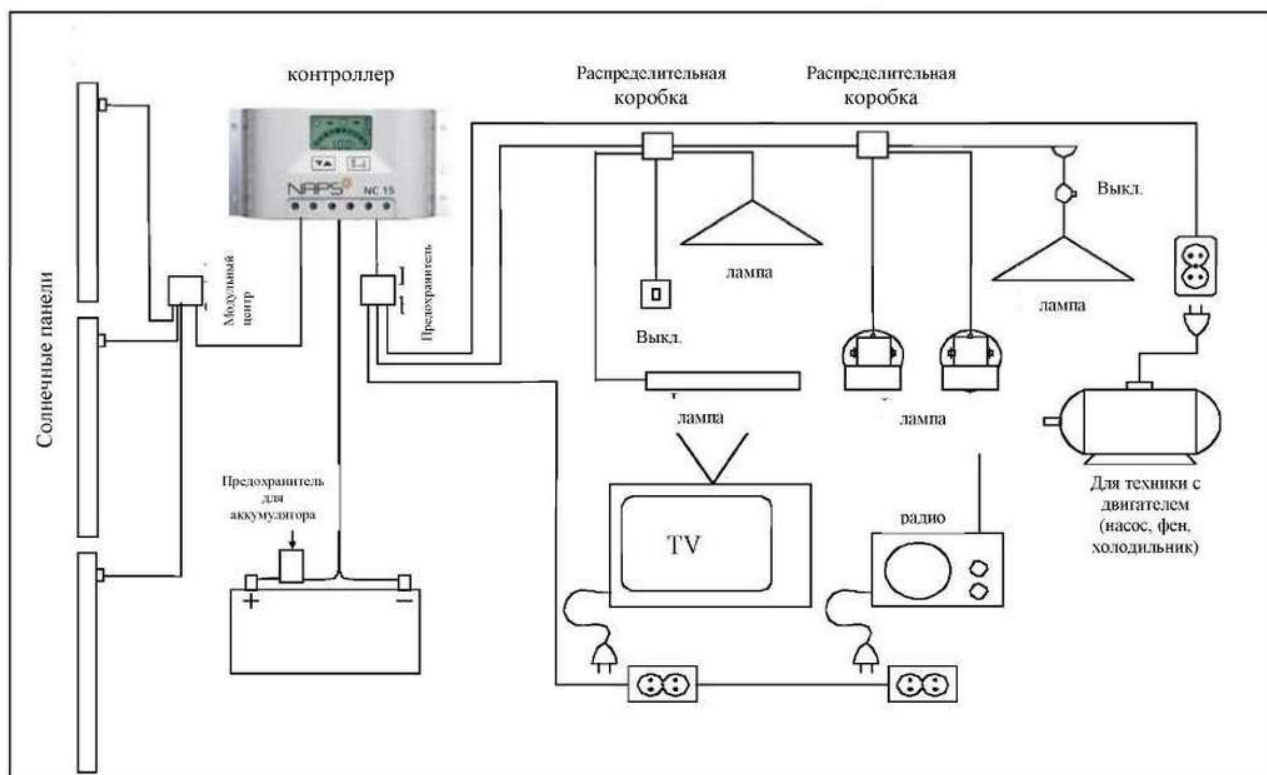


Рисунок 1.4— Сонячні панелі в будинках

Поодинокі панелі не можуть забезпечити нормальної потужності, тому вони в певних кількостях з'єднуються в загальну сонячну батарею. Чим більше фотоелементів задіяно в системі, тим вище буде потужність видається електроенергії.

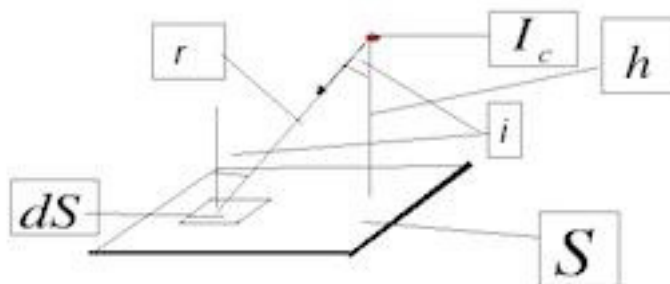


Рисунок 1.5 – ККД сонячних панелей

1.3 Шляхи удосконалення сонячних панелей

1.3.1 Новітні матеріали та технологічні процеси створення сонячних панелей

Двосторонні сонячні батареї – зручне рішення. Вони можуть досягти підвищення потужності на 25% і зниження витрат на 20% [6].

Canadian Solar вважає, що її ринкова перша двостороння панель може підвищити ефективність з 18,3% до 23,8% при правильних умовах.

Новий клас матеріалів, які називаються перовскит, може в один прекрасний день забезпечити людство дешевими панелями з високим ККД. Дослідники вважають, що ефективність сонячної енергії в 30% є цілком досяжною метою. Якщо вони виявляться дешевими і простими у виготовленні, як очікувалося, то сонячні елементи третього покоління можуть привести до значного зниження вартості сонячної енергії.

На жаль, перовскит – матеріали який все ще складно зробити комерційною реальністю. Залишається одна серйозна перешкода: матеріали досить швидко руйнуються. Це може привести до різких втрат потужності протягом короткого періоду часу для сонячного модуля, тим самим перекреслюючи інші переваги. Проте є способи обійти це, наприклад, поєднуючи перовскіту з кремнієм. Стартап під назвою Oxford PV недавно представив таку тандемну осередок з ефективністю 27,3%. Якщо він виявиться успішним і комерційно життєздатним під час тестування в 2019 році, то сонячна енергія третього покоління може бути ближче до реальності, ніж припускають інвестори. Більш розгорнуто цю тему розглянуто у підрозділі 1.3.2.

Матеріали з використанням квантових точок набагато далі від комерціалізації, ніж перовскіту. Але обіцяють буквально революцію. Квантові точки – наночастинки напівпровідникових матеріалів, а напівпровідники - основа обчислювальної техніки і сонячних елементів. Вони крихітні - всього кілька нанометрів в діаметрі, що в тисячі разів менше товщини людської волосини. Ці нанонапівпровідники досить малі, щоб їх можна було налаштувати відповідно до сонячним спектром. Це означає,

що сонячні елементи з квантовими точками мають теоретичну межу ефективності в 70,4% в порівнянні з 32% для односкладних кремнієвих елементів.

Квантові точки пропонують унікальну перевагу: вони можуть генерувати електрику навіть вночі. Це пов'язано з тим, що вони можуть бути налаштовані на інфрачервоні довжини хвиль на додаток до видимих довжинах хвиль світла, хоча виробництво електрики і невелике. Далі будуть розглянуті менш сучасні але актуальні принципи та технології виготовлення панелей.

1.3.2 Типи структур сонячних панелей та технології їх виготовлення

Плівкові панелі –це наступний крок розвитку джерел живлення на сонячній енергії. Крок, який продиктований в першу чергу необхідністю зниження цін на виробництво батарей і прагненням до підвищення енергоефективності.

Кадмій – це матеріал, який володіє високим рівнем світлопоглинання, Відкритий як матеріал для сонячних батарей в 70-х роках. На сьогоднішній день, цей матеріал застосовується вже не тільки в космосі, на навколоземній орбіті, а й активно використовується в якості матеріалу для сонячних панелей звичайного, домашнього користування [6]. Найголовнішою проблемою у використанні такого матеріалу є його отруйність. Однак дослідження говорять про те, що рівень кадмію, який йде в атмосферу, занадто малий, щоб завдавати шкоди здоров'ю людини. Також, незважаючи на низький ККД в районі 10%, варто одиниця потужності в таких батареях менше, ніж у аналогів. Тип сонячних батарей з таких матеріалів використовують мідь, індій, селен, як напівпровідник. До речі, індій - це основний, дуже необхідний матеріал, який використовується у виробництві рідкокристалічних моніторів. Тому, залишаючи такий матеріал для цих цілей, часто використовують галій, який заміщає індій за своїми функціями (рис.1.6). ККД тут вище, ніж у батарей з телуриду кадмію - близько 20%.

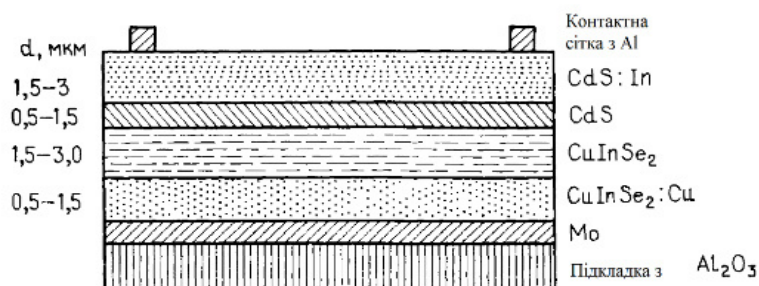


Рисунок 1.6 – Схема конструкції тонкоплівкових сонячних елементів на основі CuInSe_2 з змінним рівнем легування

Полімерні сонячні панелі, не так давно були винайдені. Тут провідниками виступають поліфенілен, фурилени, фталоціанин міді. При цьому така плівка дуже тонка - близько 100 нм. Незважаючи на низький рівень ККД, близько 5%, все ж можна виділити причини, чому варто обирати цей тип сонячних панелей. Доступність матеріалів, дешевизна, відсутність шкідливих викидів в атмосферу. Так що такі батареї відмінно підходять споживачам, адже мають відмінну еластичність і екологічність (рис 1.7).

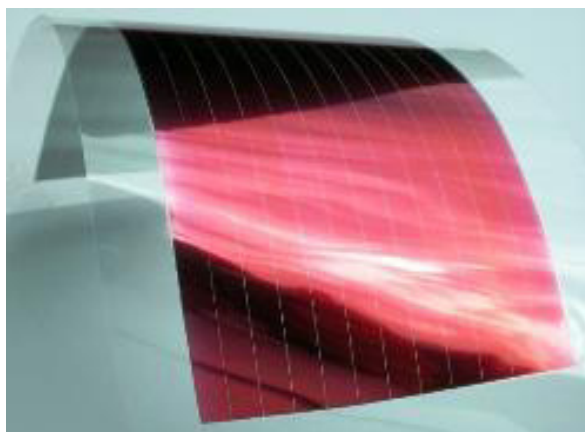


Рисунок 1.7 – Полімерні сонячні панелі

Фотосенсибілізувальний барвник знову-таки допомагає оптимізувати прийом сонячної енергії, Але при цьому сонячні панелі працюють за цим принципом,

швидше нагадують процес фотосинтезу в природі (рисунок 7). Ці розумні панелі розробляються GreenSun Energy, новим енергетичним підприємством, розташованим в Тель-Авіві. Нові сонячні панелі вживають на 80% менше кремнію, ніж Традиційні сонячні батареї. Коли прямі або косі сонячні промені потрапляють на панель, вони поширюються на всі боки, а наночастинки металів направляють і концентрують сонячні промені на зовнішніх краях, там, де знаходиться кремній. На сьогоднішній день GreenSun досягла рівня 12% ефективності панелей і може виробляти їх по \$ 2,10 за Ватт - це виходить дешевше у порівнянні з \$ 4,54 за Ватт для звичайних панелей. Таке зниження вартості обумовлено тим, що в панелях використовується набагато менше кремнію. Крім того, в звичайних елементах є деяка втрата ефективності через тепло, якої не може бути перетворено в енергію. У панелях від GreenSun сонячне світло розсіюється по всій панелі, а наночастинки доправляють сонячні промені певної частини спектра на зовнішні краї, де відбувається перетворення в електрику, тим Самим зменшуючи втрати ефективності через тепло.

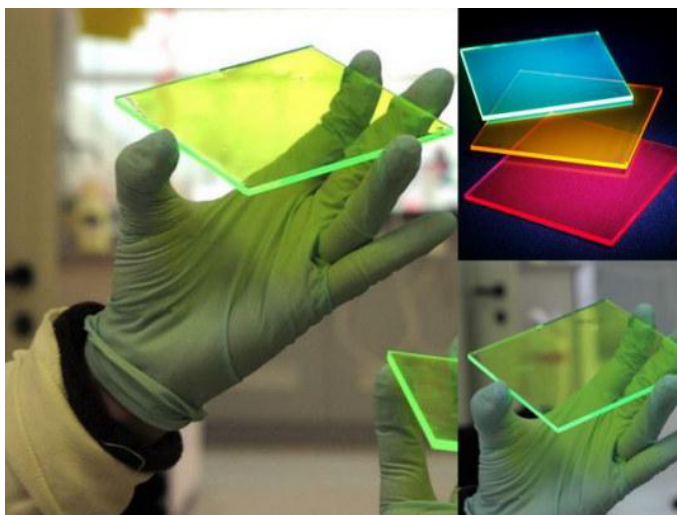


Рисунок 1.8 – Фотосенсибілізуючий барвник на панелях від GreenSun

Коли новий матеріал, що з'явився в 2010 році, за вісім років збільшив продуктивність з 3.8% до 22.7%, це вийшло за рамки наукових досліджень і привернуло велику цікавість ринку [7].

Йдеться про Перовскит - природному мінералі, в достатку присутнім в земній корі. Перовскітні фотоелектричні комірки можна створювати з включенням різних матеріалів з відповідною кристалічною структурою, яка забезпечує їх напівпровідникові властивості. Іноді їх називають гібридними перовскітовими елементами, тому що вони мають кращі характеристики різних фотоелектричних елементів [7]. У традиційній технології кремній плавиться в високотемпературній печі, нарізається ідеально рівними пластинами і складається в фотоелектричні панелі. Перовскит же можна наносити як чорнило, тобто на його виробництво йде набагато менше енергії. Перовскит м'якше кремнію і його можна наносити на гнучкі плівки, які, в свою чергу, можна кріпити на поверхню електронних приладів, машин і навіть на одяг. В теорії максимальна продуктивність перовскита може досягати 33%, і з нинішніми темпами розвитку технології такого результату можна досягти протягом найближчих десяти років [7]. Головною проблемою у використанні перовскита в сонячній енергетиці є нестабільність – його кристалічна структура легко руйнується, особливо під дією кисню і вологи. У перших досліджах життєвий цикл перовскита вимірювався годинами, але за минулі роки її вдалося збільшити до шести тижнів. Очевидним напрямом поліпшення технології є захист матеріалу від впливу повітря. Додатковий бар'єр на шляху поширення перовскитів може носити економічний характер. Ринок сонячних батарей налаштовувався на використання кремнієвих фотоелектричних систем, і налагодження його механізмів роботи і прибутковості тривала вже більше 30 років. Пряма конкуренція з традиційними сонячними панелями також може не принести очікуваних результатів. У той же час, багатообіцяючим може стати застосування перовскита в поєднанні з іншими сонячними елементами, шляхом створення багатошарових осередків. У таких пристроях кожен шар відповідає за перетворення в електрику світла певної хвилі. Так звані «тандемні» сонячні елементи вже показали ефективність вище 40% - вдвічі більше, ніж у традиційних сонячних панелей, які доступні сьогодні на ринку

(рис.1.8). Вчені вважають, що перовскит - одна з небагатьох технологій, здатних перебудувати нашу енергетичну систему з нуля. В даний час частка сонячної енергії становить всього близько 2 % в глобальній енергетичній виробленні. Щоб значно збільшити її використання буде потрібно величезні кількості дешевих сонячних батарей і безліч нових, крім традиційних СЕС, місць для їх розміщення.

З технологією, така як перовскитна, наші будівлі, дороги і транспортні засоби можуть збирати значну частину цієї сонячної енергії. На думку дослідників, в майбутньому людству доведеться відмовитися від звичної енергетичної інфраструктури з її великими виробниками і централізованими мережами. На зміну їй може прийти так званий «енергетичний інтернет» – демократизована, децентралізована електрична система, в якій кожен зможе незалежно виробляти, використовувати і торгувати відновлюваною енергією. І такі приклади вже є [7].

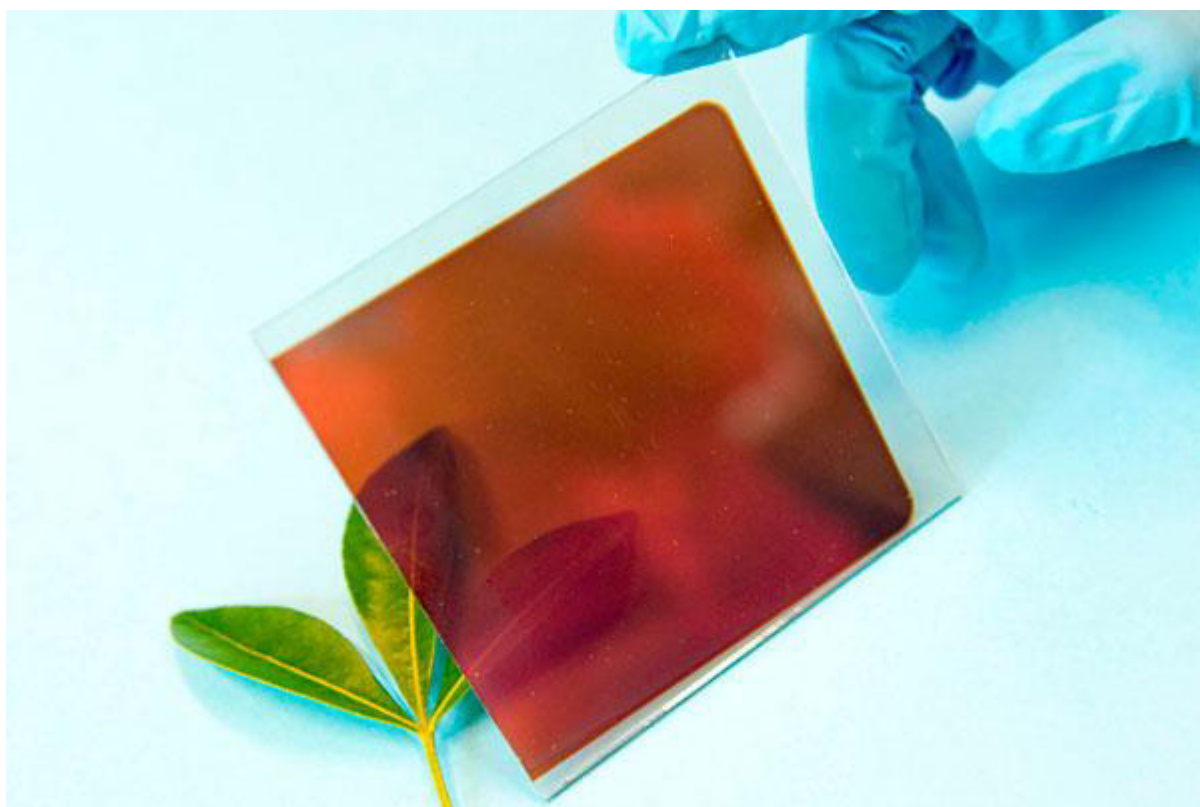


Рисунок 1.9 – сонячні елементи на основі матеріалу перовскит

Концентраційні модулі допомагають більш ефективно використовувати площу сонячних панелей, отримуючи економію площі майже в два рази (рис.1.9). Основу концентраторів сонячного випромінювання в пропонованих до виробництва складають лінзи Френеля, виготовлені з силікону - найбільш стабільного і стійкого до зовнішніх впливів полімерного матеріалу. Для концентрації сонячного випромінювання масив з лінз Френеля об'єднується в лінзову панель на аркуші з силікатного скла. Найвідомішою великою компанією, яка спробувала масштабно впровадити лінзові сонячні панелі, стала компанія SolFocus. У 2006 році їм вдалося розробити компактні лінзові сонячні панелі. На їх створення використовувалося набагато менше кремнію, ніж на звичайні панелі, так як вони використовували лінзи і дзеркала, щоб сконцентрувати сонячне світло. Такі концентратори сонячного світла збільшували сонячну енергію в 500 разів, і таким чином вони нарощували продуктивність фотоелементів. Що в той час скорочувало витрати на виробництво сонячної енергії практично на 40%

Однак така система ускладнена необхідністю інсталяції механічного модуля, який би повертав лінзи в сторону сонця. Особливо такі установки необхідні в інших місцях, де пряме випромінювання сонця є в достатку протягом усього року.



Рисунок1.10 – Концентраційні сонячні модулі

Наостанок, порівняємо ККД кожного типу сонячних батарей, але крім ККД є багато інших факторів, які можуть охарактеризувати кожен тип як з хорошою, так і поганої сторони (таблиця. 1.1).

Таблиця 1.1 – ККД сонячних елементів у відсотках

ККД	у відсотках
монокристалічні	17-22%
полікристалічні	12-18%
аморфні	5-6%
телурид кадмію	10-12%
Селенід міді-індію	15-20%
полімерні	5-6%

1.4 Імітатори сонячного випромінювання для тестування сонячних панелей

На виробництві існує необхідність тестування пристроїв за допомогою імітаторів сонячного випромінювання.

Для вимірювання параметрів сонячних елементів і панелей повинні використовуватися імітатори сонячного випромінювання. ІСВ повинні максимально повторити всі параметри сонячного випромінювання, такі як щільність потоку, спектральний склад, паралельність променів, стабільність в часі і рівномірність освітлення. Однак реалізація таких приладів надзвичайно складна, дорога і енергоємна, вимагає кваліфікованого обслуговування, тому в залежності від певного призначення створюються спеціалізовані імітатори. В установках, призначених для вимірювання характеристик сонячних елементів і панелей, менше уваги приділяється досягненню колімації пучка і більше – створення гарного наближення до спектру випромінювання Сонця, забезпечення стабільності і однорідності потоку. Велика частина сонячних елементів має чутливість в досить вузькому діапазоні спектра (наприклад, в разі кремнієвих сонячних елементів – від 400 нм до 1200нм) в

порівнянні з інтервалом довжин хвиль позаатмосферних сонячного випромінювання (200Нм – 2500нм). Використання існуючих типів імітаторів для вимірювання параметрів сонячних елементів дещо обмежено значною тимчасовою і спектральною нестабільністю потоку випромінювання імітатора. Крім високої якості відтворення спектра, найважливішою якістю імітатора для випробувань сонячних елементів є однорідність потоку. Рівномірності освітлення елементів домагаються шляхом змішування пучків променів різними способами. У зв'язку з цим, на практиці при створенні ІСВ знаходять розумний компроміс між точністю відтворення основних параметрів і вартістю установки. Основними елементами ІСВ є джерело випромінювання і колімуючи система, яка призначена для формування потоку випромінювання з неросхідними променями. Така система може включати в себе заломлюючі, що відображають і поглинають елементи. Ці елементи можуть застосовуватися в різних поєднаннях між собою, а також поєднуватися з різними джерелами випромінювання.

ІСВ–імітатори сонячного випромінювання можуть бути використані в якості еталонного джерела випромінювання при проектуванні та налаштування фотоелектричних елементів і сонячних панелей а так же випробувань на стійкою до світлових і спектральним впливів лакофарбових покриттів, компонентів електронних пристроїв і устаткування. Джерела штучного світлового випромінювання зі спектром близьким до сонячного можуть бути використані в якості освітлювачів в теплицях, для вирощування рослин. У дні, коли сонячного світла недостатньо, ІСВ здатні компенсувати недолік сонячного світла. Так само при використанні ІСВ з фотоелектричними елементами і сонячними батареями можливо домогтися часткової регенерації електричної енергії витраченої на освітлення рослин в теплицях.

У нескладних ІСВ для імітації сонячного випромінювання в дослідницьких і технологічних цілях при випробуваннях панелей використовують лампи розжарювання (ЗК) і кварцові галогенні (КГ), спектр яких знаходиться в зоні спектральної чутливості ФЕ $\lambda = 0.4 \dots 1.1$ мкм.



Рисунок 1.11 – ІСВ на кварцево галогенній лампі

Для високоякісних ІСІ, які використовуються в прецизійних вимірах параметрів ФЕ, застосовують ксенонові. Найбільше використання є ксенонові (ДКсШ), які мають схожі спектральні характеристики, але з через високий вміст області інфрачервоного спектра, в їх роботі потрібне застосування світлових фільтрів, для відсікання яка не використовується частині спектра [8]. ІСІ даних типів можуть бути використаними при вивченні та розробці сонячних панелей використання котрих призначено у космічному просторі, на супутниках зв'язку та тощо. Для досліджень в сфері енергетики, налагодження обладнання на станціях, в ході випробувань обладнання космічної галузі - слід використовувати ІСІ з високими характеристиками потужності. Такими характеристиками володіє сірчані лампи, газорозрядні. Такі ІСІ здатні максимально повторити умови реального сонячного освітлення.

1.4.1 Штучні джерела оптичного випромінювання для ІСВ

Як показує практика, ксенонові лампи є найбільш часто використовуваними при імітуванні сонячного випромінювання. Більшість імітаторів в якості джерела випромінювання використовують дугові ксенонові лампи або імпульсні ксенонові лампи. Ця обставина викликано тим, що спектральний склад випромінюваного світла ксенонових ламп близький до сонячного. Експериментальними дослідженнями механізмів фотозабарвлення покриттів з наповнювачами з неорганічних пігментів доведено, що на їх перебіг основний вплив має «жорстка»

частина ультрафіолетового випромінювання в світловому пучку. У цій спектральній області кращим імітатором спектра Сонця є ксенонова лампа. Розбіжність спектрів Сонця і лампи в довгохвильовій області ($\geq 400\text{nm}$) несуттєві в зв'язку з її слабкою фотоактивністю. Імпульсні ксенонові лампи, використовувані в ІСВ, не вимагають спектральних фільтрів (спектр регулюється за допомогою сили струму джерела випромінювання). При вимірах на імпульсних імітаторах через короткої тривалості імпульсу (близько 1мс) сонячна панель не встигає прогрітися, і її температура близька до кімнатної. В деяких ІСВ використовують металогалогенні дугові лампи, які є різновидом дугових газорозрядних ламп. За рахунок додавання до інертних газів невеликої кількості парів металу і галогенідів деяких металів можливе досягнення дуже точного відповідності сонячного спектру (рис.1.10). Виробник стверджує, що таке джерело випромінювання також має більш високою стабільністю і терміном служби в порівнянні з ксеноновими джерелами випромінювання. Лампи розжарювання, які використовуються в ІСІ в області «жорсткого» ультрафіолету неефективні і навряд чи становлять конкуренцію газорозрядним і дуговим джерелам світла. За допомогою світлофільтрів досягається досить хороше відтворення спектра ламп розжарювання в інтервалі 400-1100нм, однак при цьому самі світлофільтри поглинають значну частину енергії випромінювання лампи, що вимагає майже десятикратного перевищення вихідного потоку випромінювання над імітованим і інтенсивного охолодження світлофільтрів. Такі лампи не можуть використовуватися для створення спектра позаатмосферного сонця.

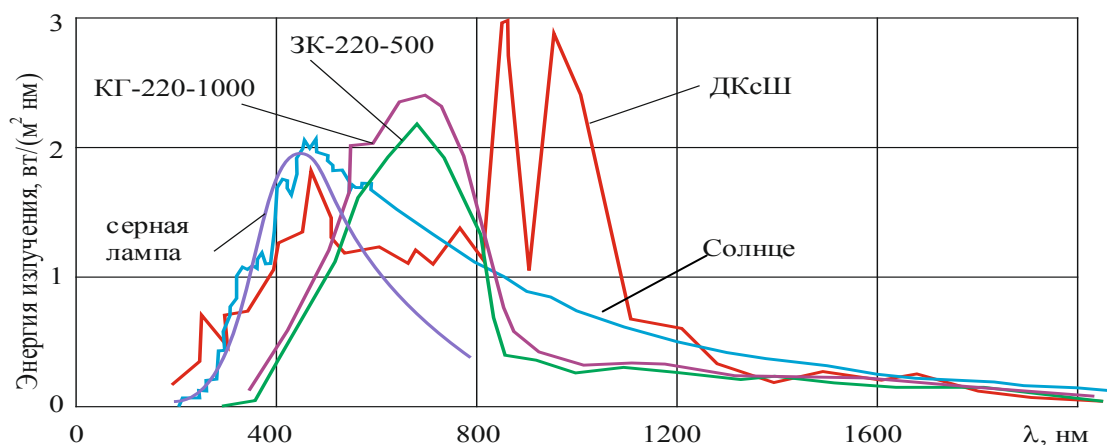


Рисунок 1.10 – Спектральний склад випромінювання сонця і джерел випромінювання для ІСІ

Так як всі представлені вище джерела випромінювання володіють великими матеріальними витратами і трудомістким і складним процесом виготовлення, були запропоновані ІСВ на основі напівпровідникових світлодіодів. ІСВ цього типу здатні працювати в діапазоні спектра сонячного випромінювання (рис. 1.10).

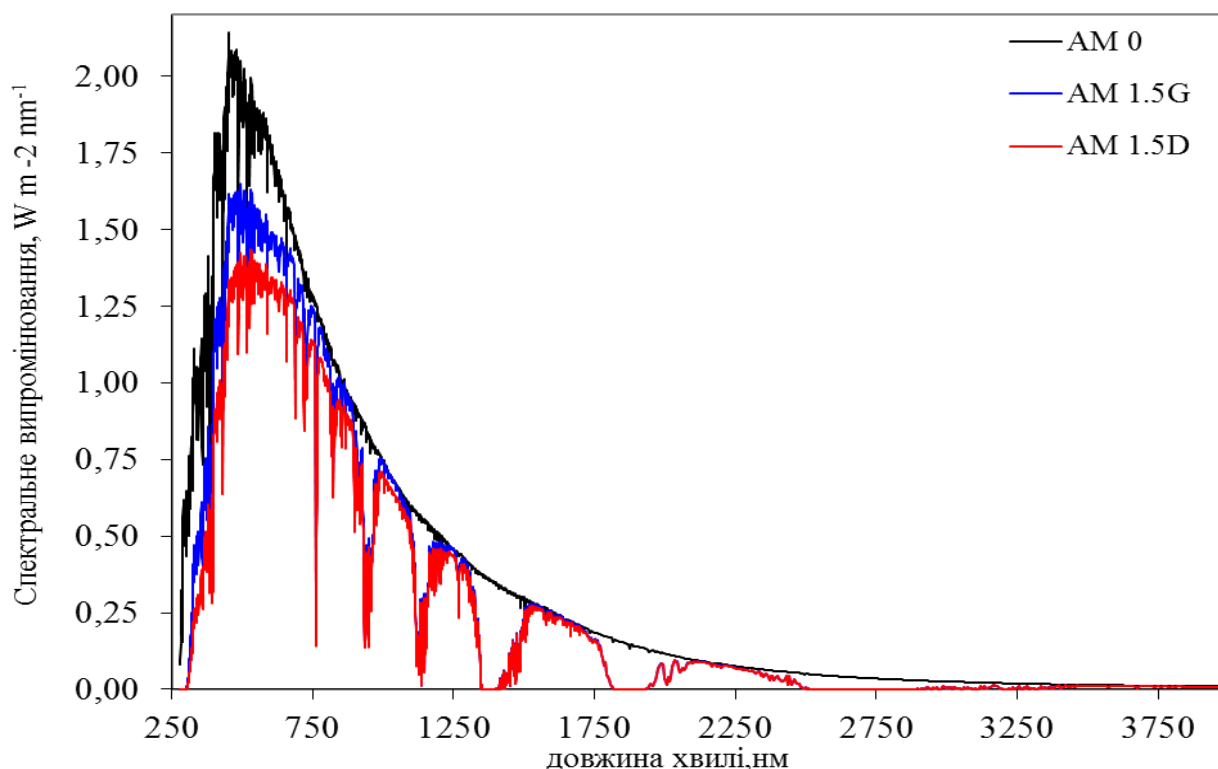


Рисунок 1.11 – Спектр сонця в залежності від проміжку виміру

Основною перевагою світлодіодів повного спектру як ІСВ малої потужності є низьке енергоспоживання, високий ККД, довга тривалість роботи.

ІСВ повинні володіти максимально схожими спектральними характеристиками схожими на природне сонячне освітлення. Володіти стабільним випромінюванням, спектральним складом і щільністю потоку.

Відомі прилади на основі ксенонових, галогенних і сірчаних ламп дуже дорогі у виробництві і обслуговуванні, завдяки тому в ході роботи будуть розглянуті ІСІ на основі світлодіодних збірок [9].

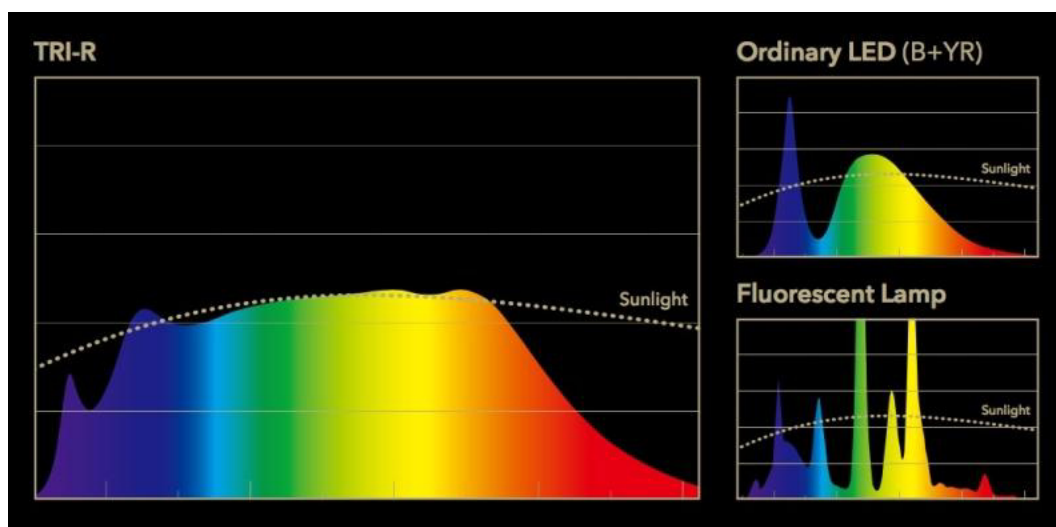


Рисунок 1.12 – Спектральний склад ІСВ на основі світлодіода повного спектру

1.5 Світлодіоди. Світлодіодні лампи і світлодіодні збірки та їх спектральні характеристики

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад з електронно-дірковий р-n переходом, який продукує оптичне випромінювання, коли через нього проходить електричний струм. В основі роботи Led світлодіода лежить р-n-перехід, так званий електронно-дірковий перехід. Робота світлодіода побудована на взаємодії двох напівпровідників р-типу і n-типу. Р-positive, тобто позитивний тип, або дірковий. N-

negative, тобто негативний тип, або електронний. В результаті пропускання електричного струму в місці зіткнення двох напівпровідників відбувається перехід від одного типу провідності до іншого.

Коли через напівпровідники проходить електричний струм, негативний заряд електронів з'єднуються з іонами позитивно заряджених дірок. У цей момент виділяється енергія, і ми бачимо випромінювання світла. Сучасні світлодіоди бувають всіх кольорів веселки: червоні, оранжеві, жовті, зелені, сині, білі. Світіння, яке випромінює світлодіод при підключенні його до електричного струму, залежить не від колірної забарвлення корпусу. Він залежить від матеріалу, який використовується при виробництві напівпровідника. Так, наприклад, домішки алюмінію, індію, гелію, фосфору викликають світіння від червоного до жовтого кольору. Азот, галій, індій надають випромінюється світла кольору від зеленого до блакитного. Щоб домогтися білого світіння в кристал додають люмінофор, використовуваний для виробництва люмінесцентних ламп.

Спектр випромінювання світлодіода визначається шириною забороненої зони використовуваного напівпровідникового матеріалу, типом легуючих домішок, рівнем легування і механізмом випромінювальної рекомбінації. Як зазначалося вище, основними матеріалами для виготовлення ефективних світлодіодів є бінарні напівпровідникові сполуки і їх тверді розчини.

Найбільшою ефективністю володіють світлодіоди на основі арсеніду галію GaAs з шириною забороненої зони $\Delta E = 1,45 \text{ eV}$. Отже, максимум спектральної характеристики випромінювання власне GaAs спостерігається на довжині хвилі $\lambda_{\text{max}} = 1,24 / 1,4 = 0,9 \text{ мкм}$, що відповідає інфрачервоної області. При легуванні GaAs різними домішками (телур, селен, літій і ін.), Що мають різні глибини залягання в забороненій зоні, світлодіоди можуть випромінювати в діапазоні $\lambda_{\text{max}} = 0,9 \dots 0,96 \text{ мкм}$. Світлодіоди на GaAs мають найбільш високу квантову ефективність ($\eta_{\text{внеш}} = 10 \dots 30\%$ в залежності від конструкції). Важливо, що спектр випромінювання GaAs -світлодіодів дуже добре відповідає спектру фоточутливості найбільш поширених Si-фотодіодів.

Світлодіоди на більш довгохвильову область виготовляються на основі прямозоні твердих розчинів $\text{Ga}_{x\text{In}_{1-x}}\text{As}$ і $\text{Ga}_{x\text{In}_{1-x}}\text{AsI}$. Для них переважною є квазімежзонна випромінювальна рекомбінація.

Важливо, що максимум спектра випромінювання таких світлодіодів задається складом твердого розчину. Змінюючи x і y , можна виготовити світлодіод на задану область спектра, наприклад, збігається з мінімумом втрат в оптичному волокні або з максимумом спектра поглинання якої-небудь речовини, концентрацію якого належить контролювати. Світлодіоди на область спектра $\lambda > 5$ мкм можуть бути виготовлені на основі халькогенідів свинцю.

Фосфід галію (GaP) має ширину забороненої зони $\Delta E = 2,25$ eV, що визначає довжину хвилі випромінювання $\lambda_{\text{max}} = 0,56$ мкм. Це відповідає зеленому кольору світіння. При легуванні домішками (N, O₂, Zn) такі світлодіоди можуть випромінювати червоний, жовтий, зелений світло. Таким чином, GaP світлодіоди призначені для роботи у видимій частині спектру. Для GaP - $\eta_{\text{внєш}} = 7 \dots 0,7\%$.

Світло випромінюючі діоди на короткохвильову область видимого спектру, що працюють в блакитному, синьому і фіолетовому діапазонах (рисунк 12), можуть бути створені на основі нітриду галію GaN і гетеропереходов з використанням твердих розчинів $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ і $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (рисунк 13). Світлодіоди на основі GaN дають випромінювання $\lambda_{\text{max}} = 0,44$ мкм, але з дуже низькою ефективністю 0,5%.

Для цієї ж мети застосовують карбід кремнію SiC. Хоча діоди на основі SiC мають малий 0,01%, але мають високу тимчасової і температурною стабільністю. На їх основі створюють еталонні джерела випромінювання.

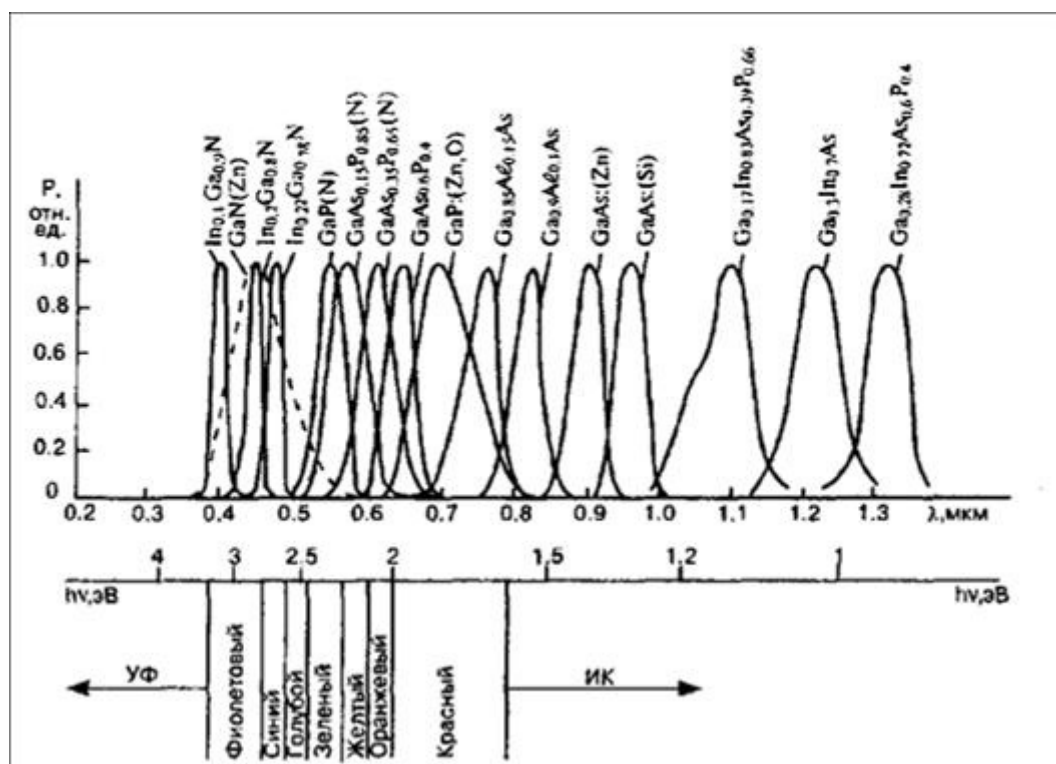


Рисунок 1.13 – Спектр світлодіодної лампи в залежності від домішок

Над яскравий світлодіод повного спектра з драйвером (фіто-світлодіод), виготовлений за сучасною технологією COB ("Чіп на платі" або Chip-on-Board), має високий світловим потоком і енергоефективністю, що дозволить його використовувати до 50 000 годин безперервної роботи. Основною перевагою LED-збірок є можливість їх експлуатації без такого додаткового обладнання як драйвер, тому як він вже вбудований в світлодіодну плату.

Фіто світлодіод – це новітня система ідеального світіння для тепличних, кімнатних рослин. Крім того, це відмінний варіант в освітленні палюдаріумов і рослинних акваріумів, якщо не брати в розрахунок створюваний червоний відтінок підводного ландшафту. Розширений світлодіодний спектр в одному чіпі для поліпшення росту рослин, не світить в одному спектрі, забезпечуючи спектр подібно сонячному світлу, з переважанням червоного і синього кольору, це прискорює ріст і цвітіння рослин. Сьогодні фітодіоди є революційним кроком для світлодіодів застосовуваних у вирощуванні рослин, так як раніше жоден окремий

світлодіод не був у змозі виступати в якості єдиного повноцінного джерела світла для рослин. Тільки фіто світлодіод підходить для всіх етапів вирощування рослини.

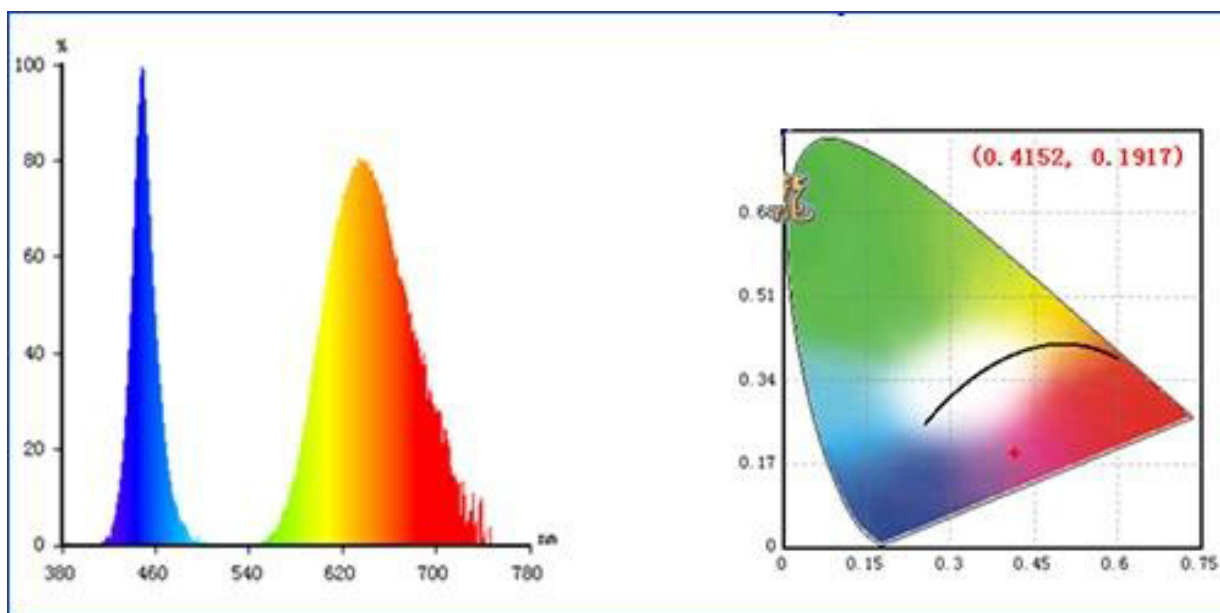


Рисунок 1.14 – Спектр світлодіодної лампи повного спектру

Завдяки своїм високим якісним характеристикам, ІСІ на основі світлодіодів повного спектру добре підходять як для проведення експериментів при створенні і налагодженні фотоелектричного обладнання, а так само підходять для освітлення рослин і використання в теплицях. Різні варіанти за кількістю комірок в матричних світлодіодних збірках дозволяють варіювати потужність в залежності від потреби. В якості експериментального ІСІ можна використовувати світлодіод повного спектра електричною потужністю до 50 Ватт, але для освітлення промислових електростанцій на фотоперетворювачах можливо використання світлодіодів сумарною матричної електричною потужністю до 3500 Ватт.

1.6 Перспективи застосування сонячних панелей

На сьогоднішній день сонячні батареї широко використовуються автономних і енергонезалежних галузей.

Застосування в теплицях або у великих приміщеннях(ангари, виробничі ділянки), де є штучних джерела світла, з характеристиками близькими до сонячних, можлива додаткова регенерація електроенергії. Якщо встановлювати сонячні панелі під штучним освітленням, можливе створення систем регенерації електричної енергії.

Зазвичай теплиці розташовують таким чином, щоб вони отримували максимум сонячного світла - так чому б їх не оснастити фотоелектричними панелями? Саме таке рішення пропонує впровадити Soliculture, що входить до складу Каліфорнійського університету в Санта-Крузі. Але інноваційні теплиці отримали додаткову особливість - їх дахове скло забарвлене в пурпурний колір. Як показали результати дослідження, це не шкодить росту рослин, навпаки, деякі культури ростуть навіть краще під кольоровим світлом.

«Розумні» теплиці використовують так звані світловідбиваючі фотогальванічні системи (WSPV). Як заявляють автори розробки, ця технологія здатна виробляти електроенергію більш ефективно і дешевше, ніж традиційні сонячні батареї.

Установка сонячних панелей на промислові тепличні комплекси для їх освітлення є широко поширеною практикою в багатьох південних і африканських країнах. В Європі сонячні панелі теж знаходять застосування, але все ж вони не настільки часто використовуються через особливості клімату.

У зв'язку з низькою ефективне перетворення сонячної енергії в теплицях, як один з варіантів установки сонячних панелей можна розглянути варіант використання сонячних панелей поряд з джерелами світла Близько по спектру до сонячних. У похмурі дні, коли сонячного освітлення недостатньо для повноцінного функціонування теплиці, обігріву а так само освітлення рослин - можна застосовувати штучні джерела світла, зі спектром близьким до сонячного. При правильному проектуванні теплиці, можна отримати ефект регенерації електричної енергії. Усе світло , витрачене на освітлення рослин, паралельно буде поглинане сонячними панелями і заново згенеровано в електричний струм.

Для визначення оптимального джерела штучного випромінювання, здатного імітувати сонячне світло, проведена робота в порівнянні характеристик різноманітних за принципом роботи джерел випромінювання, визначені спектральні характеристики, приведена порівняльна характеристика спектрів ІСВ та сонячного спектра. Обумовлено використання ІСВ в якості еталонного джерела світла при виробництві і налагодження обладнання, а так само використання ІСВ в якості освітлення сонячних панелей в похмурі дні, з можливістю регенерації сонячної енергії.

В ході роботи буде розглянуто джерело сонячного випромінювання в масштабі лабораторного стенду. Такі типи ІСВ володіють схожими спектральними характеристиками, але мають невеликий розмір, потужність і енергоспоживання.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Постановка задачі

Для проведення експериментального досліджень були обрані кілька штучних джерел оптичного випромінювання, які мають спектральну характеристику в діапазоні довжин хвиль від 200-1100 нм, так як чутливість сонячних елементів лежить в цій області.

В якості сонячного випромінювання використовувалися лампа розжарювання з дзеркальним відбивачем для фокусування променя “OSRAM R50 40W E14” (рис. 2.1, 2.2). Світлодіод повного спектра (рис.2.3) “FT-MD-COB, 5W, 220V” та світлодіодна збірка синіх та червоних світлодіодів (фітолампа) “epistar full spectrum led growlight (рис. 2.4, 2.5).



Рисунок 2.1 – Лампа розжарювання з дзеркальним відбивачем для фокусування променя “OSRAM R50 40W E14”

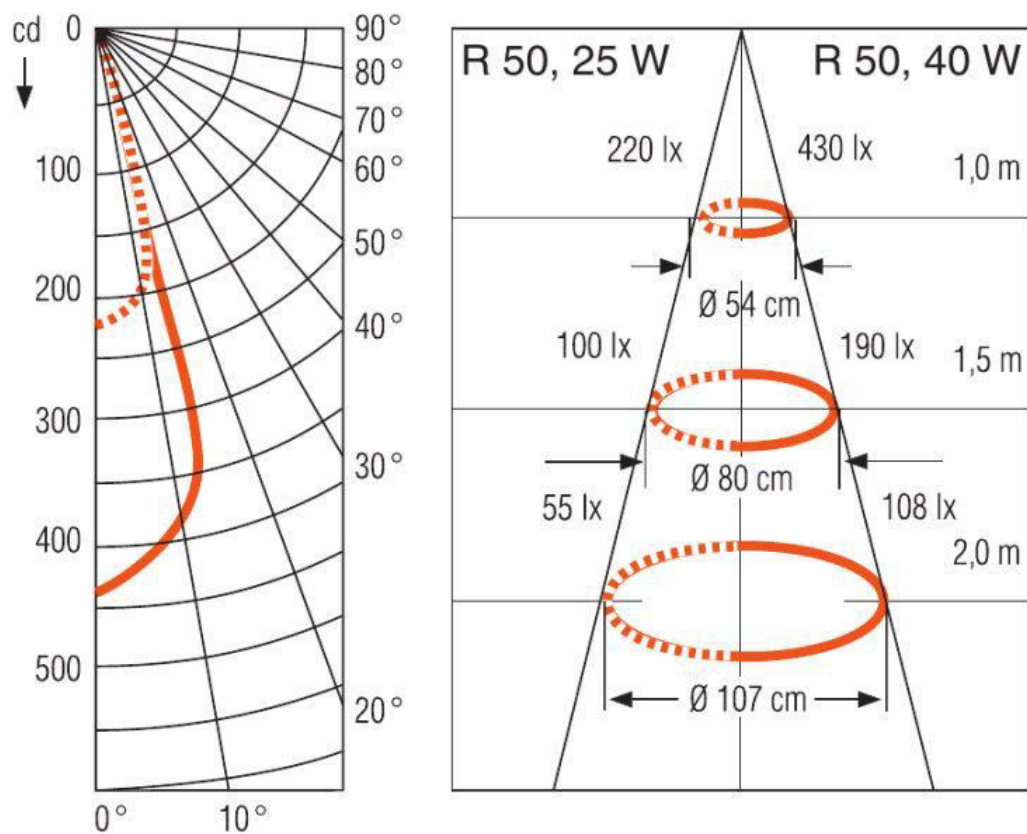
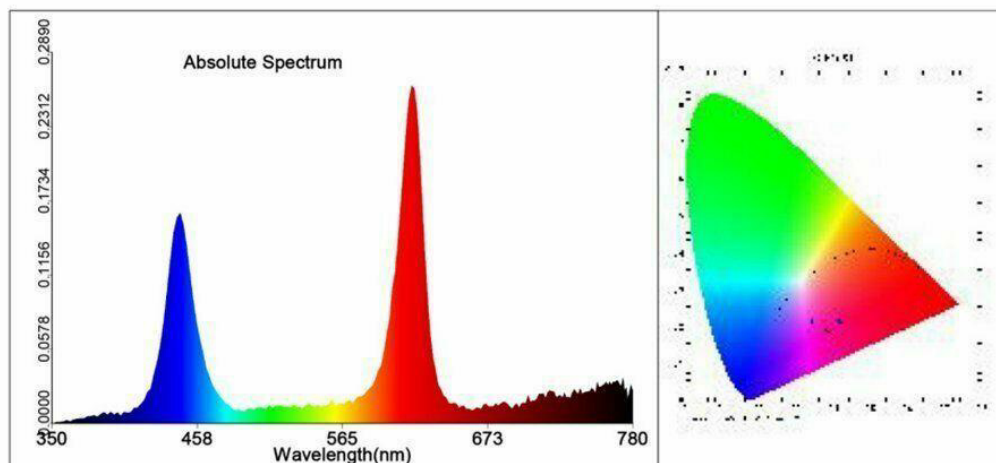


Рисунок 2.2 – Характеристика випромінювання лампи OSRAM R50 40W E14



Рисунок 2.3 – Світлодіод повного спектра FT-MD-COB, 5W, 220V

Spectrum Test Report



Test parameter:

E= 2658.6 lx	E(fc)=247.084 fc		
CIE x= 0.3796	CIE y= 0.1926	CIE u'=0.3336	CIE v'=0.3808
Tc=1719 K	Lp=629.0 nm	HW=21.9 nm	Ld=610.2 nm
Pur=44.5 %	Ratio_R=58.5 %	Ratio_G=34.4 %	Ratio_B=7.1 %
Duv=-0.10658			
Ra=18.6	R1= 29	R2= 5	R3= 2
R4= 80	R5= 2	R6=-73	R7= 23
R8= 80	R9= 32	R10=-92	R11= 49
R12=-270	R13= 5	R14= 55	R15= 32
SDCM=88.9(3500K/White)			
White Class:OUT			
E1=15.284 W/m2	E2=18.059 W/m2	PPFD=71.028 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	
Ech-A=0.65967 W/m2	Ech-B=2.3536 W/m2	Ef=2.5405 W/m2	
Eb=5.653 W/m2	Ey=1.6675 W/m2	Er=7.9684 W/m2	
Ep=13.682 Wphyto/m2	Erb_Ratio=1.4096		
PPFDf=1.1862E+001 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$			

Рисунок 2.4 – Характеристика випромінювання лампи epistar full spectrum led growlight [11]

У якості сонячних панелей були використані два типи. Полікристалічна панель з кремнію, площею $1.8 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, з робочим струмом 50 мА, і напругою 5В (панель А). Друга панель (панель Б) багат шарова, полікристалічна з кремнію, площею $5,2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ з робочим струмом 250мА і напругою 5В.

У ході експерименту, також визначимо залежність ККД панелі від її ефективної площі. Параметри для розрахунку наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики сонячних панелей застосовуваних у досліді

Назва	Площа, S, см	U _{кз} , В	U _м , В	I _{кз} , А	I _м , А	U _{хх} , В	Спектральний діапазон
Панель А	$1.8 \times 10^{-4} \text{ м}^2$	50	5,9	0,05	0,08	5	385-789 нм
Панель Б	$5.2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$	250	6,1	0,25	0,56	5	385-789 нм

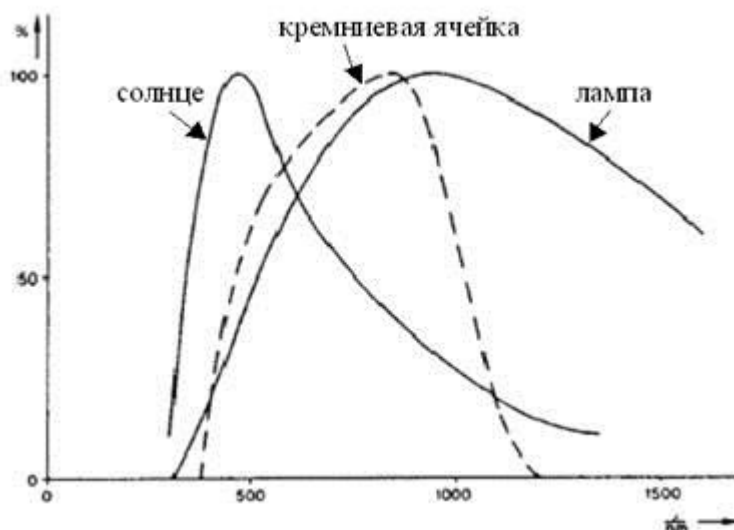


Рисунок 2.5 – Характеристики сонячних панелей застосовуваних у досліді

Дослідження впливу складу спектра штучного джерела випромінювання на характеристикні криві сонячної панелі складалось з побудови лабораторної установки, блок схема якої наведена на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Блок-схема експериментальної установки

В процесі експерименту досліджувались вольтамперні характеристики сонячних панелей і спектральні характеристики штучних джерел випромінювання та ступінь їх освітленості.

2.2 Вимірювання спектральних характеристик за допомогою спектрометра

Вимірювання спектральних характеристик джерел світла проводилося за допомогою спектрометра «LR1 – Broad spectral range spectrometer» виробництва «Aseq instrument» (Канада), який наведений на рисунку .



Рисунок 2.7 – Спектрометр LR1 – Broad spectral range spectrometer

Основні характеристики приладу для виміру спектру випромінювання наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Характеристики спектрометра LR1 – Broad spectral range spectrometer

Характеристика	Значення
Сенсор	Toshiba TCD1304AP
Діапазон детектора	200-1100нм
Кількість пікселів	3648
Розмір пікселя	8x200
Роздільна здатність	16 bit
Час відгуку на випромінювання	2,5-1000мс

Процес вимірювання був проведений для двох панелей, на трьох різних відстанях (15,30,50 см), для трьох різних джерел випромінювання, про які сказано у підрозділі 2.1. Проведення експериментальних досліджень показано на рисунку 2.8

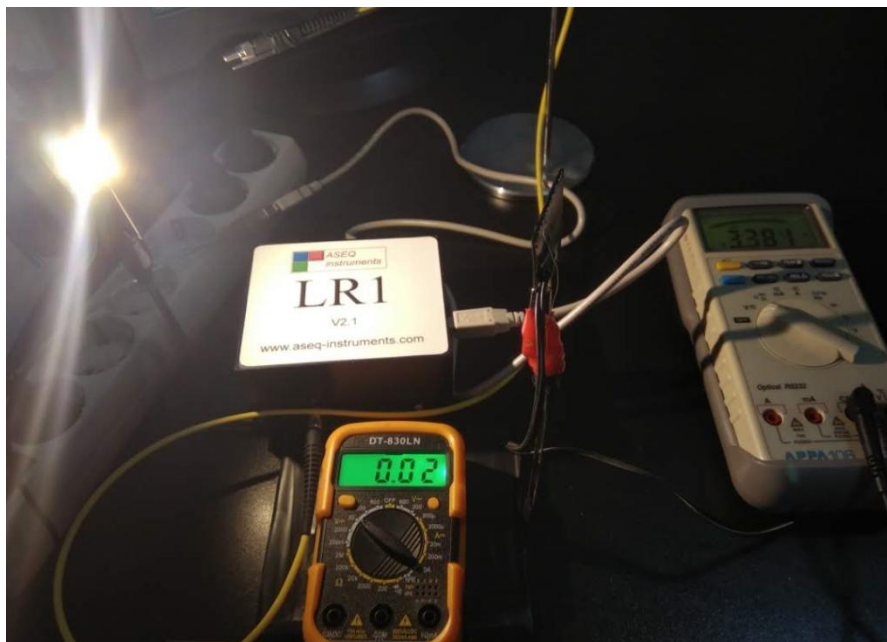


Рисунок 2.8 – Процес проведення вимірів ВАХ та спектральної характеристики

В ході роботи виміряли спектральні характеристики джерел світла. Виділено їх пікові значення спектра, а також визначені діапазони ширини спектра, який знаходиться в оптичному діапазоні (300-1000 нм).

Першим досліджуваним джерелом випромінювання була лампа розжарювання, яка має спектральну характеристику наведену на рисунку 2.9

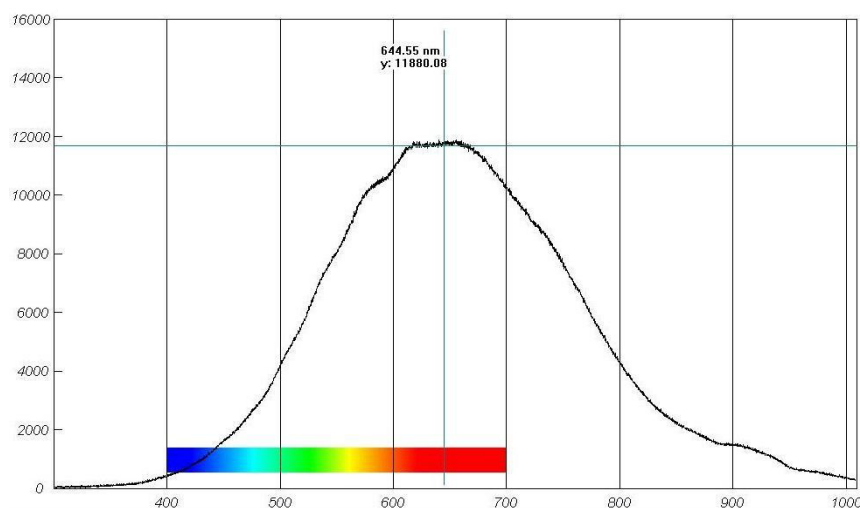


Рисунок 2.9 – Спектральна характеристика лампи розжарювання

Визначено, що в спектрі лампи розжарювання переважає помаранчевий і червоний колір, з довжиною хвилі більше 600nm. Даний тип спектра наближений до ІЧ діапазону, що тягне собою випромінювання ІЧ спектру і нагрівання поверхні сонячної батареї. Даний тип лампи має схожий спектральний склад з природним сонячним світлом, але діапазон спектра зміщений ближче до зони спектру інфрачервоного діапазону.

В спектральній характеристиці світлодіода повного спектра(рис.2.10) маємо два піки, максимальний пік спектра зміщений ближче до 570nm, що є жовтим кольором, менший пік світлодіода знаходиться в діапазоні довжин хвиль від 420nm до 480nm. У цьому діапазоні переважає синій колір. Також, можна виділити те, що практично повністю відсутнє світіння в ІЧ діапазоні.

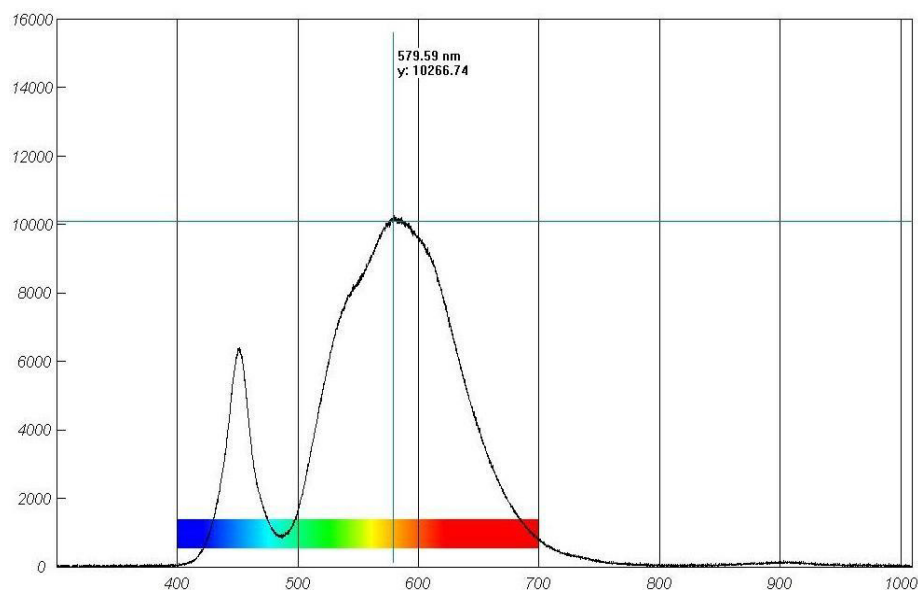


Рисунок 2.10– Спектральна характеристика світлодіода повного спектру

В світлодіодній збірці (фітолампа), створеної спеціально для освітлення рослин – є два чітко виражених спектральних піка (рис. 2.11) на довжинах хвиль 450nm і 650nm. Збірка складається з світлодіодів синього і червоного кольору світіння. У такій збірці, практично немає випромінювання на довжині хвилі 500nm – 550nm. Таке поєднання спектрального складу необхідно для створення умов застосування цього джерела світла при вирощуванні рослин в тепличних господарствах.

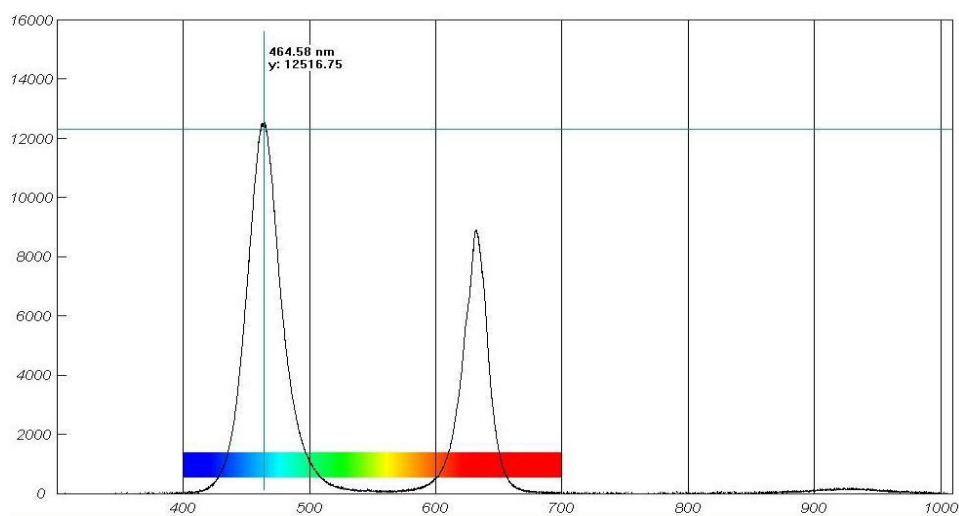


Рисунок 2.11 – Спектральна характеристика збірки світлодіодів (фіто лампа)

2.3 ВАХ сонячної панелі при різних відстанях від джерел випромінювання

Основною характеристикою сонячної панелі є її вольтамперна характеристика при різних рівнях освітленості. Для цього було виміряно рівень інтенсивності випромінювання за допомогою люксметра. В ході експерименту, були проведені вимірювання для обох панелей. Вимірювання проводились на трьох різних відстанях(15, 30, 50 см) штучного освітлення від панелі. Дані, отримані в ході вимірювань були занесені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань

Панель А				Панель Б			
Лампа розжарювання							
відстань, см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А	відстань., см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А
15	65000	5,28	0,414	15	65000	6,1	1,58
30	16500	5,04	0,21	30	16500	5,56	0,58
50	7600	4,65	0,099	50	7600	5,17	0,26
Світлодіодного спектру							
відстань., см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А	відстань., см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А
15	1600	3,38	0,04	15	1600	3,52	0,66
30	1005	2,99	0,014	30	1005	3,13	0,35
50	415	2,62	0,006	50	415	2,95	0,16
Світлодіодна збірка (фітолампа)							
відстань., см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А	відстань., см	Освітленість, люкс	Напруга., В	Струм, А
15	2300	3,21	0,1	15	2300	3,58	0,22
30	1200	2,49	0,03	30	1200	2,76	0,08
50	600	2,05	0,01	50	600	2,18	0,04

Освітленість – фізична величина, що характеризує освітлення поверхні, що створюється світловим потоком, падаючим на цю поверхню. Освітленість вимірюється в Люксах (Cl) і позначають її буквою E. 1 люкс = 1 люмен на квадратний метр. Не слід плутати освітленість з яскравістю. Яскравість - вираз кількості світла, відбитого поверхнею.

Освітленість прямо пропорційна силі світла виходить від джерела світла і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела (рис. 2.12).

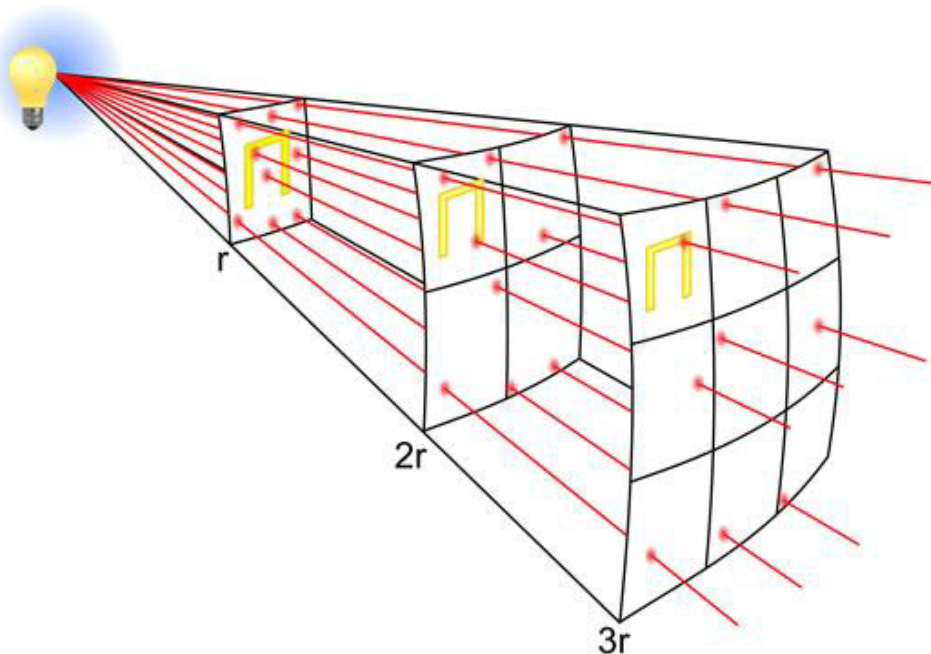


Рисунок 2.12 – схематичне зображення закону зворотних квадратів

Коли промені світла падають по дотичній до поверхні, що освітлюється, то освітленість зменшується пропорційно косинусу кута падіння променів.

Освітленість можна розрахувати за формулою:

$$E = (I \cdot \cos) / r^2 \quad (2.1)$$

де I – сила світла в канделах;

r – відстань до джерела світла;

i - кут падіння променів світла щодо нормалі до поверхні.

Кілька загальноприйнятих показників освітленості:

- літо, день під безхмарним небом – 100 000 люкс;
- вуличне освітлення – 5-30 люкс;

– повний місяць у ясну ніч – 0,25 люкс.

В результаті проведених вимірювань було визначено що в залежності від відстані наближення панелі до джерела випромінювання – освітленість, згідно закону зворотних квадратів – стає вище. Оптимальна відстань для отримання максимальних значень ВАХ є 15 см. Залежність освітленості від відстані представлена на графіках нижче (рис.2.13).

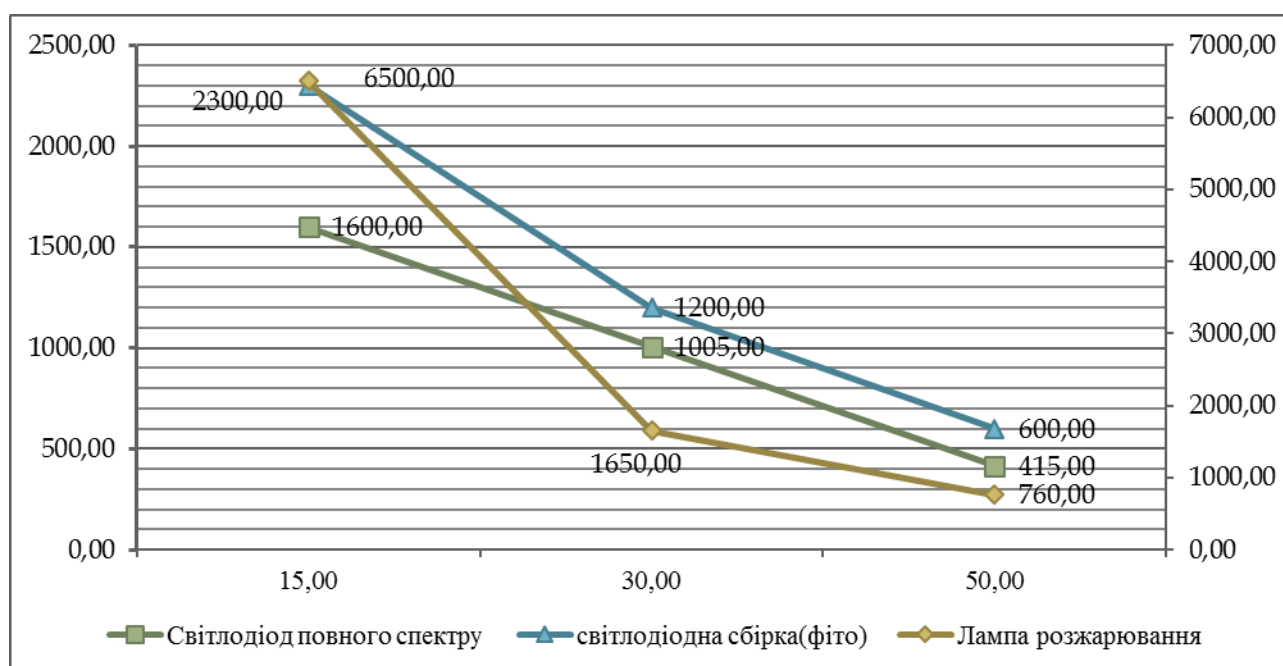


Рисунок 2.13 – Графік залежності освітленості від відстані

Також, для більшої наочності, був побудований графік залежності напруги від освітленості для панелі А і панелі Б (рис.2.14). Згідно цих графіків, зі зменшенням освітленості напруга на панелі падає. Це характеризує залежність напруги і сили струму та потужності сонячної панелі від сили світла. Чим більше світла покриває площу панелі – тим ефективніше її робота. В залежності від спектрального змісту світла – можна скорегувати корисну дію панелі, виключивши ІЧ діапазон спектру, який викликає нагрів панелі, та залишивши лише той найефективніший спектральний діапазон, який є оптимальний саме для цього матеріалу та структури панелі.

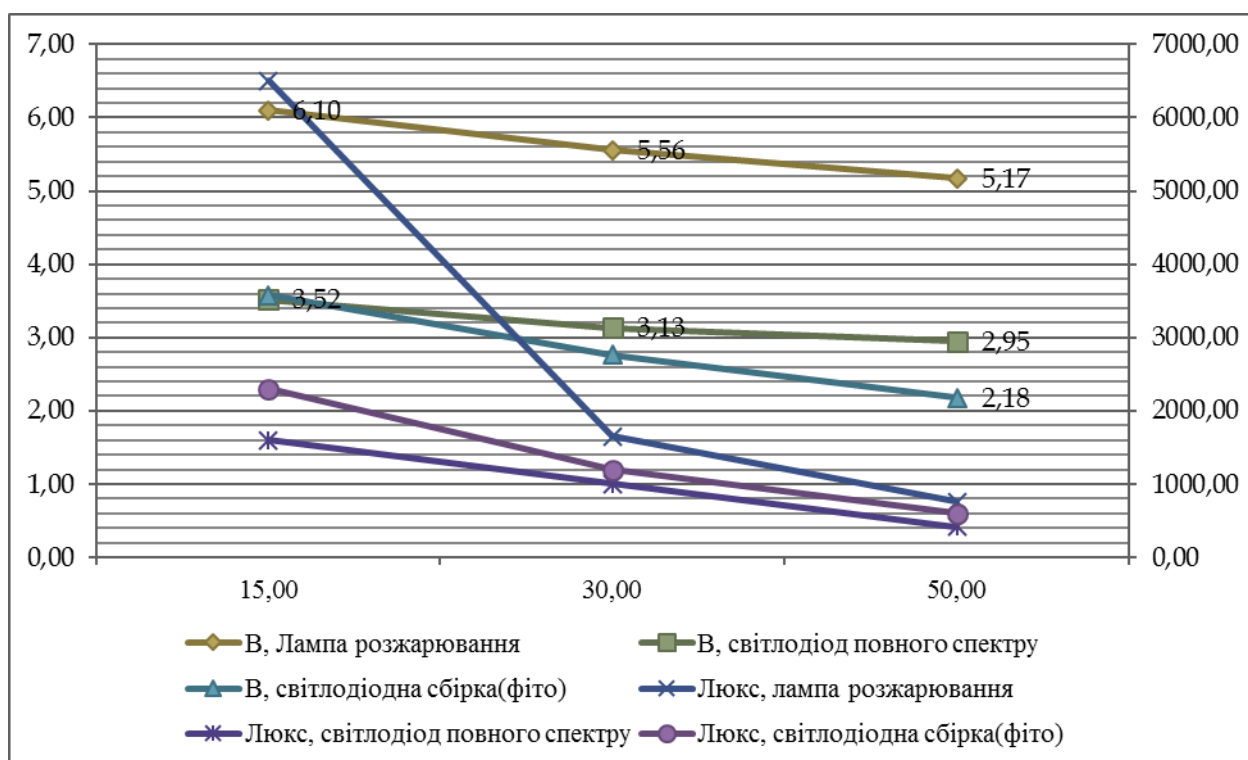
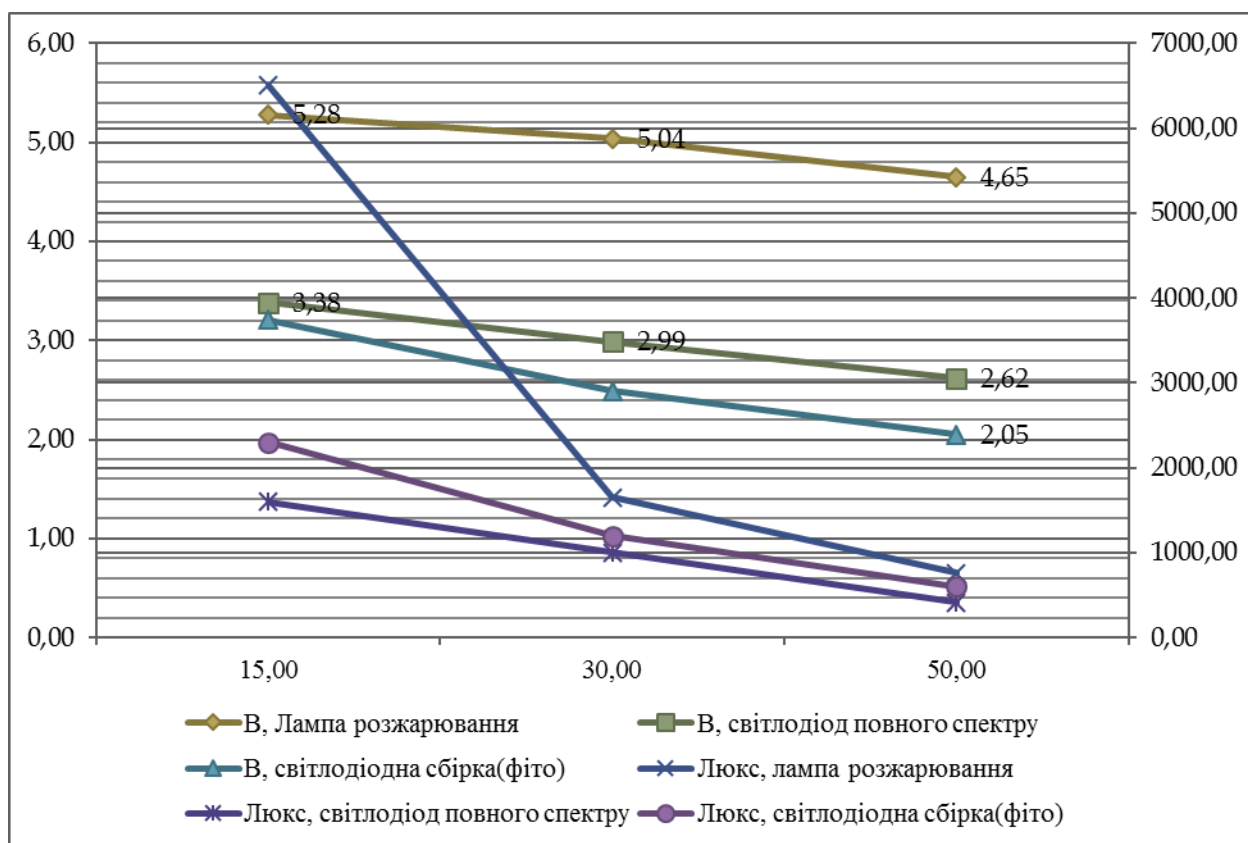


Рисунок 2.14 – Графіки залежності напруги від освітленості

2.4 Розрахунок енергетичних характеристик випромінювання

Освітленість можна визначити як щільність світлового потоку на освітлюваній поверхні. Освітленість не залежить від напрямку поширення світлового потоку на поверхню. Освітленість в певній точці на поверхні, перпендикулярної до напрямку поширення світла, визначається як відношення сили світла до квадрату відстані від цієї точки до джерела світла.

Щільність потоку випромінювання (інтенсивність випромінювання) розраховувалася за формулою:

$$J = \frac{U}{\alpha \cdot S}, \quad (2.2)$$

де U – напруга, що вимірюється мультиметром, підключеним до виходу панелі;

α – коефіцієнт чутливості термоелектричної батареї,

$\alpha = 0,067 \text{ В / Вт}$; S – площа поверхні сонячної панелі.

Потік енергії випромінювання, що опадає на панель можна отримати виходячи з формули:

$$\Phi = J \cdot S, \quad (2.3)$$

Було проведено розрахунок коефіцієнта заповнення вольтамперної характеристики або коефіцієнта форми, який характеризує якість сонячних елементів і визначається виразом:

$$\varepsilon = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{xx} \cdot I_{кз}}, \quad (2.4)$$

Коефіцієнт корисної дії можна отримати зі співвідношення електричного опору панелі і потоку енергії випромінювання.

Усі результати розрахунків наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – результати розрахунків енергетичних характеристик випромінювання

Потік енергії Φ , Вт	Опір, Ом	U_{xx} , В	I_{kz} , мА	P_{max} , мВт	ККД, %	Щільність струму J , А/м ²	Кооф. заповнення ВАХ
1,83	42	2,2	44	63	4	8,8	0,67
1,43	65	2,18	33	50	3,5	6,5	0,7
1,13	51	2,1	28	40	3,3	0,6	0,69

2.5 Розподіл фотонів в діапазоні довжин хвиль

У розрахунку були використані дані про розподілу потоку енергії випромінювання по довжинах хвиль для використовуваних в експерименті світлових джерел, а також значення потоку енергії випромінювання джерел, виміряні незалежно за допомогою термоелектричної батареї (табл. 4). Нехай Φ - потік енергії випромінювання в спектральному інтервалі $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$, падаючого на сонячну панель.

Даний потік енергії випромінювання Φ_i пропорційний площі вузької смужки S_i під графіком розподілу фотонів по довжинах хвиль світлових в інтервалі $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$. Повний інтегральний потік енергії випромінювання, що падає на СБ:

$$\Phi = \sum \Phi_i, \quad (2.5)$$

Тоді потік випромінювання Φ_i в обраному спектральному інтервалі визначається як:

$$\Phi_i = \sum \frac{S_i}{\sum S_i}, \quad (2.6)$$

$$\Phi_i = N_i \frac{hc}{\lambda_i}, \quad (2.7)$$

де N_i – число фотонів в обраному спектральному інтервалі $[\lambda_i; \lambda_i + \Delta\lambda]$,

$\frac{hc}{\lambda_i}$ – енергія фотона.

Виходячи з цього:

$$\Phi_i = \left[\Phi \frac{S_i}{\sum S_i} \right] \cdot \frac{\lambda_i}{hc}, \quad (2.8)$$

$$N = \sum N_i \text{ – Результуюче число фотонів.} \quad (2.9)$$

При розрахунку задавали $\Delta\lambda = 12,5$ нм.

Результати розрахунків розподілу фотонів в діапазоні довжин хвиль вказані в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків розподілу фотонів в діапазоні довжин хвиль

Джерело випромінювання	Потік енергії Φ	Кількість фотонів N	Струм	Квантовий вихід Q_n	ККД%
Лампа розжарювання	1,75	$5,9 \cdot 10^{18}$	1580	0,05	3,51
Світлодіод повного спектру	0,074	$7,1 \cdot 10^{17}$	660	0,12	9,3
Світлодіодна сірка (фіто)	0,066	$3,2 \cdot 10^{17}$	220	0,9	6

Через особливості побудови фотоелектричних перетворювачів виникають зниження ефективності сонячних панелей з ростом температури, тому сучасні методики визначення робочих параметрів панелі враховують температурний коефіцієнт t_K , що змінюється в залежності від пори року (взимку ближче до 0.7, влітку t_K наближається до 0.5). Фактор часткового затемнення панелі викликає падіння вихідної напруги за рахунок втрат у неосвітленій області, яка виступає в ролі паразитного навантаження. Від даного недоліку можна позбутися шляхом установки схеми комутації з входу на вихід комірки за допомогою діодів Шотки [18] на кожен фотоелемент панелі, що активно використовується промисловими виробниками в якісних сонячних панелях. Аналізуючи робочі вольт-амперні характеристики більшості фотоелектричних панелей можна побачити, що для

досягнення найбільшої ефективності енергетичного виходу необхідно робити правильний підбір опору навантаження. Для цього фотоелектричні панелі не підключають прямо до навантаження, а використовують контролер керування [13] фотоелектричними системами, що забезпечує оптимальний режим роботи панелей. Ефективність перетворення також залежить від електрофізичних характеристик неоднорідної напівпровідникової структури, а також оптичних властивостей панелі, серед яких найважливішу роль грає фотопровідність, яка визначена явищами внутрішнього фотоефекта в напівпровідниках.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено аналіз літературних джерел, який показав актуальність застосування сонячних панелей з різних матеріалів, найбільш поширеними з них є кремній, але на сьогоднішній день існують більш перспективні (перовскіт, гнучкі плівкові, концентраційні) та продовжуються роботи з пошуку нових матеріалів. Розглянуто стан галузі сонячної енергетики в Україні та світі на теперішній .

Розглянуто теорію і принципи роботи сонячних панелей, матеріали та структури, технологічні процеси з виготовлення сонячних панелей. Показано, що новий клас матеріалів, які називаються перовскіт, може в перспективі забезпечити людство дешевими панелями з високим ККД (30%) відносно кремнію.

Розглянуто ІСВ для тестування сонячних елементів і панелей та їх основний робочий компонент (штучне джерело оптичного випромінювання). ІСВ повинні максимально повторювати всі параметри сонячного випромінювання, такі як щільність потоку, спектральний склад, паралельність променів, стабільність в часі і рівномірність освітлення, та відповідати відповідним класам (А, В, і С). В якості джерел випромінювання, як показує практика, використовуються ксенонові лампи, які є найбільш поширені. Імітатори можуть бути на основі дугових ксенонових ламп або імпульсних ксенонових ламп. Ця обставина викликана тим, що спектральний склад випромінюваного світла ксенонових ламп близький до сонячного. Але, для здешевлення та спрощення конструкції, коли похибками можливо знехтувати, допускається використання ІСВ на основі світлодіодних ламп та збірок. Розглянуто теоретичні загальні поняття LED світлодіоду, його принцип роботи, структуру та характеристики спектрального діапазону.

Розглянуто перспективи застосування джерел випромінювання спектр котрих наближений до сонячного спектра, адже на сьогоднішній день сонячні панелі широко використовуються в автономних і енергонезалежних галузях. Розглянута можливість застосування в теплицях або у великих приміщеннях(ангари, виробничі

ділянки), де можлива додаткова регенерація електроенергії, якщо встановлювати сонячні панелі під штучним освітленням.

У ході експериментальної частини дослідженнями показано вплив складу спектра джерел світла на електричну потужність, що виробляється сонячною панеллю. Істотний вплив на характеристики панелі надає не стільки потужність джерела, скільки спектральний склад випромінювання. Визначальним фактором є наявність достатньої кількості фотонів довжини хвилі меншою за значенням червоного кордону внутрішнього фотоефекту. При цьому як короткохвильові фотони, так і фотони з граничним значенням довжини хвилі повинні давати максимальний квантовий вихід фотоефекту. У ході роботи визначено, що для підвищення ККД роботи систем освітлювання, варто комбінувати системи електричних сонячних панелей та системи освітлення приміщень та рослин. Якщо підібрати оптимальний спектральний діапазон джерела світла, в межах 400-800нм, можна отримати систему регенерації електричної напруги, незалежно від зміни якості освітлення приміщень та рослин. У ході експериментальних дій, було отримано навички з розрахунку щільності потоку випромінювання, коефіцієнту заповнення ВАХ для сонячних панелей, розрахунок розподілу фотонів в спектрі джерел випромінювання та його квантовий вихід.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wood mackenzie provides the most trusted research in the industry URL: <https://www.woodmac.com/about-us/>. (дата звернення: 10.11.2019).
2. Енергія сонця | держенергоефективності України URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy/> (дата звернення: 5.11.2019).
3. Сонячні елементи: Теорія і експеримент / Пер. з англ. під ред. М. М. Колтуна. - М.: Вища школа, 1987. - 280 с.
4. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – pp.256-263.
5. Солнечная энергетика: обзор отрасли / по материалам компании Nitols Solar Limited. URL: <http://nitolsolar.com/rusolarenergy/> (дата звернення 5.11.2019)
6. Chunfeng Hou, Zhongxiang Zhou, Xiudong Sun, Baohong Yuan. Incoherently coupled grey-grey screening-photovoltaic soliton pairs in biased photovoltaic-photorefractive crystals // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. –Vol. 112. – Issue 1 . – 2001 . – PP. 17-20
7. Фролова, Т. И. Имитаторы солнечного излучения на основе серной лампы: сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф., 30 сент. – 3 окт. 2011 г. – Х. ; Кацивели : ХНУРЭ, 2011. – С. 92–94
8. Імітатори Сонця URL: <http://lomophotonica.ru/content/view/60/116.html> (дата звернення: 5.11.2019).
9. Opiorden, R. W. Large area pulsed solar simulator [Text] / R. W. Opiorden. // Material of 8th IEEE Photovolt. Spec. Conf., Seattle (Wash.), 1970. – Seattle, 1970. – P. 50-54. 13
10. Макарова, Е. А . Розподіл енергії в спектрі Сонця і сонячна постійна. - М.: Наука, 1972. - 83 с.
11. Ковальський, В. Я. Імітатори випромінювання Сонця і вимір характеристик сонячних ба Тарей і їх елементів. - 1972. - № 3. - С. 45-51.

12. Сонячні тренажери типу AAA Sciencetech класу AAA. Повністю відбиваюча технологія фотоелектричних випробувань URL: <http://science-tech-inc.com/catalogsearch/result/?q=Sciencetech+class> (дата звернення 16.11.2019).
13. Ковальський, В. Я. Імітатор внеатмосферного Сонця. Двигуни і енергоустановки аерокосмічних літальних апаратів. - 1967. - № 1. - С. 35-42.
14. Жигалина Н.И., Рыжов А.И. Имитатор солнечного излучения Электротехн. Пром-сть. Сер. Светотехнические изделия. 1976. Вып. 5(41). С. 4-6
15. SolarSimulation. SectionTwoFeatures URL: <http://docslide.us/documents/solar-simulator.html>. (дата звернення 16.11.2019).
16. SpectroSunmodel X-25 solarsimulator URL: <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/X25%20RevB.pdf> (дата звернення 16.11.2019).
17. SpectroSun X-25 Mark II URL: <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/X25%20RevB.pdf>. (дата звернення 16.11.2019).
18. Solar Simulator (ContinuousType) URL: <http://www.wacom-ele.co.jp/en/products/solar/normal/> (дата звернення 16.11.2019).
19. UnisimSolar Simulator URL: <http://www.ts-space.co.uk/solar-simulator.php>. (дата звернення 19.11.2019).
20. Large Area Pulsed Solar Simulator (LAPSS II) URL <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/ILS%20LAPSS%20Data%20Sheet%208-7-03%20Web.pdf> (дата звернення 19.11.2019).
21. Opiorden, R. W. Large area pulsed solar simulator Materialof 8th IEEE Photovolt. Spec. Conf., Seattle (Wash.), 1970.Seattle, 1970. P. 50-54.
22. Дослідження конструктивних схем космічних сонячних електростанцій для енергоснаб. Землі / Н. С. Лідоренко та ін. Шляхи використання сонячної енергії: тез. доп. конф., 17-19 лютого 1981 року - Черноголовка, 1981 г. / Ін-т хім. Фізики. - Черноголовка, 1981. - С. 76-78.