

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет

(повна назва інституту/факультету)

_____ (повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 104 фізика та астрономія _____
(код і назва спеціальності)

на тему: Застосування засобів інфрачервоної термографії для виявлення структурних дефектів фотоелектричних сонячних елементів

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу магістерського рівня, групи _____
(шифр групи)

Шевчук Вікторія Сергіївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник проф. ф.т.н. Котовський В.Й. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Застосування засобів інфрачервоної термографії для виявлення структурних дефектів фотоелектричних сонячних елементів

Мета дослідження: Розробка методу інфрачервоної термографії для виявлення дефектів сонячних елементів при нагріванні їх темновим струмом на етапі виготовлення та зборки.

Об'єкт дослідження: Фотоелектричні сонячні елементи.

Предмет дослідження: Наявність структурних дефектів у фотоелектричних сонячних елементах.

Завдання дослідження: Дослідити фотоелектричні сонячні елементи на наявність структурних дефектів.

Методи дослідження: Метод інфрачервоної термографії.

Результати дослідження: Запропоновано метод термографії СЕ для виявлення дефектів при нагріванні зворотним темновим струмом, що дозволяє виявляти дефекти типу електричного пробоя і мають характер резистивного шунта, в окремих СЕ або у сонячних батареях.

Галузь застосування: термографія, сонячна енергетика та екологія.

Ключові слова: ІЧТ, сонячний елемент, темновий струм, термограф, дефекти СЕ.

Структура роботи: У роботі міститься 74 сторінки та 29 рисунків. Список використаних джерел містить 59 найменувань.

Abstract

Magnetic and magnetodynamical properties of nickel nanowires in porous alumina oxide matrixes

The purpose of the research: Determination of the influence of the thickness of the barrier layer in porous matrices of anodized aluminum oxide on the formation of nickel nanofillers, their magnetic and magnetodynamic characteristics.

Object of research: Nickel nanowires in porous matrices of anodized aluminum oxide.

Subject of research: Influence of the thickness of the barrier layer on the coefficient of filling of the matrix and the shape of individual nickel elements.

Objectives of the research: To experimentally investigate the magnetic and magnetodynamic properties of nickel nanowires in a porous aluminum oxide matrix.

Methods of research: Ferromagnetic resonance measurement of hysteresis loops.

Results of the research: For completely filled samples, one resonance peak was observed for all orientations of the external magnetic field in relation to the normal to the plane of the samples. This corresponds to a homogeneous precession of dipole-bonded cylinders. For samples with a lower fill factor, the main peak moves to the lower fields. In addition, in the field of low fields there is a second rather intense peak. Such changes are associated with a decrease in the dipole interaction between the nanowires as a result of a decrease in fill factor and an increase in heterogeneity of the sample.

Field of application: chemistry, nanobiotechnology and medicine.

Keywords: FMR, nickel nanowires, porous matrix of aluminum oxide, resonance spectrum, magnetization, anisotropy, magnetic field.

The paper contains: used literature - 59, pages: - 74, drawings - 29 .

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ..... | 7 |
| ВСТУП | 9 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ..... | 12 |
| 1.1. Сучасний стан розвитку енергетики та енергетичних технологій в Україні..... | 1 |
| 2 | |
| 1.2. Етапи розвитку сонячної енергетики..... | 16 |
| 1.3. Фізичні основи сонячної фотоенергетики..... | 17 |
| 1.4. Технології сонячних елементів і сонячних батарей..... | 22 |
| 1.5. Технології СЕ на кристалічному кремнії..... | 33 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТНОСТІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ | 38 |
| 2.1. Телевізійний метод контролю електролюмінісцентних дефектів..... | 39 |
| 2.2. Метод діагностики СЕ на основі нагрівання прямим струмом..... | 41 |
| 2.3. Метод нагрівання СЕ зворотним темновим струмом..... | 46 |
| РОЗДІЛ 3. ОСНОВНІ ВИДІВ ДЕФЕКТІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХ ТЕРМОГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ..... | 49 |
| 3.1. Контроль дефектів фотоелектричних сонячних батарей методом інфрачервоної термографії..... | 49 |
| 3.2. Розрахунок теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї..... | 52 |
| 3.2.1. Методика визначення площі об'єкту на термограмі, яка розташована в зоні інтересу..... | 65 |
| 3.3. Телевізійний контроль електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей..... | 68 |
| 3.3.1. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів електролюмінісцентних дефектів..... | 71 |
| ВИСНОВКИ | 78 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 79 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВДЕ – відновлювальне джерело енергії;

ЕЛД – електролюмінісцентний дефект;

ЕРС – електрорушійна сила;

ІЧТ – інфрачервона термографія;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МЕК – міжнародна електротехнічна комісія;

СВ – сонячне випромінювання;

СЕ – сонячний елемент;

ТІВС – телевізійна інформаційно-вимірювальна система;

ФЕП – фотоелектричний перетворювач;

ФЕСБ – фотоелектрична сонячна батарея;

ХХ – холостий хід;

АМ – Air mass (повітряна маса);

ASTM – American Society for Testing and Materials (Американське товариство контролю та матеріалів);

a-Si – amorphous Silicon (аморфний кремній);

a-Si:H – Hydrogenated Amorphous Silicon (гідрогенізований аморфний кремній);

c-Si – crystalline silicon (кристалічний кремній);

Fraunhofer ISE – Fraunhofers Institute of Solar Energy (Інститут сонячної енергетики імені Фраунгофера, ФРН);

NREL – National Renewable Energy Laboratory (Національна лабораторія відновлювальних джерел енергії, США).

ВСТУП

В сучасному світі, коли показники використання енергії зростають, а кількість енергоресурсів обмежена, набирають обертів методи енергії із альтернативних, відновлювальних джерел.

У теперішній час, альтернативні джерела енергії вже широко використовуються для вирішення проблем енергопостачання в промислових масштабах і в приватному секторі. Висока варіативність технологій отримання енергії з відновлювальних джерел надає можливість створювати енергонезалежні споруди з екологічно чистою інфраструктурою навіть у віддалених районах і вирішувати проблему енергозабезпечення вже існуючих об'єктів.

Сучасним напрямом розвитку альтернативної енергетики є використання енергії Сонця. Завдяки економічному заохоченню з боку урядів провідних країнах світу, за останні два десятиріччя обсяги світового виробництва фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) зростали на 20-30% щороку, а їх сумарна потужність наблизилась до 200 ГВт [1].

Головним недоліком сонячної енергетики є висока собівартість енергії: кожний ват потужності сонячної електростанції в 2-3 рази дорожчий за аналогічну потужність теплових електростанцій. Головним напрямом наукового пошуку в даній сфері є пошук методів підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) ФЕСБ, а також подовження терміну їх експлуатації, що зменшить собівартість енергії. Для цього необхідне впровадження нових та вдосконалення існуючих методів і засобів контролю ФЕСБ з метою усунення дефектів на стадії виробництва.

Дефекти кремнієвих пластин та поступова деградація ФЕСБ під дією світла або високої зворотної напруги зменшують ККД. Але недостатньо лише здійснювати контроль наявних дефектів та деградації ФЕСБ.

Необхідно стимулювати прояв прихованих дефектів за допомогою спеціальних тестів, для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення.

Існуючі методи і засоби контролю ФЕСБ направлені на їх використання в умовах виробництва лише для забезпечення поопераційного контролю технологічного ланцюга. Проте сам процес експлуатації ФЕСБ, тривалість якого складає 20 і більше років, не супроводжується достатнім контролем. Саме тому, необхідно вдосконалювати методи і засоби контролю ФЕСБ для вимірювання їх експлуатаційних параметрів і характеристик, а також виявляти і локалізувати дефекти, які негативно впливають на ККД ФЕСБ.

Головним показником експлуатаційних параметрів і характеристик ФЕСБ є її вольт-амперна характеристика (ВАХ). З неї визначають ККД, струм короткого замикання, максимальну потужність, струм і напругу при максимальній потужності, напругу холостого ходу, коефіцієнт форми тощо. Аналіз ВАХ також надає можливість прогнозувати деградацію ФЕСБ, шляхом здійснення контролю дефектів.

Існуючі засоби контролю призначені для використання лише в лабораторних умовах або на виробництві. Крім того, повністю уникнути впливу нагрівання ФЕСБ неможливо, тому що дані методи використовують багатоімпульсне вимірювання. Це все свідчить про необхідність вдосконалення існуючих динамічних методів і засобів вимірювання ВАХ, для контролю ФЕСБ в умовах експлуатації.

Створення нових та вдосконалення існуючих методів і засобів на основі інфрачервоної термографії (ІЧТ), телевізійних інформаційно-вимірювальних систем (ТІВС) та динамічного вимірювання ВАХ надає можливість контролювати дефекти на ранній стадії їх виникнення, що є необхідним для покращення режиму відбору максимальної потужності від

ФЕСБ та подовження терміну їх експлуатації. Все вищенаведене свідчить про актуальність теми дослідження, спрямованого на вдосконалення методів і засобів контролю ФЕСБ.

Метою даного дослідження є розробка методу інфрачервоної термографії для виявлення дефектів сонячних елементів при нагріванні їх темновим струмом на етапі виготовлення та зборки.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ

1.1. Сучасний стан розвитку енергетики та енергетичних технологій в Україні

Україна - держава зі значним потенціалом для розвитку відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), але їх частка в енергетичному балансі країни становить лише 2,7%, що зумовлює важливість розгляду проблем і перспектив їх розвитку. Варто відзначити, що нині ВДЕ - не альтернатива, а доповнення до традиційної енергетики. Ця тенденція буде зберігатись і надалі, адже розвиток ВДЕ дасть змогу зменшити енергетичну залежність України. Всі країни з сучасним рівнем наукового та технічного розвитку активно займаються використанням та впровадженням відновлювальних енергоресурсів в промисловість [2].

Енергозбереження та ефективне енергоспоживання повинні мати пріоритетне значення для скорочення споживання таких енергоресурсів як газ, мазут і газ. Розвинені країни вже давно визнали енергоефективність як пріоритетний шлях розвитку своєї економіки [2].

Нині комунальна теплоенергетика перебуває у кризовому стані, спричиненому моральним і фізичним спрацюванням теплового обладнання. За даними Держкомстату України, у цій галузі на підприємствах усіх форм власності та відомчого підпорядкування експлуатується 26 430 котелень, загальний технічний стан яких є критичним. Із 64 726 котлів 14 331 (22,2%) функціонують понад 20 років. Значна кількість котлів на зразок НІСТУ-5, Універсал», «Мінськ» тощо

застаріла та малоефективна, з коефіцієнтом корисної дії майже 65—75% (на газі) і 70% — (на вугіллі) [3].

Попри поступове зменшення питомих витрат палива на вироблення теплової енергії, вони ще надто високі (понад 180–190 кг у. п. на 1 Гкал теплоти) замість 140—150 кг у. п., як у розвинених країнах.

Таким чином, Україна належить до енергодефіцитних країн, оскільки за рахунок власних паливно-енергетичних ресурсів вона задовольняє свої потреби лише на 47–49%. За рахунок власного видобутку покривається 10–12% потреб у нафті та 20–25% – у природному газі. Тому необхідно приділяти увагу розвитку ВДЕ [4].

У теперішній час існує три види альтернативних джерел енергії: вітряна, геотермальна і сонячна.

Вітер є одним з найперспективніших джерел енергії. Принцип роботи вітрогенератора простий: для того, щоб привести в рух вітряне колесо використовується сила вітру. У свою чергу це обертання передається ротору електричного генератора. В регіонах, де середня швидкість вітру від 4.5 м/с і вище, будують вітряні електростанції. У місцевостях, де часто буває вітряно, вітер можна вважати практично невичерпним джерелом енергії. Виробляючи енергію, вітрогенератори не забруднюють атмосферу шкідливими викидами. Недоліки цього типу енергії полягають в мінливості сили вітру і невеликої потужності одиничного вітрогенератора, так само вони виробляють багато шуму, внаслідок чого їх намагаються будувати вдалині від місць проживання людей [5].

У глибинах Землі зберігається величезна кількість теплової енергії. Це обумовлено тим, що температура ядра Землі дуже висока. У деяких місцях земної кулі відбувається безпосередній вихід високотемпературної магми на поверхню Землі (вулканічна діяльність - гарячі джерела пара,

води). Прихильники геотермальної енергетики пропонують використовувати цю енергію в якості альтернативного джерела. Геотермальні джерела використовують по-різному: одні джерела служать для отримання електрики з теплової енергії, інші - для тепlopостачання. Варто зазначити, що цей вид енергії практично невичерпний і не залежить від часу доби і пори року. Термальні води сильно мінералізовані, і, часто, насичені токсичними сполуками, що є недоліком. Це робить скидання геотермальних вод в поверхневі водойми неможливим.

Випромінюванням сонця можна скористатися як для отримання електрики (з допомогою фотоелектричних елементів), так і для потреб тепlopостачання. Всілякі геліоустановки використовують сонячне випромінювання в якості альтернативного джерела енергії [5].

Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні (1235 кВт год/м) є достатньо високим і набагато вищим, ніж, наприклад, в Німеччині – 1000 кВт год/м чи навіть Польщі – 1080 кВт год/м. Отже, ми маємо хороші можливості для ефективного використання теплоенергетичного обладнання на території України. Термін «ефективне використання» означає, що геліоустановка працюватиме з віддачею в 50% і більше, а це 9 місяців в південних областях України (з березня по листопад), і 7 місяців – в північних областях (з квітня по жовтень). Взимку ефективність роботи падає, але не зникає [6].

Отже, і в умовах нашого клімату сонячні системи працюють цілий рік, правда тільки з перемінною ефективністю. Тому варто розглянути сумарний річний потенціал сонячної енергії на території України (див. рис.1.1) [4,7].

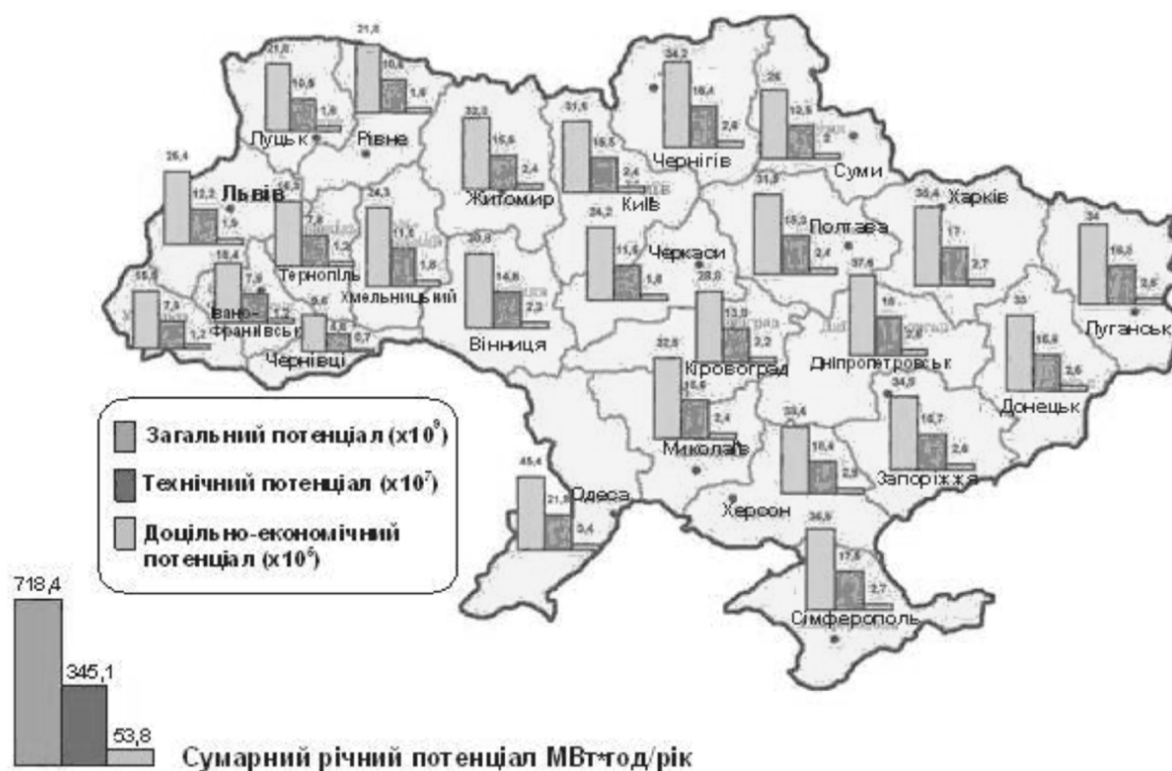


Рис.1.1 Потенціал сонячної енергії на території України

Реалізовані впродовж останніх років експериментальні проекти засвідчили, що річне виробництво теплової енергії в умовах України становить 500 – 600 кВт*год/м². Враховуючи загальноприйнятий на Заході потенціал використання сонячних колекторів для розвинених країн, що дорівнює 1м² на одну людину, а також ККД сонячних установок для умов України, щорічні ресурси сонячного гарячого водопостачання та опалення можуть становити 28 кВт*год/м² теплової енергії. Реалізація цього потенціалу дозволила б заощадити 3,4 млн. т умовного палива (т.ум.п.) на рік [8].

1.2. Етапи розвитку сонячної енергетики

Вперше фотовольтаїчний ефект спостерігався в електролітичній комірці Едмондом Беккерелем в 1839 р. Перші експерименти з твердотільними фотоелектричними елементами на основі селену проводилися Адамсом і Деєм в Лондоні в 1876 р. [9]. Понад півстоліття знадобилося для того, щоб з'явилися перші сонячні фотоелементи з ефективністю, перевищуючою 1%. Ними стали розроблені в 1930-і роки в Фізико-технічному інституті сірчано-талієві фотоелементи із запірним шаром [10]. Дослідження виконувалися під керівництвом засновника інституту академіка А.Ф. Іоффе, який вже в той час (1938 р.) вперше вніс на розгляд уряду СРСР програму енергетичного використання сонячних фотоелектричних дахів. Однак для старту фотоелектричної енергетики (навіть без урахування економічних міркувань) була потрібна істотно більша ефективність. Вирішальним для цього напрямку стало створення кремнієвих фотоелементів з р-п-переходом, що мали ККД близько 6% [11]. Перше практичне використання кремнієвих сонячних батарей для енергетичних цілей мало місце не на Землі, а в навколосемному космічному просторі. В 1958 були запуснені штучні супутники Землі, оснащені такими батареями - радянський "Спутник-3" і американський "Авангард-1".

Тут слід зазначити, що науковою базою для створення перших сонячних батарей стала розробка теорії і технології напівпровідникових матеріалів і приладових структур з р-п-переходом. Основні області застосування приладів на напівпровідникових матеріалах в той час бачилися в техніці перетворення електричної енергії (перетворення змінного струму в постійний, високочастотна генерація, перемикування і т.д.) і в електронних пристроях передачі та обробки інформації (радіо,

зв'язок і т. д.). На додаток до "класичних" напівпровідникових матеріалів – германію і кремнію, з 1950 року почався синтез матеріалів типу $A^{III}B^V$ [12]. На початку 1960-х років були створені і перші сонячні фотоелементи з р-п-переходом на основі арсеніду галію. Поступаючись в ефективності кремнієвим фотоелементам, арсенід-галієві тим не менше були здатні працювати навіть при значному нагріванні. Перше практичне застосування вдосконалених арсенід-галієвих сонячних батарей для енергетичних цілей було ще більш екзотичним, ніж в разі кремнієвих батарей. вони забезпечували електропостачання радянських космічних апаратів, які працюють в околицях планети Венера (1965), а також самохідних апаратів "Місяцехід-1" і "Місяцехід-2", досліджують поверхню Місяця (1970 і 1972 рр.).

1.3. Фізичні основи сонячної фотоенергетики.

У теперішній час в світі використовуються напівпровідникові сонячні елементи (СЕ) з р-п переходами і перспективні пристрої на напівпровідникових переходах званих фотоелементами або СЕ. У СЕ під дією падаючого сонячного світла відбувається просторовий перерозподіл зарядів і виникає ЕРС. Принципова схема і пристрій СЕ показано на рис.1.2.

На металевий електрод 1 наноситься на тильну сторону кристалічної кремнієвої основи. Ця основа легирована шляхом дифузії або іонного бомбардування в своїй нижній частині домішковими (акцепторними) атомами бору або алюмінію, а у верхній, більш тонкої частини - донорними атомами фосфору або миш'яку. В результаті цього легування утворюється шар 2-напівпровідників р - типу з основними носіями зарядів

позитивного типу або дірками, а також тонкий шар 3-напівпровідник n-типу з основними носіями зарядів негативного знака або вільними електронами. На лицьову сторону кристала-кремнію наноситься лицьовий контакт або електрод 4. До електродів 1 і 4 припаюються провідники 5, що утворюють зовнішній ланцюг з іншими СЕ.

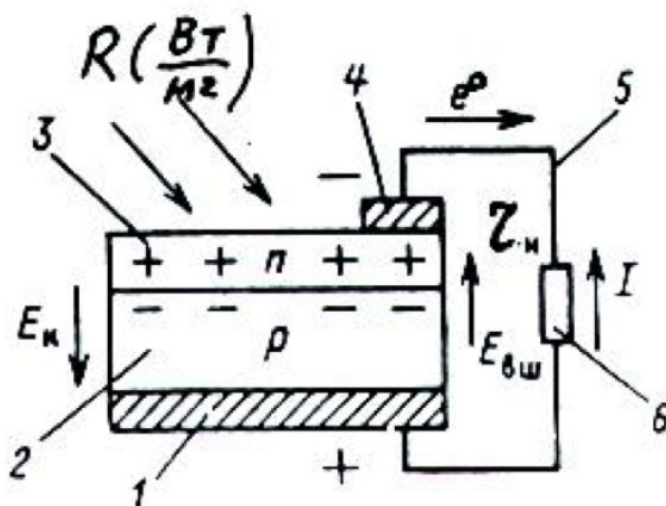


Рис. 1.2 Принципова схема фотоелемента

При попаданні сонячного світла на СЕ в шарах 2 і 3 виникає просторове поява неосновних носіїв зарядів, зі знаками, протилежними основним носіям в n- і p-областях (відповідно зі знаком "+" і "-" на рис.1.2). Під впливом отриманого електростатичного притягання вільні основні носії зарядів обох знаків дифундують через межу дотику областей 2 і 3 і утворюють поблизу неї p-n перехід з напруженістю електричного поля E_k , з контактною різницею потенціалів $U_k = S \cdot E_k$ (де S - ширина прикордонного шару) і потенційним енергетичним бар'єром $E_k = e \cdot U_k$ для основних носіїв, що мають заряд електрона e . Напруженість наведеного електричного поля E_k перешкоджає дифузії електронів за межі

прикордонного шару шириною S . Відповідно, контактна різниця потенціалів U_k може бути знайдена за формулою:

$$U_k = \frac{k \cdot T}{e^0} \ln \left(\frac{P_p}{P_n} \right) = \frac{k \cdot T}{e^0} \ln \left(\frac{n_n}{n_p} \right), \quad (1.1)$$

де k - постійна Больцмана; $k = (1,380622 \pm 0,000044) \cdot 10^{-23}$ Дж/°К; $e^0 = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ кулон - заряд електрона; P_p і P_n – концентрація дірок або пр і np - електронів в р-і n- областях з індексами р і n, відповідно.

При цьому n-область набуває негативний, а область р - позитивний заряд. Це еквівалентно додатком до р-n переходу зовнішнього електричного поля з напруженістю $E_{вн}$, зустрічного з E_k . Поле напруженістю $E_{вн}$ є замикаючим для неосновних і рухомим для основних носіїв зарядів. Динамічна рівновага потоку носіїв через р-n перехід веде до встановлення на електродах 1 і 4 різниці потенціалів або I_0 , тобто ЕРС холостого ходу СЕ. Це явище в принципі може відбуватися і за відсутності попадання СВ на СЕ. Якщо ж СЕ опромінюється потоком фотонів або сонячним світлом, то фотони стикаються зі зв'язаними (валентними) електронами кристала, що має деякі енергетичні рівні E_y . Якщо енергія фотонів, що потрапляють на СЕ більше, ніж E_y , то електрон кристала залишає свій рівень і утворює "дірку" в кристалі; р-n перехід розділяє пари електрон-дірка і I_0 збільшується. При цьому енергія фотона E_ϕ з квантової теорії визначається за формулою:

$$\mathcal{E}_\phi = h \cdot \gamma, \quad (1.2)$$

де γ, c^{-1} - частота даної хвилі СВ, h - постійна Планка - одна з основних фізики. Вона відображає специфіку закономірностей в мікросвіті і грає

фундаментальну роль в квантовій механіці; величина h дорівнює $(6,626176 \pm 0,000044) \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Якщо енергія фотонів менше E_g , то наявність СВ призводить тільки до нагрівання СЕ. Крім того, для кожного напівпровідника існує і гранична енергія фотонів, коли подальше збільшення E_f не може більше привести до зростання віддачі СЕ. У цьому випадку надмірна енергія фотонів, що перевищує так звану смугу поглинання, також використовується лише на нагрів СЕ. Зазначена смуга поглинання СЕ залежить від основного матеріалу СЕ, кількості і товщини шарів напівпровідника, їх розташування по відношенню до падаючого сонячного світла і т.д.

Як приклад формулою 1.2 представлена залежність максимальної очікуваної ефективності в відсотках одношарових СЕ з різних матеріалів (Ge- германій; Si - кремній; GaAs - арсенід галію; CdTe - кадмій-телур; CdS - кадмій-селен), а також її залежність від температури. З формули 1.2 випливає, що при підвищенні температури ефективність будь-якого СЕ знижується. При цьому з найбільш поширених сьогодні матеріалів СЕ найкращі термічні характеристики має арсенід галію. На цьому ж малюнку показані і граничні значення E_f , тобто забороненої зони для різних матеріалів напівпровідників.

Якщо далі в зовнішній ланцюг СЕ включити деяку навантаження з опором R_n , то по цьому ланцюгу піде струм I , напрямок якого зустрічно руху електронів. Дірки ж переміщуються тільки в самому напівпровіднику. Чим більше потужність СВ, тим більше струм зовнішнього ланцюга. Однак його величина не може бути більше деякого граничного струму СЕ, який визначається тим, що всі валентні електрони переведені у вільний стан.

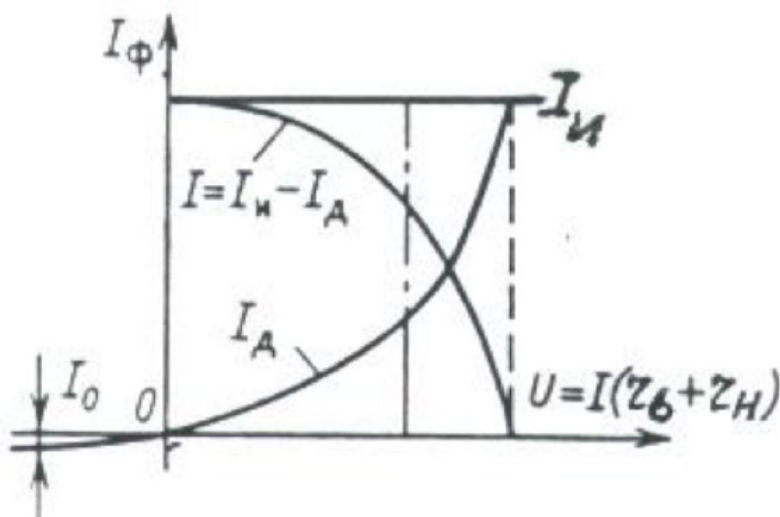


Рис. 1.3 Вихідні характеристики СЕ: $I_H(U)$ - джерела струму; $I_d(U)$ - діода; ВАХ СЕ - $I(U)$ при $R = \text{const}$

В цілому залежність струму СЕ (I) від його напруги (U) при заданій величині потужності СВ, тобто R ($\text{Вт}/\text{м}^2$), називається вольтамперною характеристикою СЕ. Для неї можна виділити дві характерні точки - точка холостого ходу (ХХ) ($r_H \rightarrow \infty$; $U_H = U_{H\text{max}} = U_{\text{ХХ}}$; $I = 0$) і точка короткого замикання (КЗ), коли $r_H \rightarrow 0$; $I = I^{\text{max}} = I_{\text{КЗ}}$; $U_H = 0$. Очевидно, що корисна потужність СЕ буде дорівнює добутку U_H на I , тобто $N_{\text{СЕ}} = U_H \cdot I$ і в точках ХХ і КЗ вона дорівнює нулю, досягаючи максимуму при деяких проміжних значеннях U_H і I . Чим в більшому діапазоні зберігається постійним значення $I(U_H)$, тим вище якість СЕ. Зокрема на рис.1.4 дані ВАХ двох СЕ. При цьому якість 1-го СЕ набагато вище, ніж у 2-ої при одних і тих же значеннях I і $U_{\text{ХХ}}$ при $R(\text{Вт}/\text{м}^2) = \text{const}$. Для можливості зіставлення ВАХ різних СЕ всі технічні характеристики СЕ наводяться при наступних стандартних або типових значеннях основних факторів, що впливають:

$R = 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$; $t^\circ\text{C} = \pm 25^\circ\text{C}$; оптична маса атмосфери, що визначає діапазон пропускаються хвиль сонячного спектра -1.5.

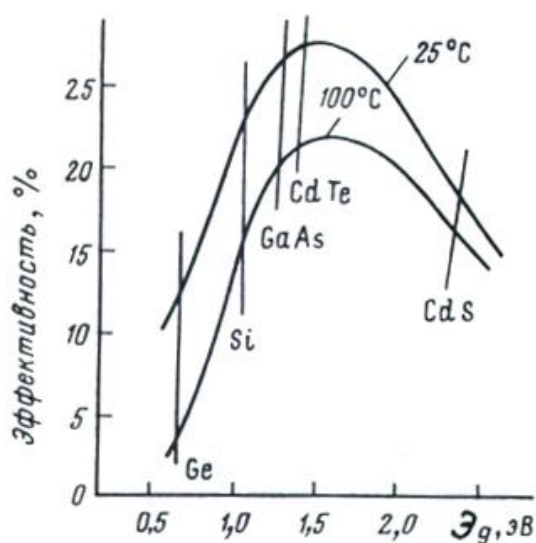


Рис. 1.4 Ефективність СЕ в залежності від $t^{\circ}\text{C}$ і матеріалу СЕ [13]

1.4. Технології сонячних елементів і сонячних батарей.

Сонячна енергетика знаходиться у стані бурхливого розвитку, про що свідчать обсяги виробництва ФЕСБ і особливо щорічні темпи приросту їх виробництва [14-17]. Найбільш поширеним матеріалом для ФЕСБ є кристалічний кремній, доля якого у загальній потужності щорічно вироблених ФЕСБ перевищує 85 % і не має тенденції до пониження [18]. Підвищення ККД, а також подовження терміну експлуатації ФЕСБ є головними напрямками наукових досліджень, метою яких є зменшення собівартості енергії [19], для чого, на наш погляд, необхідне впровадження нових та вдосконалення існуючих методів і засобів контролю ФЕСБ.

Українські вчені мають значні досягнення у створенні високоефективних СЕ космічного та наземного призначення на основі кремнієвих багат шарових структур з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами [20], тонко-плівкових СЕ на основі телуриду кадмію, «сонячних» матеріалів, на основі вуглецевих нанотрубок тощо.

Дослідження вчених із лабораторії NREL зосереджені, зокрема, на вимірювання характеристик СЕ та методи контролю їх дефектів [21-24]. Цими ж проблемами опікуються і спеціалісти інституту Fraunhofer ISE, зокрема, методом ІЧТ та іншими методами. Факторами негативного впливу на ККД ФЕСБ під час їх експлуатації є наявність дефектів кремнієвих пластин [25] та поступова деградація ФЕСБ під дією світла або високої зворотної напруги.

Важливим, на думку автора, є стимуляція проявів прихованих дефектів під дією тестів, що дозволить виявляти дефекти на ранній стадії розвитку.

Створені на цей час методи і засоби контролю СЕ та ФЕСБ орієнтовані на їх використання в умовах виробництва [26]. Проте, експлуатація ФЕСБ, тривалість якої складає 20 і більше років, не супроводжується належним контролем. Це спонукає до вдосконалення методів і засобів контролю ФЕСБ для вимірювання їх експлуатаційних параметрів і характеристик, а також виявлення і локалізації дефектів, наявність яких негативно впливає на ККД ФЕСБ.

Вимірювання ВАХ надає можливість розрахувати максимальну потужність та ККД ФЕСБ [27], а також дозволяє здійснювати контроль дефектів на ранній стадії їх розвитку та прогнозувати деградацію ФЕСБ, що є важливим чинником для забезпечення корекції навантаження для максимального відбору до нього потужності. Нагрівання ФЕСБ під час вимірювання ВАХ є одним із головних чинників методичної похибки, для зменшення якої розроблені імпульсні методи і засоби вимірювання [28]. Проте, ці засоби потребують подальшого вдосконалення та адаптації до умов експлуатації ФЕСБ.

Контроль дефектів методом ІЧТ за неоднорідностями теплового поля при нагріванні зворотним темновим струмом застосовують при

тестуванні ФЕСБ в умовах виробництва. Проте, цей метод не використовують при експлуатації ФЕСБ. При протіканні зворотного темного струму окрім нагрівання СЕ відбувається також активація в них ЕЛД, контроль яких здійснюють методом телевізійної мікроскопії [29]. Проте, використання ТІВС для контролю ЕЛД ФЕСБ не застосовують.

ФЕП створюють на основі р-п переходів, переходів метал-напівпровідник, гетеропереходів і на структурах метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структурах).

Параметри і характеристики ФЕП, СЕ та ФЕСБ вимірюють при певній величині сонячного випромінювання. Ступінь впливу атмосфери на енергетичну освітленість від сонячного випромінювання характеризується повітряною масою (АМ – Air mass). Важливі значення енергетичної освітленості за різної повітряної маси такі:

АМ0 – 1353 Вт/м² – за межами земної атмосфери (нульова повітряна маса).

АМ1 – 925 Вт/м² – Сонце в зеніті на екваторі (кут 0°)

АМ1,5 – 844 Вт/м² – кут між Сонцем і зенітом 45°

АМ2 – 691 Вт/м² – кут між Сонцем і зенітом 60°.

Кожен тип ФЕП характеризується рядом параметрів та характеристик, що визначають не лише його властивості, але й межі його застосування в тій чи іншій галузі. До найважливіших характеристик ФЕП слід віднести його інтегральну чутливість та спектральну характеристику [30].

Під інтегральною чутливістю ФЕП і розуміють величину фотоструму короткого замкнення $I_{к.з.}$, котрий виникає при падінні на ФЕП одиниці потоку променевої енергії Φ , що складається з хвиль різної довжини та такого, що відповідає по своєму спектральному складу випромінюванню вольфрамової лампи, нитка якої розжарена до температури 2840° К:

$$i = \frac{I_{\text{к.з.}}}{\Phi}, \quad (1.3)$$

Очевидно, що i визначається в амперах на ват однак часто величину світлового потоку для звичайного видимого світла виражають в люменах[31].

Вказування температури джерела (2840°K) при визначенні інтегральної чутливості має наступний сенс. Розподіл енергії в спектрі випромінюючого джерела залежить від його температури. В свою чергу різні ФЕ (за типом вихідного матеріалу або способу виготовлення) не в однаковій мірі чутливі до різних спектральних ділянок. Це призводить до того, що однакові за величиною та потужністю світлові потоки, отримані від джерел з різними температурами, викликають в замкненому колі ФЕП різні за величиною фотоструми [32].

Не менш важливою характеристикою будь-якого ФЕП є його спектральна чутливість, що відображає той факт, що ФЕП неоднаково реагує на випромінювання з різними довжинами хвиль. Спектральна чутливість i_{λ} характеризує величину фотоструму, що виникає під дією одиниці променевого потоку певної довжини хвилі, та визначається як співвідношення фотоструму короткого замкнення $I_{\text{к.з.}}$ до падаючого на ФЕП потоку монохроматичного випромінювання Φ_{λ} :

$$i_{\lambda} = \frac{I_{\text{к.з.}}}{\Phi_{\lambda}}, \quad (1.4)$$

Знання спектральної чутливості для певної довжини хвилі в більшості випадків буває недостатнім. Для отримання повного уявлення про спектральні властивості ФЕП необхідно також знати розподіл

чутливості по спектру, тобто спектральну характеристику, що відображає характер залежності величини фотоструму короткого замкнення від впливу на нього променевих потоків різних довжин хвиль. Спектральну характеристику ФЕП зазвичай зображають у вигляді графіку $i_{\lambda}=f(\lambda)$. Максимум спектральної чутливості кремнієвого перетворювача знаходиться в інтервалі довжин хвиль 0,7 – 0,8 мкм та досить близько підходить до максимуму розподілу числа фотонів як функції довжини хвилі в сонячному спектрі [30].

В лабораторних дослідженнях приймають спектральний склад випромінювання таким, як і для AM1,5 при енергетичній освітленості 1000 Вт/ м² [33]. Як правило, вимірювання ККД виконують при імітації сонячного випромінювання на основі стандарту МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія) 60904-3-2013, який прийшов на зміну до затвердженого американським науковим товариством American Society of Testing and Materials (ASTM) стандарту ASTM E891-92.

Після прийняття нового стандарту [34] щодо сонячної енергетичної світимості (МЕК 60904-3-2013), постало питання доцільності використання попередніх розрахунків, що здійснювались згідно стандарту ASTM E891-92 [35-36].

Було проведено порівняльний аналіз цих стандартів. Аналіз проводили в діапазоні поглинання сонячного випромінювання кремнієвими СЕ (від 305 до 1150 нм), оскільки кремнієві пластини є основою для 85% загальної потужності сонячних електростанцій. Результати розрахунків наведені в таблиці 1.1 [37].

Таблиця 1.1. Сонячна енергетична світимість для діапазону довжин хвиль 305-1150 нм за стандартом ASTM E891-92 та МЕК 60904-3-2013

| λ (нм) | E891-92 | МЕК-2013 | λ (нм) | E891-92 | МЕК 2013 | λ (нм) | E891-92 | МЕК-2013 |
|----------------|---------|----------|----------------|---------|----------|----------------|---------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 305 | 9,5 | 16,4 | 510 | 1586,5 | 1543,6 | 840 | 956,9 | 1012,8 |
| 310 | 42,3 | 50,8 | 520 | 1484,9 | 1519,2 | 860 | 978,9 | 985,3 |
| 315 | 107,8 | 135,9 | 530 | 1572,4 | 1540,1 | 880 | 933,2 | 936,8 |
| 320 | 181 | 204,7 | 540 | 1550,7 | 1478,2 | 905 | 748,5 | 814,7 |
| 325 | 246,8 | 278,1 | 550 | 1561,5 | 1535,4 | 915 | 667,5 | 676,4 |
| 330 | 395,3 | 470 | 570 | 1501,5 | 1477,3 | 925 | 690,3 | 709 |
| 335 | 390,1 | 462,5 | 590 | 1395,5 | 1366,9 | 930 | 403,6 | 430,8 |
| 340 | 435,3 | 500,3 | 610 | 1485,3 | 1464,3 | 937 | 258,3 | 162,9 |
| 345 | 438,9 | 457,6 | 630 | 1434,1 | 1388,4 | 948 | 313,6 | 273,4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 350 | 483,7 | 526,4 | 650 | 1419,9 | 1355,5 | 965 | 526,8 | 502,3 |
| 360 | 520,3 | 596,4 | 670 | 1392,3 | 1415,5 | 980 | 646,4 | 602,9 |
| 370 | 666,2 | 752,9 | 690 | 1130 | 1178,7 | 993 | 746,8 | 735,1 |
| 380 | 712,5 | 698,7 | 710 | 1316,7 | 1313,7 | 1040 | 690,5 | 669,8 |
| 390 | 720,7 | 794,7 | 718 | 1010,3 | 1026,6 | 1070 | 637,5 | 602,9 |
| 400 | 1013,1 | 1110,9 | 724 | 1043,2 | 1052,4 | 1100 | 412,6 | 484,4 |
| 410 | 1158,2 | 1045,5 | 740 | 1211,2 | 1216 | 1120 | 108,9 | 141,5 |
| 420 | 1184 | 1119,9 | 753 | 1193,9 | 1223 | 1130 | 189,1 | 70,4 |
| 430 | 1071,9 | 872,1 | 758 | 1175,5 | 1225,9 | 1137 | 132,2 | 287 |
| 440 | 1302 | 1346 | 763 | 634,1 | 378,4 | 1161 | 339 | 346,5 |
| 450 | 1526 | 1555 | 768 | 1030,7 | 1110,6 | | | |
| 460 | 1599,6 | 1524,7 | 780 | 1131,1 | 1160,2 | | | |
| 470 | 1581 | 1503,3 | 800 | 1081,6 | 1069,4 | | | |
| 480 | 1628,3 | 1613,4 | 816 | 849,2 | 829,7 | | | |
| 490 | 1539,2 | 1617,7 | 824 | 785 | 932,3 | | | |
| 500 | 1548,7 | 1540,6 | 832 | 916,4 | 891,7 | | | |

В результаті побудови графіку залежності сонячної світимості від довжини хвиль (рис. 1.5) та інтегрування, отримано наступні результати: інтегральна енергетична світимість за ASTM E891-92 складає 806,79

Вт/м²; згідно стандарту МЕК 60904-3-2013 інтегральна енергетична світимість складає 806,92 Вт/м².

Таким чином, різниця між інтегральними світимостями для двох стандартів складає 0,13 Вт/м², що в перерахунку на відсотки дорівнює 0,02%. Дана різниця є поправочним інтегральним спектральним коефіцієнтом $k_{\text{ispectr}} = 1,0002$, який необхідно враховувати при перерахунку попередніх результатів відповідно до вимог стандарту МЕК 60904-3-2013. Саме поправочний коефіцієнт визначає величину систематичної похибки, насамперед при вимірюванні ВАХ та ККД кремнієвих ФЕСБ.

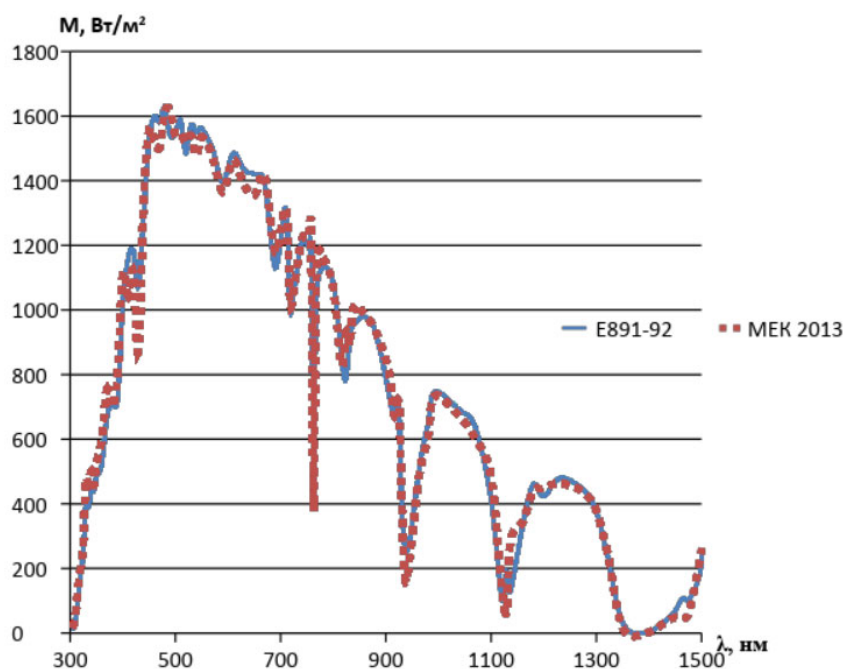


Рис. 1.5 Залежності сонячної світимості від довжини хвиль за стандартом ASTM E891-92 та МЕК 60904-3-2013

В результаті доведена придатність отриманих раніше результатів вимірювання в межах дії попереднього стандарту для порівняльного аналізу із результатами, які відповідають новому стандарту [38].

До теперішнього часу виробництво більшості комерційних модулів СЕ засноване на кристалічному кремнії (c-Si –crystalline silicon) з ККД $\eta \leq 20\%$ (перше покоління ФЕП) і аморфних тонкоплівкових СЕ з великою площею ФЕП з величиною $\eta \sim 5 - 8\%$ (друге покоління ФЕП).

Концепція третього покоління – це використання нано- та мікроструктур (мікродротів). Технологія виробництва ФЕП з мікродротами (Vapor-Liquid-Solid) відносяться до класу пристроїв з особливим конструктивним виконанням для отримання спрямованого транспорту носіїв заряду за рахунок геометрії і матеріалу таких структур [39].

На рисунку 1.6 наведено конструкцію першого покоління СЕ на кристалічному кремнії.

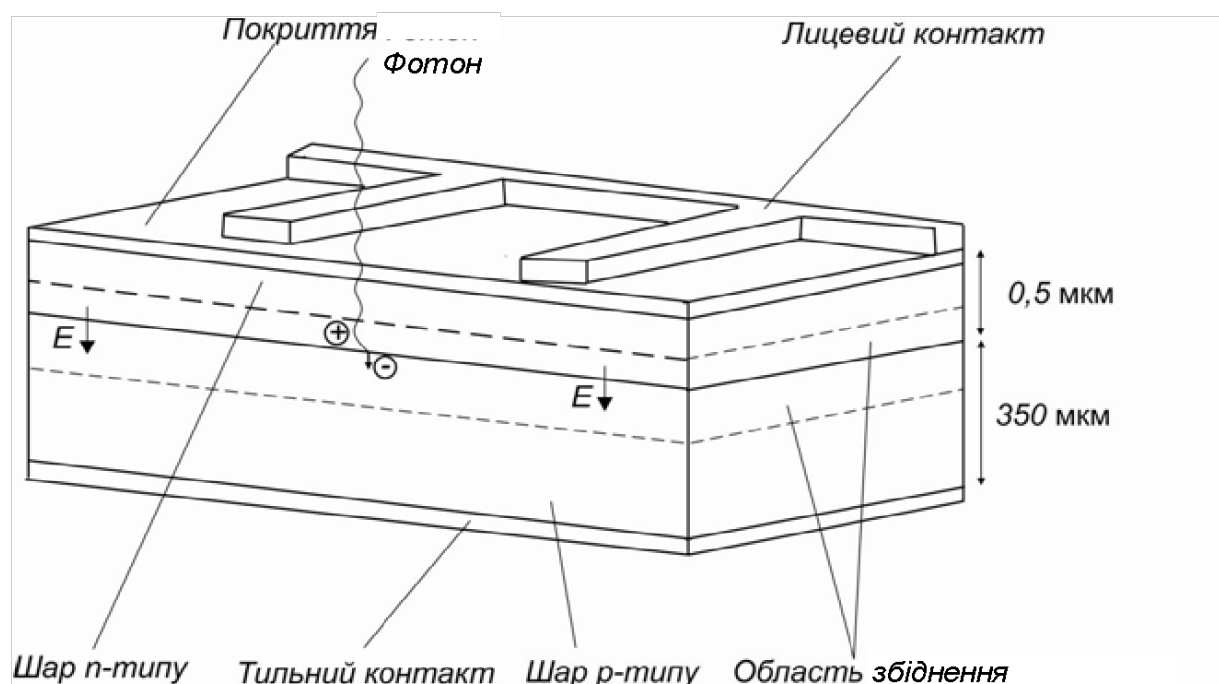


Рис. 1.6 Конструкція СЕ на кристалічному кремнії

Оптичне випромінювання, що поглинається в напівпровідниковій структурі з р-п- переходом, створює пари "електрон-дірка" за умови, що

енергія кванта перевищує ширину забороненої зони. Процесу поділу піддаються носії, що генеруються в збідненій області переходу та прилеглих до неї областях, розміри яких приблизно рівні дифузійній довжині для неосновних носіїв. Тільки з відстані, меншого, ніж дифузійна довжина, неосновний носій встигає в процесі руху досягти області просторового заряду до своєї рекомбінації.

Неосновні носії, що генеруються в р- і n- областях на більшій відстані від межі переходу, не потрапляють в збіднену область внаслідок своєї рекомбінації. Розділення зарядів, в даному випадку вбудованим електричним полем р-n-переходу, є, за визначенням, електрорушійною силою (ЕРС). Таким чином, поглинання світла напівпровідниковою структурою з р-n-переходом призводить до виникнення фото-ЕРС, а при існуванні зовнішнього ланцюга – струму в цьому ланцюзі. Фотострум, що виникає, є пропорційним до кількості електронно-діркових пар, синтезованих в результаті поглинання випромінювання, яке в свою чергу пропорційне кількості квантів випромінювання, поглинених в речовині.

Для другої генерації ФЕП та виготовлених СЕ і ФЕСБ на їх основі характерним є використання тонко-плівкових матеріалів, наприклад, аморфного кремнію (amorphous Silicon – a-Si). Ширина його забороненої зони може бути змінена шляхом введення домішки водню (гідрогенізації). Аморфний кремній, легований воднем (a-Si:H – Hydrogenated Amorphous Silicon), є основою тонко-плівкових кремнієвих ФЕП [40].

Для ефективної роботи тонко-плівкових СЕ необхідне дотримання таких умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;

- згенеровані при поглинанні світла електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- ФЕП повинен мати значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході;
- повний послідовний опір СЕ повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності за рахунок виділення джоулевого тепла в процесі роботи;
- структура тонкої плівки повинна бути й однорідною по всій активній області СЕ, щоб виключити закорочування і вплив шунтуючих опорів на характеристики елемента.

Основний напрямок досліджень в області каскадних елементів пов'язано з використанням арсеніду галію в якості одного або кількох компонентів. Ефективність перетворення подібних СЕ досягає 35%. Крім того в каскадних елементах широко застосовуються аморфний кремній, та сплави на його основі ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{H}$), а також CuInSe_2 .

Ще одним із важливих напрямів «третьої генерації» фотовольтаїки є розвиток концентраторних СЕ та ФЕСБ [41], які дозволяють за допомогою лінз Френеля збільшити світловий сонячний потік, який надходить до СЕ. Малорозмірні лінзи Френеля об'єднують разом із СЕ в інтегральну панель. При перетворенні концентрованого сонячного випромінювання у СЕ на основі GaAs з використанням пристроїв для стеження за сонцем, питома віддача електроенергії на одиницю площі збільшується в 2-2,5 рази в порівнянні з установкою на основі звичайних кремнієвих СЕ [42].

Каскадні СЕ разом із концентраторами дозволяють підвищити ККД на 10-15%. Побудова на їх основі ФЕСБ є предметом уваги сучасних досліджень фотовольтаїки, перш за все, для космічної галузі, оскільки в них найбільшим є відношення потужності до маси.

Розвиток різноманітних технологій СЕ має на меті збільшення ККД ФЕСБ і, як наслідок, здешевлення електричної енергії. Хоча вже настав час «третьої генерації» СЕ, досі більше 85% наявного парку «сонячних» електричних потужностей та їх щорічного виробництва складають моно- і полі- кристалічні ФЕСБ [42], які віднесені до «першої генерації» і давно стали класикою. Тому, на наш погляд, не менш важливою задачею поряд із збільшенням ККД є подовження терміну експлуатації ФЕСБ за рахунок підвищення надійності та забезпечення контролю дефектів під час експлуатації, перш за все, ФЕСБ із моно- і полі- кристалічних кремнієвих СЕ.

Порівняльний аналіз СЕ за їх ККД показав що, у 2014 році найвищий ККД у 46,0% мав трьохзонний СЕ на гетеропереходах із концентратором світла у 942 АМ1. Для монокристалічного кремнію без концентратора найвищий показник ККД у 25% досягнуто спеціалістами NREL ще у 1999р., потім результат повторено 2014 року. Для полікристалічного кремнію без концентратора ККД дорівнює 20,4 % (Fraunhofer – ISE, 2004, [43]).

Рекордні показники ККД отримують на окремих зразках площею у кілька квадратних сантиметрів із щільністю енергетичного світлового потоку у 300-1000 АМ1. Взагалі концентраторна фотовольтаїка бурхливо розвивається останнім часом, про що свідчить доповідь [43], яка інформує про досягнення 02.02.2015 р. рекордного ККД у 46,0% для СЕ та 36,7% для ФЕСБ. Для промислових партій кремнієвих СЕ без концентраторів їх ККД зазвичай знаходиться у межах 14-18% [43].

Структура багатозонних СЕ на гетеропереходах складна і коштовна (один квадратний метр ФЕСБ коштує до 50 тис. \$ USA). Проте, в майбутньому даний тип СЕ може стати основою сонячної енергетики не тільки в космосі, але і на Землі. Перевагою даної технології над іншими є

використання окрім кількох ділянок видимого діапазону світла також і ближнього інфрачервоного до 1,9 мкм.

Таким чином, у теперішній час відбувається бурхливий розвиток технологій фотовольтаїки, проте, основу сонячної енергетики становлять ФЕСБ ще «першої генерації» ФЕП. І тому, вдосконалення методів і засобів контролю СЕ і ФЕСБ слід зосередити на проблемах контролю кремнієвих моно- і полі- кристалічних ФЕСБ («перша генерація» ФЕП) в умовах експлуатації. Хоча результати цих вдосконалень, звичайно, можуть бути корисними також у вирішенні проблем контролю ФЕСБ «другої і третьої генерацій» ФЕП, тобто матимуть універсальний характер для фотовольтаїки в цілому.

1.5. Технології СЕ на кристалічному кремнії.

Для виготовлення СЕ використовують кремнієві пластини 250-300мк, в яких використовують технологічні процеси для створення р-п переходів шляхом окислення, дифузії, напилення, фотолітографії і текстуровання для додання антивідображаючих властивостей. Існує кілька типів конструкції монокристалічних і тонкоплівкови СЕ, що відрізняються способом формування, структурою і розташуванням контактів (рис.1.7) [31,44].

Основний недолік с-Si-СЕ - велика витрата дорогого високочистого кремнію, велика частина якого відіграє роль пасивної підкладки. Слід також зазначити, що технічні процеси виробництва с-Si- СЕ відпрацьовані в рамках виробництва мікроелектронних пристроїв і тому досить складно знайти шляхи їх поліпшення. Крім того, досить добре розроблена теорія фотовольтаїчних перетворень в монокристалі і на її основі створено комп'ютерні програми оптимізації параметрів с-Si-СЕ [45]. Основний

шлях оптимізації з-Si-СЕ - здешевлення вихідної сировини. Для зменшення собівартості кремнієвих СЕ досліджується можливість використання в якості поглинача полі- і монокристалічних Si. СЕ на основі полі- і монокристалічного Si дешевші, проте менш ефективні. Такі СЕ можуть бути отримані методами спрямованого затвердіння, вирощення з плівковим підживленням при крайовому обмеженні зростання, протягування через розплав і безліччю інших [44,47].

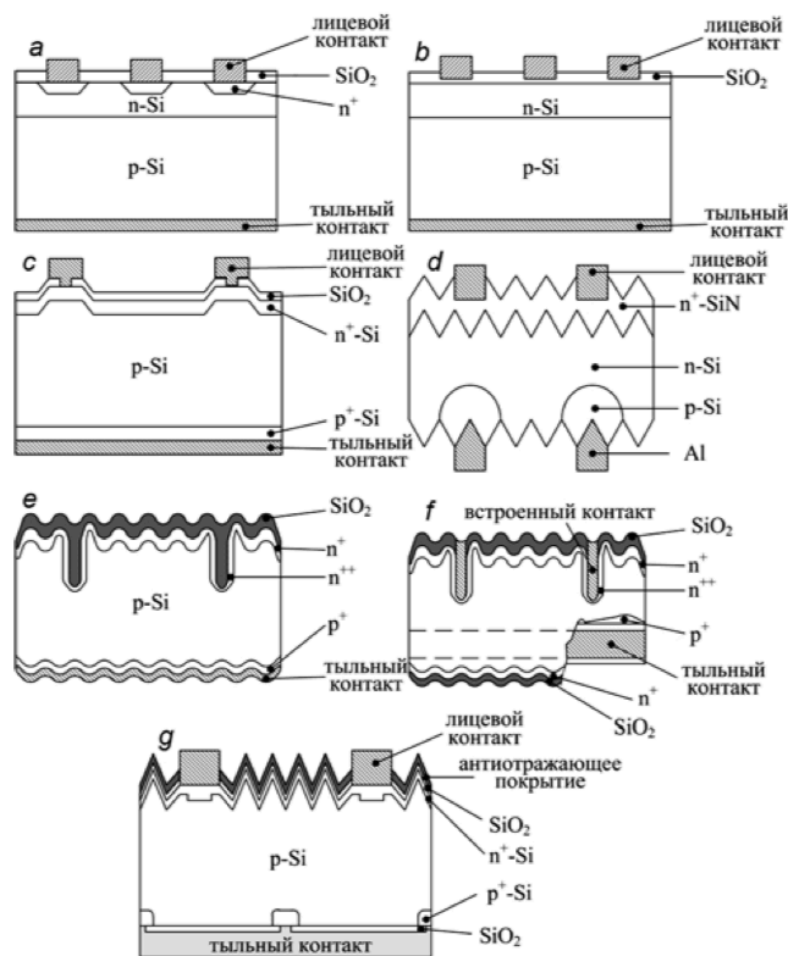


Рис. 1.7 Різноманітні типи з с-Si-СЕ: а- простий р-n-перехід; б- металізолятор-n-p-структура; в- СЕ з пасивованим емітером; г- дволицевий СЕ; д- структура з одностороннім вбудованим контактом; е- структура з двостороннім вбудованим контактом; ж- структура з пасивованим емітером і локально-дифузійним тильним контактом

Стрічковий кремній вирощують з кремнієвого розплаву через графітовий пуансон, або у вигляді мембрани між двома паралельно зростаючими обмежуючими кристалічними дендритами, або вирізують лазерним променем з октагональної труби, витягуємої з розплаву кремнію. Для зменшення впливу активних дефектів в полікристалічних матеріалах використовуються добавки H, Li, Al, As, P.

З метою кращого використання матеріалу активно розробляються СЕ з поглиначем на основі тонкоплівкового кремнію (tf-Si-CE), що наноситься методом CVD (хімічне осадження з газової фази) на підкладки різних типів (кремній, сталь, SiO₂ і інші). Однак в силу малого коефіцієнту поглинання Si плівки повинні мати значну товщину (до 50 мкм). При цьому зменшення товщини плівки відображається на ККД СЕ [44-47]. Існує кілька типів конструкції для СЕ на основі тонкоплівкового кремнію, основні з них представлені на рис. 1.8.

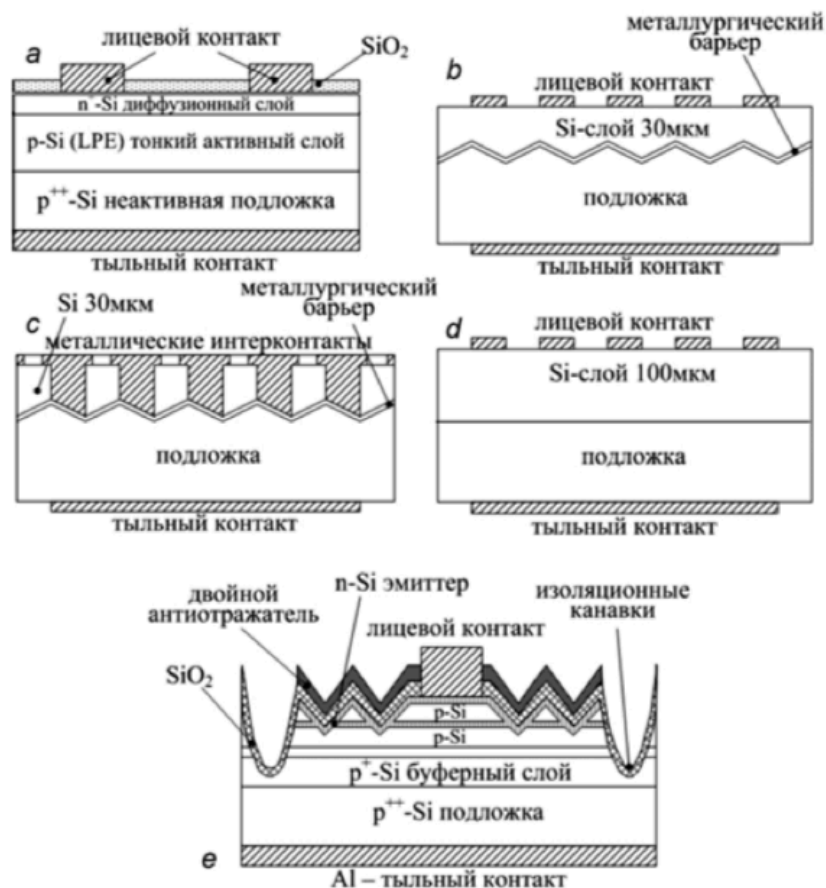


Рис. 1.8 Структура основних типів тонкоплівкових кремнієвих СЕ: а- СЕ з пасивованим емітером і мікроканавками; б- СЕ на плівковому кремнії; с- міжконтактний СЕ на плівковому кремнії; д- СЕ на тонкоплівковому кремнії; е- тонкоплівковий багатосаровий СЕ з перекинuto пірамідальною поверхнею з пасивованим емітером.

Етапи виготовлення кремнієвих СЕ:

1. Контроль якості кремнієвого злитку (діаметр злитку може перебільшувати 15 см, а довжина - більше півметра)
2. Розділення на пластини [товщина їх зазвичай 0,5, з подальшим поліруванням і хімічною обробкою поверхні];
3. Обезжирення і очистка;

4. Травління (наприклад, поліруючи при 110°C в 40% -му розчині NaOH + H₂O, потім можна використовувати травитель, що створює текстуровану поверхню)
5. Кінцева очистка (чергування очистки в розчинах HCl - H₂O і HF і промивки)
6. Проведення двосторонньої дифузії фосфору (із суміші газів PH₃ + Ar + O₂ при 865 °C протягом 15хв)
7. Видалення склоподібного шару дифузанта шляхом травки в HF (плавикова кислота);
8. Нанесення осаду Al товщиною 50 нм на тильну поверхню методом випаровування в вакуумі;
9. Проведення дифузії Al (для створення р-шару) при 500 °C протягом 15хв (через n-шар на тильній поверхні)
10. Маскування для створення малюнка струмозійомної сітки (з допомогою фотолітографії або тіньової маски)
11. Осадження Ti, Pd и Ag на лицеву і тильну поверхні;
12. Видалення маски;
13. Фінальний отжиг контактів приблизно при 550 °C протягом 10хв;
14. Занурення в припой;
15. Осадження просвітлюючого покриття и подальше впікання при 450 °C протягом 1 хв;
16. Різка на прямокутники и обробка торців (видалення дифузійних закортоток по торцях)
17. Контроль якості і відправка на виготовлення сонячних батарей.

Приведена приблизна схема виготовлення СЕ. Кількість таких технологічних напрямків досить велика і розробник сам вибирає необхідну технологію [48].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТНОСТІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Розробка нових та вдосконалення вже існуючих систем електроживлення на основі ФЕСБ неможливі без ефективних методів та засобів контролю, застосування яких має супроводжувати весь життєвий цикл системи та забезпечувати об'єктивну оцінку прийнятих технічних рішень і результатів розробки, вимірювання експлуатаційних характеристик, контроль дефектів і деградації тощо. Кремній є в наш час основним матеріалом сонячної енергетики [15].

Дефекти в сонячних елементах панелей можна розділити на дві основні групи - електрично активні і електрично неактивні (місця локального перегріву, мікротріщини, пошкодження захисного скла та ін., які виникають в процесі виробництва, а також внаслідок зовнішніх впливів) [37]. Ефективність перетворення енергії сонячними елементами безпосередньо пов'язана з кількістю і характером дефектів сонячних панелей. Присутність дефектів призводить до погіршення експлуатаційних характеристик - зниження напруги холостого ходу і коефіцієнта заповнення, що в свою чергу, знижує ефективність перетворення сонячної енергії в електричну (ККД).

У теперішній час використовуються такі методи контролю дефектів як скануюча зондова мікроскопія, рентгеноскопія, спектроскопічна еліпсометрія, термографія та інші. Використання методів скануючої зондової мікроскопії та спектроскопічної еліпсометрії вимагає поверхонь, яких зазвичай немає у фотовольтаїчному матеріалів. Тому розглянемо телевізійний та термографічний методи.

2.1. Телевізійний метод контролю електролюмінісцентних дефектів.

Причиною появи дефектів є утворення паразитних світлодіодних структур на фосфіді алюмінію внаслідок недосконалості технології нанесення шин живлення на поверхню кремнієвої пластини.

Сучасні телевізійні засоби вимірювання дозволяють одночасно забезпечити високі показники максимального формату вибірки, мінімального часу її формування та роздільної здатності, а обов'язкова наявність у складі телевізійного засобу вимірювання (ТЗВ) комп'ютера дозволяє досить гнучко використовувати велику кількість методів формування, обробки і аналізу зображення для поліпшення точнісних показників. На рис. 2.1 зображено загальний вигляд лабораторного телевізійного стенда для досліджень дефектів електролюмінісцентної природи. Де 1- КДЖ (каскадне джерело живлення), 2- оптична лава, 3 – сонячна панель, 4 – телевізійна камера, 5 – штатив, 6 – ізолюючий екран, 7 – ПК, 8 – ЛАТР (лінійний автотрансформатор).

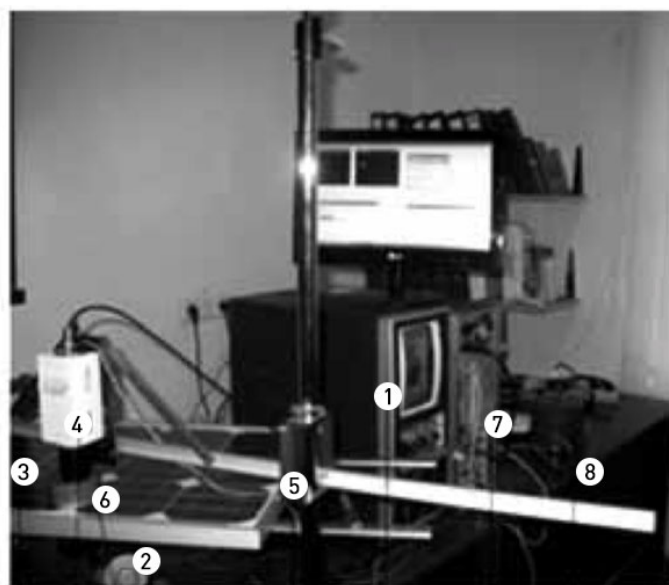


Рис. 2.1 Загальний вигляд лабораторного телевізійного стенда для досліджень дефектів електролюмінісцентної природи

Люмінесценція – це явище випромінювання світла, яке є надлишковим над тепловим випромінюванням. Кристалічні речовини, яким властива люмінесценція, називають фосфорами. Електролюмінесценція – це люмінесценція, яка виникає під дією різниці потенціалів, що прикладена безпосередньо до фосфору [49].

Фізично робота телевізійного методу базується на послідовності перетворень вхідного сигналу в цифровий сигнал, пропорційний його амплітуді (цифрове зображення). Вхідним сигналом для системи, до складу якої крім камери, входить ПК з програмним забезпеченням OWLEYE, є яскравість L потоку, що несе інформацію про структуру, властивості і стан об'єкта контролю (дефекту).

Для визначення яскравості електролюмінесцентних випромінювання дефекту можна скористатися формулою:

$$L = e^{-\frac{c}{U^{0,5}}}, \quad (2.1)$$

де U - значення прикладеної напруги, c - коефіцієнт, який залежить від температури.

Методика експерименту полягає в подачі постійної зворотної напруги з каскадного джерела живлення на сонячну панель, в результаті чого виявляються, а потім реєструються і досліджуються електрично активні дефекти, що мають електролюмінесцентну природу.

Характерні приклади світіння дефектів сонячних панелей при подачі постійної зворотної напруги з КДЖ наведені на рис. 2.2.

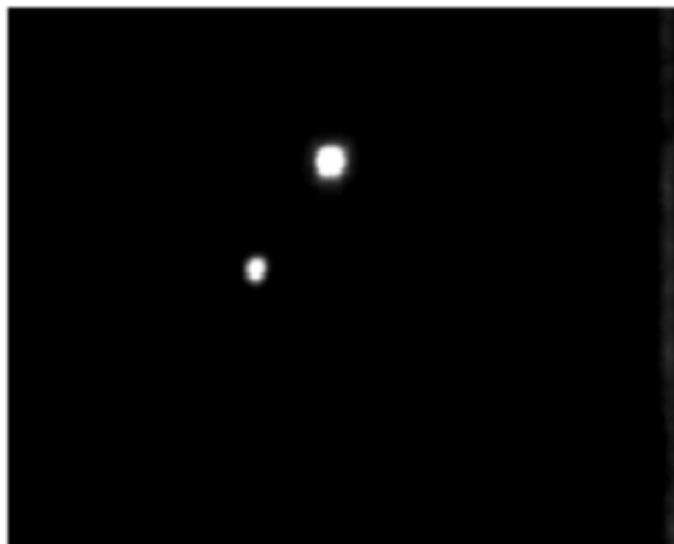


Рис. 2.2 Приклади світіння дефектів сонячних панелей при подачі постійної зворотної напруги з КДЖ

Метод дозволяє визначати геометричні розміри і форми дефектів, а також втрати на дефектах за допомогою ТЗВ [49].

2.2. Метод діагностики СЕ на основі нагрівання прямим струмом.

Як зазначено в [50], ІЧТ об'єктів досі залишається якісним методом. Для визначення розмірів і координат дефектів на поверхні об'єкту контролю в наш час відсутні підходи до створення програмно-апаратних засобів, які б дозволяли за розподіленням температури на початкових термограмах оцінювати технічний стан об'єктів в умовах експлуатації. Основними задачами досліджень для вирішення даної проблеми [51] є:

- застосування контролю дефектів в умовах стаціонарного режиму формування температурного поля, цей метод характерний для об'єктів з постійними внутрішніми джерелами тепла;

- термографія дефектів в умовах створення нестационарного теплового поля при зовнішній тепловій дії на об'єкт;
- розробка стандартних та контрольних зразків для термографічного контролю;
- розробка нових лазерно-термографічних приладів контролю для задач теплової дефектометрії;
- вдосконалення алгоритмів розрахунку площі дефектів та побудови 2D або 3D сітки розрахованих дефектів.

При застосуванні термографії границю дефекту на термограмі визначають за температурним контрастом або «сигналом від дефекту»[51].

Останнім часом для виявлення дефектів СЕ використовують нагрівання темновим струмом [52].

Нагрівання СЕ здійснюють темновим струмом, який пропускають через елемент, з'єднавши його із зовнішнім джерелом живлення. Для прямого темнового струму типовим є режим:

- напруга від +0,5 до +0,6 В;
- щільність струму від 0 до 30 мА/см².

На термограмі спостерігають осередки перегрівання в місцях розташування дефектів, а також під контактними шинами СЕ.

При цьому за допомогою термографа були отримані зображення СЕ, на поверхні яких візуально ідентифікують зони локального перегріву, що знаходяться, в місцях розташування дефектів.

Інфрачервоний термограф побудований на основі фотоприймальної камери та персонального комп'ютера і має такі параметри та характеристики:

- матриця камери має 320 x 232 пкс;
- діапазон спектральної чутливості камери 2-5,3 мкм;

- температурна чутливість $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- охолодження матриці здійснюють рідким азотом (0,8 л на 6 годин неперервної роботи).

Особливістю методу, яким користується автор [53], є нагрівання СЕ прямим темновим струмом від зовнішнього джерела. Отримані зображення температурного поля поверхні СЕ мають локальні місця із підвищеною температурою. Місця локального перегріву мають темне забарвлення (рис.2.3).

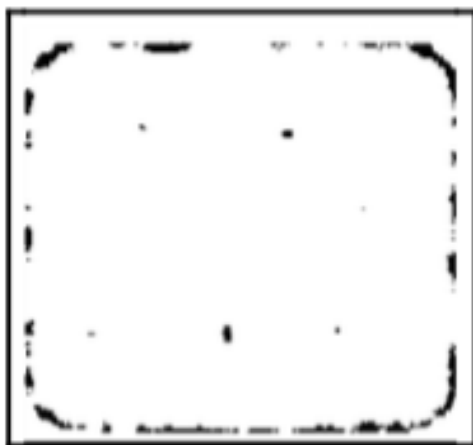


Рис. 2.3 Термограма поверхні СЕ, нагрітого прямим темновим струмом від зовнішнього джерела напруги $0,55\text{ В}$, автор Ali Ibrahim

Видно, що окрім місць дефектів (точок перегріву у вигляді темних плям) додатково нагріваються також шини живлення у периферійній частині СЕ, оскільки вони мають відносно малий опір. Головною метою методу [53] є виявлення місць утворення паразитних діодів Шоттки, які виконують роль шунтів до СЕ.

Для аналізу методу розглянемо розширену еквівалентну схему СЕ, яка складена із діода, послідовного опору R_{II} та опору шунта R_{III} . В

запропонованому нами варіанті еквівалентної схеми враховано додатково опір дефекту $R_{\text{деф}}$ та опір діоду у відкритому стані $R_{\text{діоду}}$ (рис. 2.4).

Величини опорів еквівалентної схеми (Рис.2.4) мають співвідношення:

$$R_{\text{п}} < R_{\text{діоду}} \ll R_{\text{деф}} < R_{\text{ш}} \quad (2.2)$$

СЕ – це фотодіод, який має розподілену по площі структуру. Якщо представити цю структуру як сукупність діодів із паралельним з'єднанням, то при прямому включенні струм пройде переважно через ті діоди, які мають найменший опір $R_{\text{діоду}}$ або через місця дефектів типу паразитних діодів Шотткі [52-53].

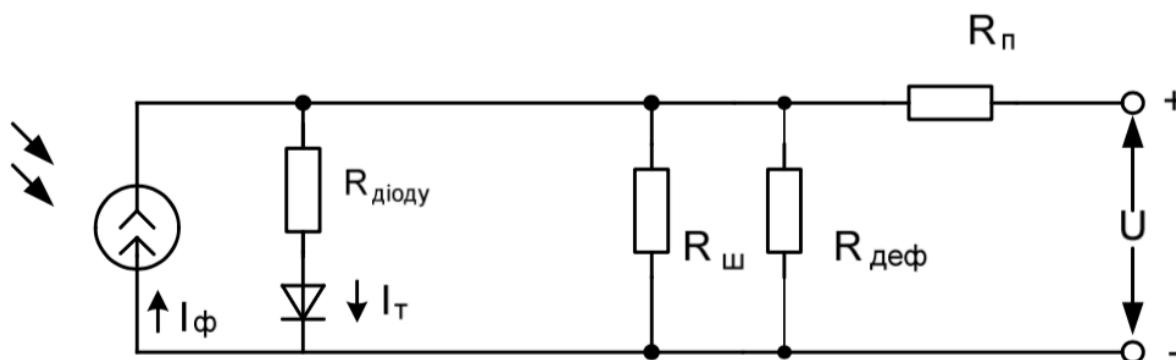


Рис. 2.4 Еквівалентна схема сонячного елемента за наявності дефекту; де

$I_{\text{ф}}$ – фотострум, $I_{\text{т}}$ – темновий струм

При протіканні прямого темнового струму від зовнішнього джерела фотострум відсутній, а темновий струм розпадається на три гілки: струм через шунт $I_{\text{тш}}$, струм через дефект типу пробую $I_{\text{тдеф}}$ та струм через діод $I_{\text{тдіоду}}$. За наявності дефекту типу паразитного діоду Шотткі, який є шунтом до СЕ, додатково утворюється четверта гілка темнового струму $I_{\text{деф.Шотткі}}$ (рис. 2.5).

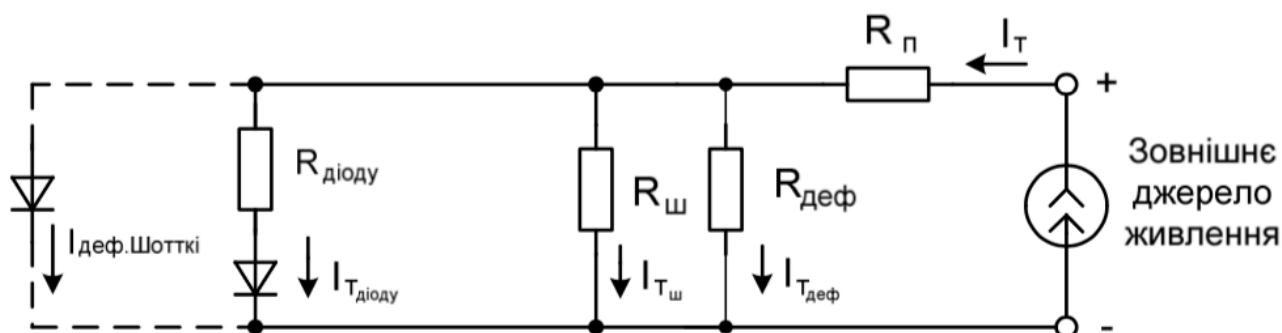


Рис. 2.5 Еквівалентна схема СЕ із прямим темновим струмом

Співвідношення між гілками темнового струму при прямому включенні СЕ за наявності дефекту типу паразитного діоду Шотткі мають вигляд:

$$I_{\text{деф.Шотткі}} > I_{\text{Tдіоду}} \gg I_{\text{Tдеф}} > I_{\text{Tш}} \quad (2.3)$$

Зазначимо, що пошук дефектів СЕ за методом нагрівання прямим темновим струмом є дуже корисним при діагностиці сонячних панелей, які побудовані на основі паралельного з'єднання СЕ. В цьому випадку дефектний СЕ буде виконувати роль шунта для всіх своїх сусідів, які мають з ним паралельне з'єднання.

Але при послідовному з'єднанні СЕ, характерному для більшості сонячних панелей малої і середньої потужності, дуже важливою є діагностика на наявність дефектів, які утворились внаслідок електричного пробою і мають резистивний характер. Такої діагностики розглянутий вище метод не забезпечує. В цьому полягає обмеженість запропонованого в [53] рішення і необхідність розробки та застосування іншого методу.

2.3. Метод нагрівання СЕ зворотним темновим струмом.

В роботі запропоновано здійснювати нагрівання СЕ темновим струмом за схемою зворотного включення, тобто зворотним темновим струмом і вимірювати при цьому температурне поле на його поверхні за допомогою інфрачервоного термографу.

За цим методом можна виявляти дефекти типу електричного пробою, які мають резистивний характер, тобто є додатковими шунтовими опорами СЕ. Оскільки ці дефекти є по суті лінійними опорами, то зворотний темновий струм СЕ лінійно залежить від напруги. Це дозволяє підтримувати стабільною потужність нагріву і створює умови для відтворення стаціонарного режиму теплопередачі в СЕ при серійних вимірюваннях.

При виникненні електричного пробою в масиві напівпровідника виникає додатковий шунтовий опір. При цьому загальний опір шунтів зменшується (шунтові опори з'єднані паралельно), струм через шунтові опори збільшується і на цю ж величину зменшується струм, який віддає сонячний елемент у коло навантаження. Коефіцієнт корисної дії сонячного елемента зменшується, а сам він перегрівається в місці появи електричного пробою.

Еквівалентна схема СЕ для запропонованого нами методу його нагрівання зворотним темновим струмом наведена на рисунку 2.6.

Темновий струм I_T розпадається на дві гілки і тече переважно через опір дефекту $R_{\text{деф}}$, оскільки той має менше значення опору у порівнянні із опором шунта $R_{\text{ш}}$. При цьому методомі струм не тече через дефекти типу шунтових діодів Шотткі, оскільки на них подають зворотну напругу (рис. 2.6).

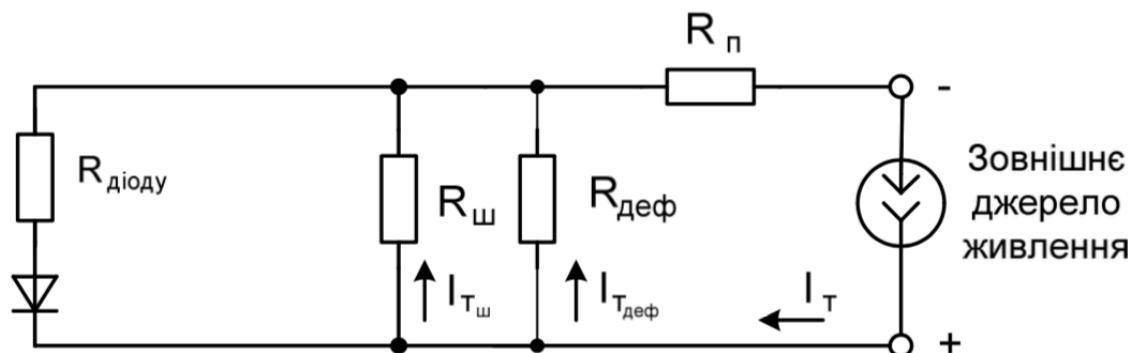


Рис. 2.6 Еквівалентна схема СЕ із зворотним темновим струмом

Дефекти впливають на форму ВАХ СЕ. За наявності дефектів ВАХ СЕ буде тим більше відхилятися від ідеальної форми, якою є прямокутник, чим більша кількість цих дефектів і чим меншою є величина опору шунта (рис. 2.7) [52].

Попереднє отримання ВАХ прискорює діагностику СЕ на наявність дефектів, оскільки для термографічного методу доцільно обирати перш за все ті зразки, які мають «завал» ВАХ (зразки 1 та 2 – рис. 2.7).

При нагріванні темновим струмом від зовнішнього джерела живлення U_3 (полярність джерела при цьому має бути зворотною) місця пробою будуть додатково нагріватись із потужністю:

$$P_{\text{нагр.дод}} = \frac{U_3^2}{R_{\text{деф}}}, \quad (2.3)$$

На зображеннях поверхні СЕ, отриманих за допомогою інфрачервоного термографа, виявляють локальні області із підвищеною температурою, які свідчать про наявність дефектів типу електричного пробою всередині СЕ саме під місцями їх розташування. Вимірювання температурного поля СЕ в процесі нагрівання його темновим струмом дозволяє визначати координати місць локального перегріву («гарячих

точок») поверхні СЕ над дефектами типу електричного пробоя р-п переходу як в лабораторних умовах, так і в умовах експлуатації.

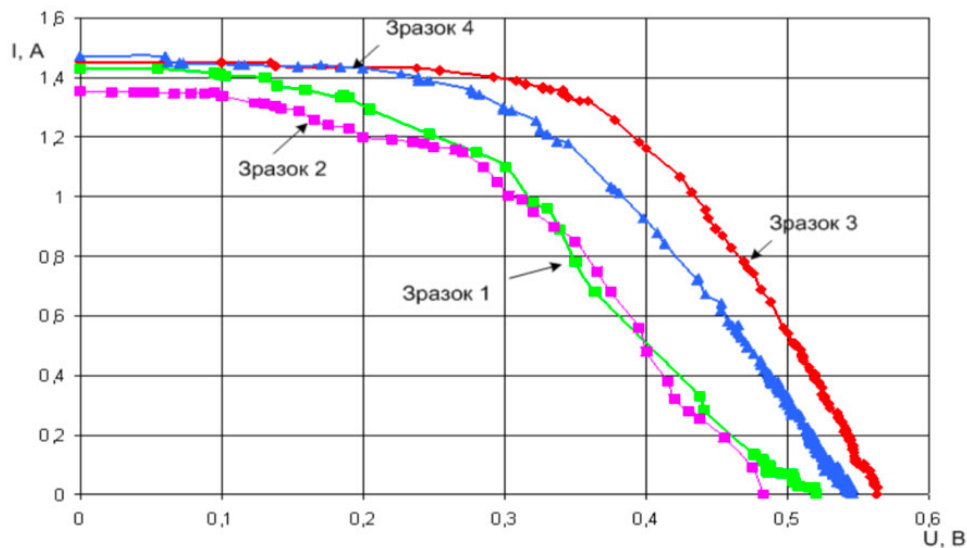


Рис. 2.7 ВАХ зразків СЕ із різною величиною опору шунта

На основі запропонованого автором методу термографії СЕ [52] при нагріванні зворотним темновим струмом розроблена методика вимірювання температурного поля, яка дозволяє виконувати діагностику дефектів СЕ, зокрема:

- встановлювати координати;
- вимірювати температуру;
- оцінювати.

РОЗДІЛ 3. ОСНОВНІ ВИДІВ ДЕФЕКТІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХ ТЕРМОГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ

3.1. Контроль дефектів фотоелектричних сонячних батарей методом інфрачервоної термографії

ІЧТ є одним із основних методів візуалізації дефектів при нагріванні поверхні об'єкту дослідження. Нерівномірність температурного поля свідчить про наявність дефектів, які є джерелами додаткового локального нагрівання і впливають на величину ККД. Інфрачервона термографія використовується в різних галузях. Відомо, що дефекти при подачі на них зворотнього струму є джерелом випромінення тепла. Найкращим методом для спостереження наявності та розташування цих дефектів є дистанційна інфрачервона термографія. В наш час метод розроблений для різних застосувань і, зокрема, для контролю СЕ. Якщо СЕ не містить дефектів то не спостерігається локального перегріву окремих ділянок. Нагрівання СЕ здійснювали темновим струмом, який подавали на елемент, з'єднавши його із зовнішнім джерелом живлення. Для прямого включення типовим є режим:

- напруга від +0,5 до +0,6 В;
- щільність струму від 0 до 30 мА/см².

За результатами досліду знімались термограми поверхні СЕ (в рамках ітераційної моделі) вольт-амперних характеристик локальних місць нагрівання, в яких зосереджені дефекти типу паразитних діодів Шотткі. За вольт-амперними характеристиками визначають такий важливий експлуатаційний параметр, як коефіцієнт прямокутності (коефіцієнт форми).

Зменшення коефіцієнту форми свідчить про деградацію СЕ. Зазначимо, що даний метод неможливо застосувати для контролю ФЕСБ, оскільки в них 36 або більше елементів з'єднані послідовно і неможливо задавати та вимірювати напругу на окремому елементі. Проте, цей метод може бути дієвим при застосуванні імпульсного режиму нагрівання темновим струмом. В роботі в основному досліджувалось наявність дефектів окремих СЕ з яких в подальшому виготовлялись сонячні батареї. СЕ, які мали дефекти в подальшому не використовувались для виготовлення ФЕСБ.

При зворотному включенні СЕ струм тече через його шунтовий опір. За наявності дефектів типу електричного пробоя, а також ЕЛД точок (технологічних дефектів поблизу контактних шин) на поверхні також утворюються місця локального перегріву. Термограма дозволяє візуалізувати місця дефектів та оцінити їх вплив на якість СЕ. Для зворотного включення типовим режимом є:

- напруга від -9 до -20 В;
- середня щільність потужності $0,1 \text{ Вт/см}^2$, що еквівалентно до нагрівання від Сонця за стандартом AM1.5 [54].

На рис.3.3 приведена термограма СЕ без дефектних ділянок.

Для термографічного контролю ФЕСБ потрібно подавати зворотню напругу до 1000 В. Було використано регульоване каскадне джерело живлення з вихідною потужністю 400 Вт. Регулювання вихідної напруги здійснювалось в діапазоні від 0 до 1000 В. За допомогою цього джерела були отримані термограми моно- (рис. 3.1) та полікристалічних (рис. 3.2) кремнієвих ФЕСБ.

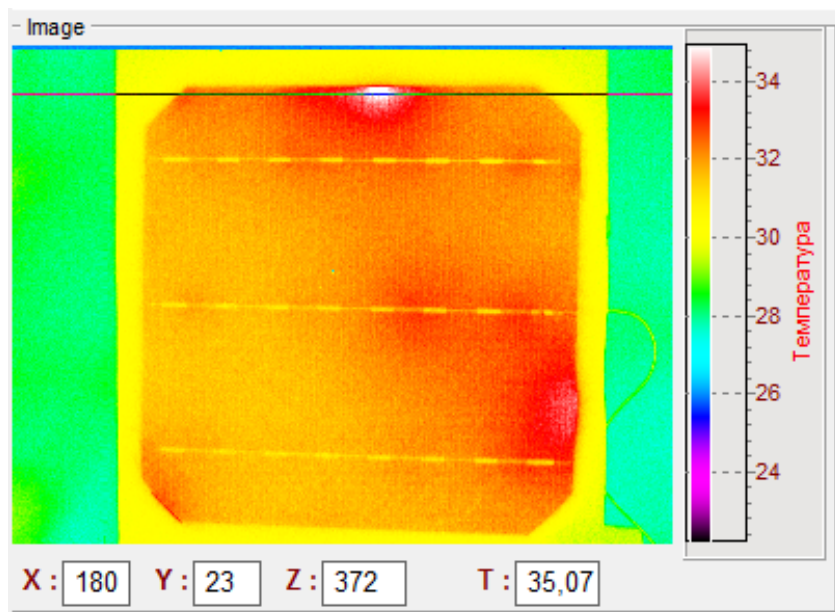


Рис. 3.1 Термограма СЕ із монокристалічного кремнію без дефектних ділянок

В якості прикладу, на рис.3.2 наведена термограма СЕ виготовленого на полікристалічному кремнії, з дефектною ділянкою у центрі [37].

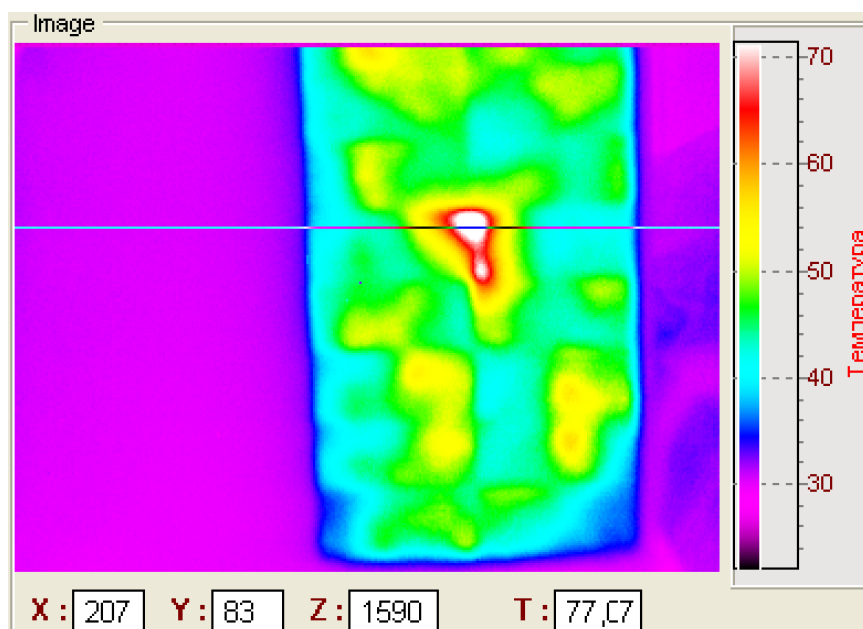


Рис. 3.2 Термограма СЕ потужністю 60 Вт із полікристалічного кремнію

Наявність білої плями в центрі зображення свідчить про наявність дефекту. Градієнт температури в зоні дефекту сягає 2 град/піксель. Дефект унеможлиблює проведення PID – тесту [55], за умовами якого ФЕСБ випробують 48 годин безперервно під зворотною напругою. Проведення цього тесту є частиною вихідного контролю на виробництві ФЕСБ. Після проведення тесту до реалізації надходять лише ті вироби, ККД яких зменшився на 0–15 %. Всі інші мають бути утилізовані.

Таким чином, застосування ІЧТ при нагріванні зворотним темновим струмом може бути складовою періодичного контролю ФЕСБ в умовах експлуатації, а не тільки при виробництві.

3.2. Розрахунок теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї

Експерименти з візуалізації температурних полів СЕ реалізовано у навчально-науковій лабораторії неінвазивних методів дослідження біологічних об'єктів КПІ імені Ігоря Сікорського. Стенд для вимірювання температурного поля СЕ побудовано на основі інфрачервоного термографа (рис. 3.3), з'єданого із персональним комп'ютером (рис.3.4). Термограф налаштовано на вимірювання температури в діапазоні 20-70°C.

Інфрачервоний термограф побудований на основі фотоприймальної камери та персонального комп'ютера і має такі параметри та характеристики:

- матриця камери має 320 x 232 пкс;
- діапазон спектральної чутливості камери 2-5,3 мкм;
- температурна чутливість 0,07 °С;
- охолодження матриці здійснюють рідким азотом (0,8 л на 6 годин неперервної роботи).



Рис. 3.3 Інфрачервоний термограф

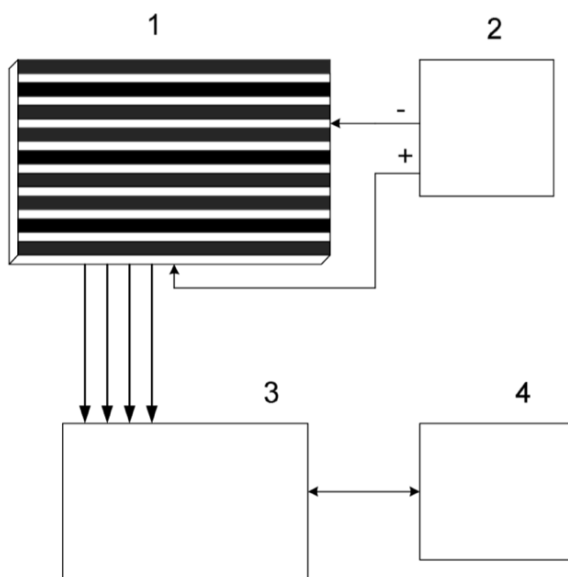


Рис. 3.4 Електрична схема структури стенду для вимірювання температурного поля СЕ; де 1 – сонячний елемент, 2 – лабораторний блок живлення, 3 – термограф, 4 – персональний комп'ютер

Об'єктом дослідження були три зразки СЕ на основі кристалічного кремнію виробництва компанії Wacker Schott Solar GmbH (Німеччина), з яких в подальшому виготовляли сонячні батареї в режимі подачі зворотного струму.

Метод перевірки шляхом пропускання зворотного темного струму застосовують також при вихідному контролі ФЕСБ в умовах виготовлення. Даний метод називається PID (Power induced Test) .

В ході проведених досліджень [55] були відтворені умови PID-тесту для ФЕСБ з метою термографічного контролю дефектів по локальним неоднорідностям температурного поля її поверхні.

Оцінка роздільної здатності термографічних зображень здійснювалась наступним чином: ширина нагрітої частини ФЕСБ становить 302 мм, на котрі припадає 152 піксела (рис. 3.5). Таким чином, один піксель відображає квадрат з розмірами 2мм x 2 мм.

На рисунку 3.5 наведено термограму ФЕСБ з полікристалічного кремнію, потужністю 60 Вт (зразок №1).

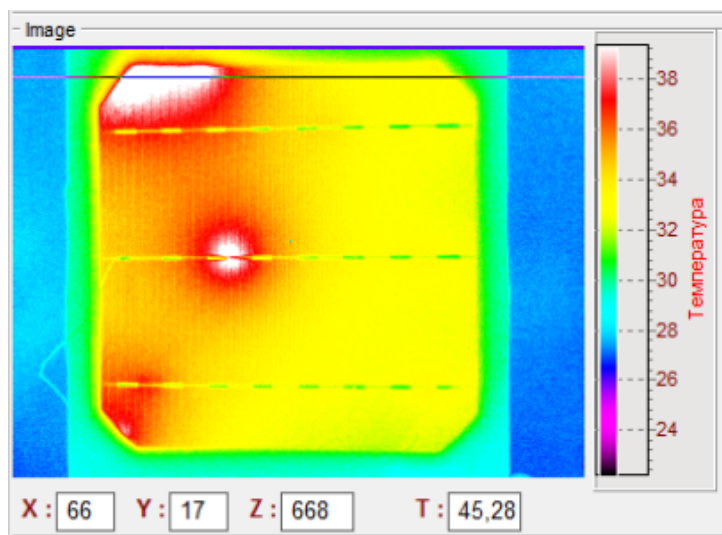


Рис. 3.5 Термограма ФЕСБ: матеріал – полікристалічний кремній; номінальна потужність 60 Вт; підключена половина ФЕСБ; напруга 670 В; темновий струм 500 мА; максимальна температура в центрі зони дефекту становить 45,28 °С; границя жовтий-зелений має температуру 32 С; границя білий-червоний - 40 °С

Далі термограма була збільшена програмою Adobe Photoshop СС та підготовлена для подальшої попиксельної обробки. Обробка зображення в графічному редакторі показала, що дефект насправді має складну структуру та складається з трьох відмінних за величиною областей (рис. 3.6).

Пікселі зони дефекту були відсортовані по абсолютній середній температурі для кожного відтинку: T_i – середня температура в підзоні з номером i в Кельвінах; N_i – кількість пікселів в i -той підзоні. Розподіл пікселів за температурою наведено в таблиці 3.1. та рисунку 3.7.

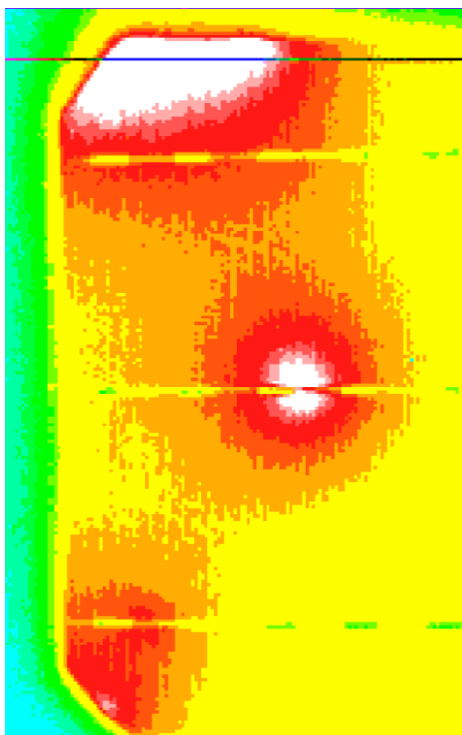


Рис. 3.6 Зона дефекту ФЕСБ: збільшення 500%; градація температур по відтинкам пікселів з кроком 3 °С; границя зелений-жовтий має температуру 32 °С.

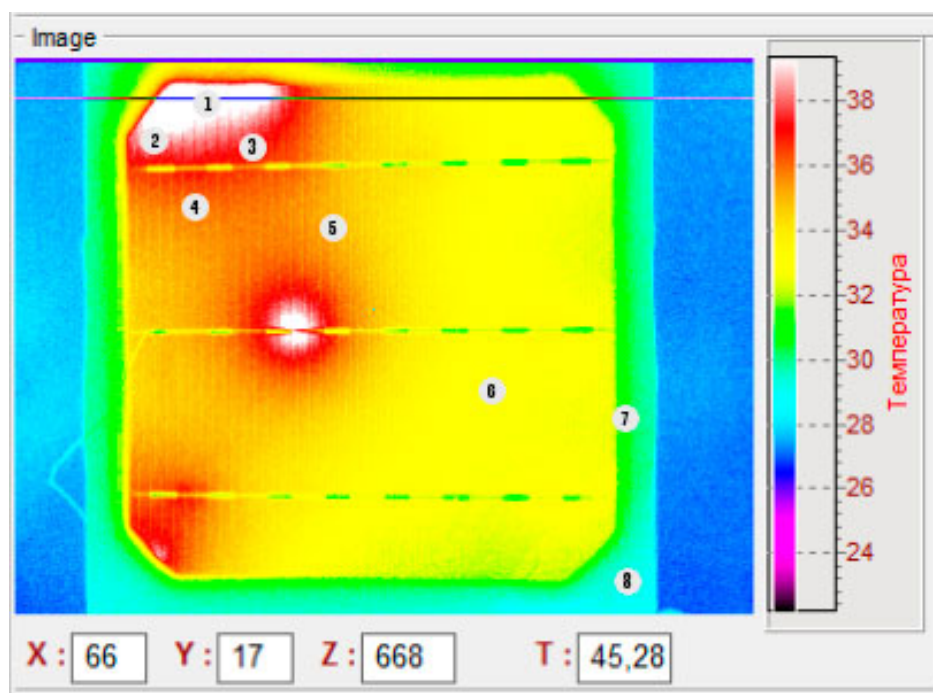


Рис. 3.7 Розподіл пікселів по температурних областях зони дефекту

Таблиця 3.1 Розподіл пікселів по температурних областях зони дефекту

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| T_i, K | 318,43 | 313,15 | 310,15 | 308,65 | 307,25 | 306,15 | 304,15 | 302,5 |
| N_i | 1095 | 2170 | 2105 | 3260 | 6615 | 30997 | 2300 | 6464 |

На рисунку 3.8 наведено термограму ФЕСБ з полікристалічного кремнію, потужністю 60 Вт (зразок № 2).

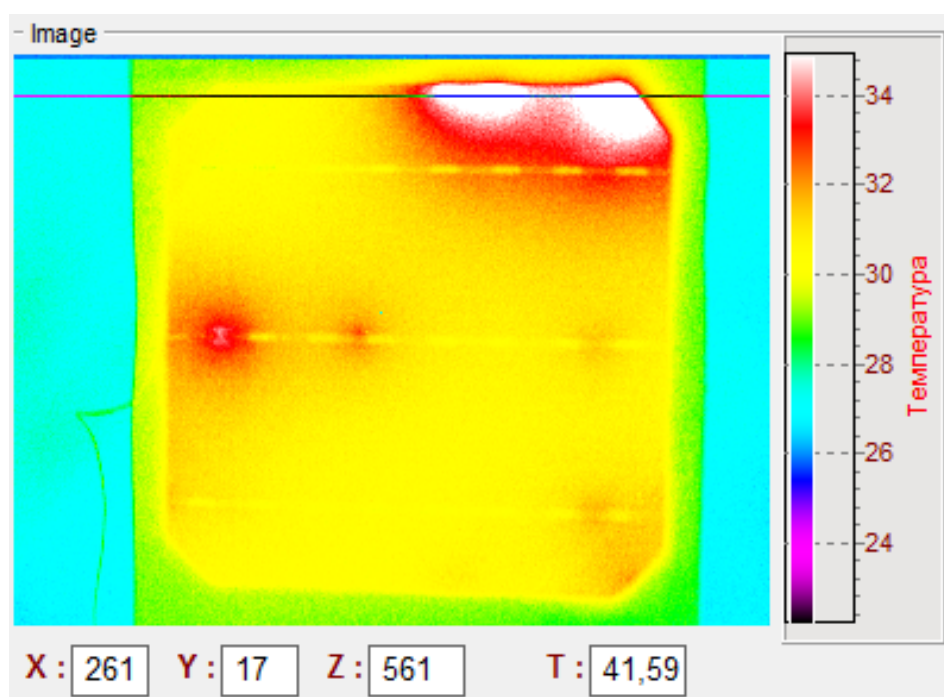


Рис. 3.8 Термограма ФЕСБ: матеріал – полікристалічний кремній; номінальна потужність 60 Вт; підключена половина ФЕСБ; напруга 670 В; темновий струм 600 мА; максимальна температура в центрі зони дефекту становить 41,59 °С; границя жовтий-зелений має температуру 30 С; границя білий-червоний – 35 °С

Обробка зображення в графічному редакторі показала, що дефект насправді має складну структуру та складається з трьох відмінних за

величиною областей. На рис. 3.9 наведений скріншот з збільшеною у 500 разів областю дефекту.

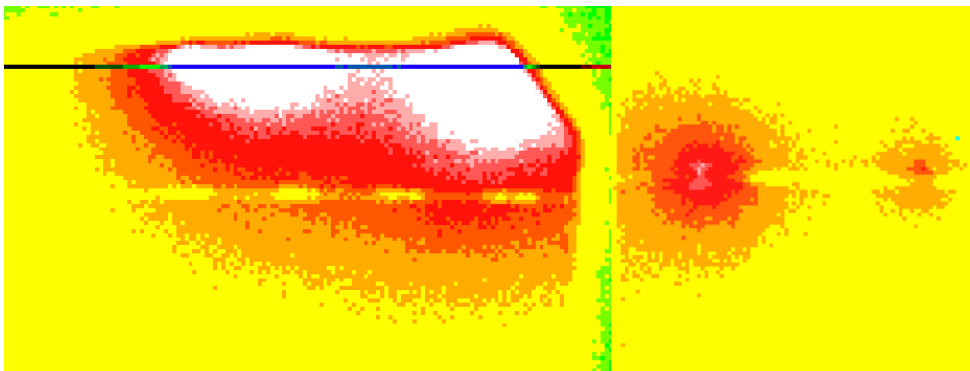


Рис. 3.9 Зона дефекту ФЕСБ: збільшення 500%; градація температур по відтинкам пікселів з кроком 3 °С; границя зелений-жовтий має температуру 30 °С.

Пікселі зони дефекту були відсортовані по абсолютній середній температурі для кожного відтинку: T_i – середня температура в підзоні з номером i в Кельвінах; N_i – кількість пікселів в i -той підзоні. Розподіл пікселів за температурою наведено в таблиці 3.2. та рисунку 3.10.

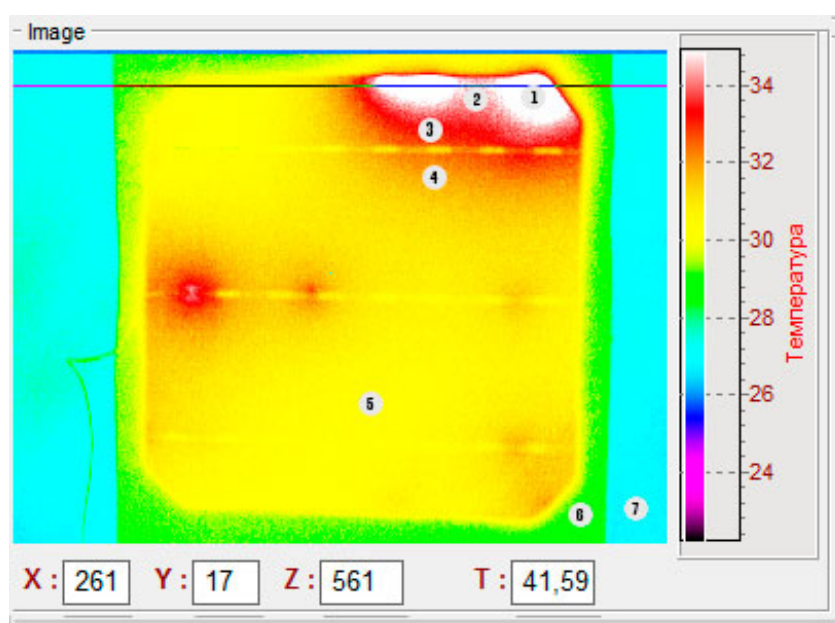


Рис. 3.10 Розподіл пікселів по температурним областям зони дефекту

Таблиця 3.2 Розподіл пікселів по температурним областям зони дефекту

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T_i, K | 314,74 | 307,15 | 306,51 | 305,31 | 304,32 | 302,15 | 300,15 |
| N_i | 1230 | 705 | 1337 | 2953 | 38975 | 4722 | 16825 |

На рисунку 3.11 наведено термограму ФЕСБ з полікристалічного кремнію, потужністю 60 Вт (зразок № 3).

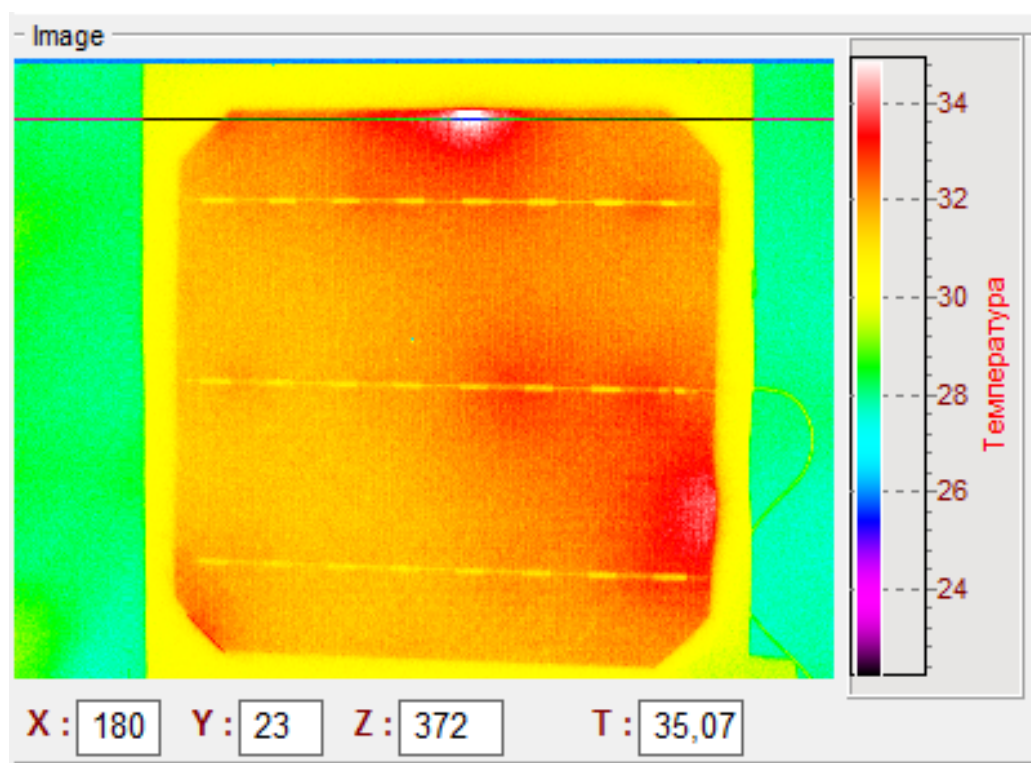


Рис. 3.11 Термограма ФЕСБ: матеріал – полікристалічний кремній; номінальна потужність 60 Вт; підключена половина ФЕСБ; напруга 670 В; темновий струм 300 мА; максимальна температура в центрі зони дефекту становить 35,07 °С; границя жовтий-зелений має температуру 29 °С; границя білий-червоний - 34 °С

Обробка зображення в графічному редакторі показала, що даний зразок є без дефектів (рис. 3.12).

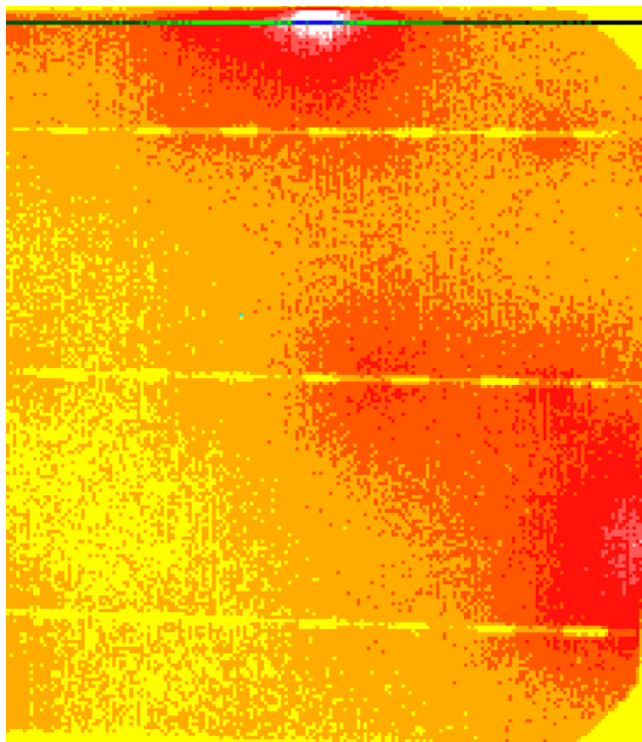


Рис. 3.12 Зона дефекту ФЕСБ: збільшення 500%; градація температур по відтинкам пікселів з кроком 3 °С; границя зеленій-жовтий має температуру 29 °С.

Градiєнт температури відносно ділянки найбільш високої температури не перевищував 0,5 градуси. Це говорить про те, що СЕ є високоякісним і його можна використовувати для виготовлення СБ.

Розподіл пікселів за температурою наведено в таблиці 3.3 та рисунку 3.13.

Таблиця 3.3 Розподіл пікселів по температурним областям зони дефекту

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T_i, K | 308,22 | 306,28 | 305,63 | 304,15 | 304,18 | 302,46 |
| N_i | 62 | 2430 | 6937 | 19871 | 16856 | 10660 |

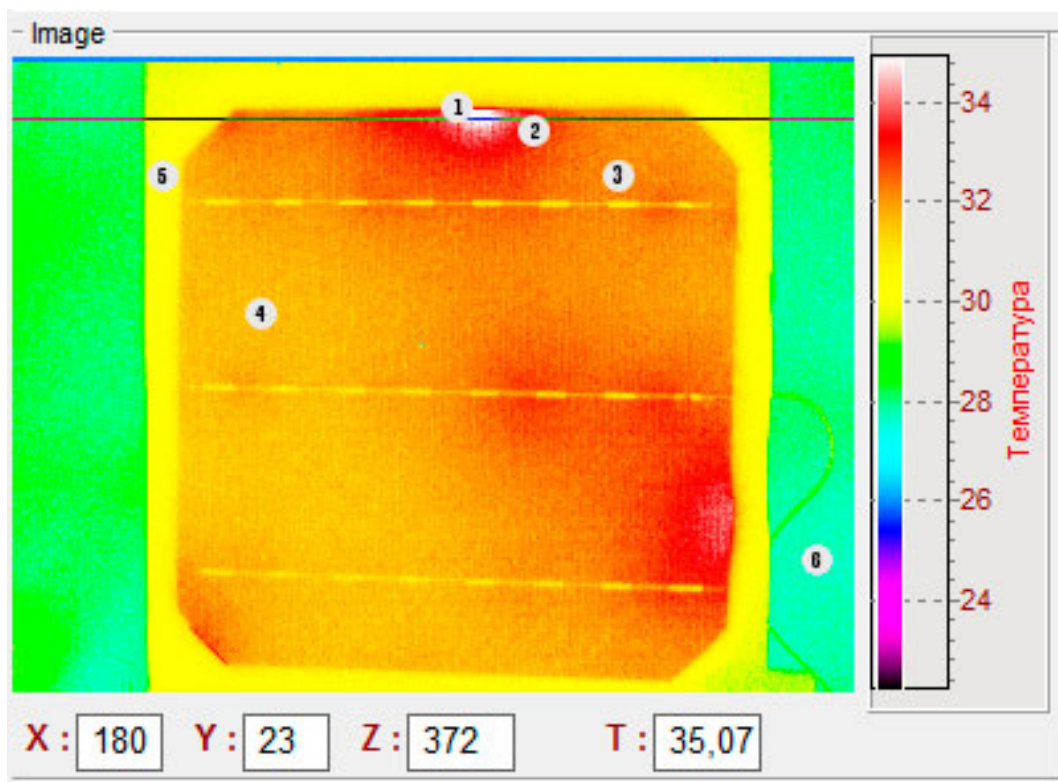


Рис. 3.13 Розподіл пікселів по температурних областях зони дефекту.

В зразку № 3 найменша кількість білих пікселів, що говорить про те що дефект не значний і даний сонячний елемент підходить для подальшого використання.

Баланс теплової потужності забезпечується стаціонарним характером теплообміну між нагрітою темновим струмом ФЕСБ та оточуючим середовищем. Стаціонарність процесу досягнута постійною величиною електричної потужності, що прикладається до ФЕСБ протягом тривалого часу (20 хвилин). Прикладена потужність дорівнює потужності теплового потоку від ФЕСБ до оточуючого середовища (повітря в лабораторії, де проводяться вимірювання).

Прикладена електрична потужність дорівнює:

$$P = 670 \text{ В} \cdot 0,17 \text{ А} = 114 \text{ Вт.}$$

Вся прикладена потужність перетворюється в теплову потужність ФЕСБ. Площа S нагрітої частини ФЕСБ складає половину загальної її поверхні і дорівнює:

$$S = 61 \cdot 30,5 = 1860,5 \text{ см}^2.$$

Середня густина теплового потоку ФЕСБ $\rho = P/S$; $\rho = 61,2 \text{ мВт/см}^2$. Потужність сонячного випромінювання, відповідає стандарту АМ1.5 дорівнює 100 мВт/см^2 , що має значення, наближене до умов описаного експерименту.

Визначимо теплову потужність дефекту як таку, що локалізована в зоні з густиною теплової потужності, яка перевищує середню густина для нагрітої частини ФЕСБ. При цьому розрахунок виконаємо для різниці температур: температури пікселя зони дефекту та середньої температури нагрітої зони ФЕСБ, яка в експерименті складає $47 \text{ }^\circ\text{C}$ (320 K).

Баланс теплообміну дефекту складають три механізми: теплопровідність, конвекція та радіаційне випромінювання. Перша компонента враховується автоматично, оскільки ми збільшуємо зону дефекту (теплова пляма «розповзається» в горизонтальній площині). Розрахунок проводимо для лицевої поверхні. Загальний тепловий потік дефекту повинен враховувати і теплообмін тильного боку ФЕСБ, тому в кінці розрахунку необхідно подвоїти отримане значення (вважаємо, що тепловий потік ФЕСБ симетричний відносно площини розділу лицевого та тильного боку).

Конвекційна компонента додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, при конвекційному теплообміні [56] дорівнює:

$$q_c = h_c S (T_d - T_1), \quad (3.1)$$

де T_d – температура в зоні дефекту;

T_1 – середня температура нагрітої частини ФЕСБ;

S – площа зони дефекту;

h_c – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі від скла до повітря;

$h_c = 5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [17].

Радіаційна компонента [56] додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, дорівнює:

$$q_r = \sigma S \varepsilon (T_d^4 - T_1^4), \quad (3.2)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – стала Стефана-Больцмана; ε – коефіцієнт чорноти скла; $\varepsilon = 0,937$ [57].

Загальну потужність дефекту виразимо як суму елементарних дефектів, що мають розмір одного пікселя та забезпечуючи конвекційний та радіаційний механізми теплообміну з оточуючим середовищем:

$$P_d = \sum_i (q_c^i + q_r^i) N_i, \quad (3.3)$$

Площа пікселю $S = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. В таблиці 3.4 надано зведені результати розрахунків теплових потоків пікселей з різною температурою у відповідності з формулами (3.2), (3.3).

Таблиця 3.4 Теплові конвекційний та радіаційний потоки для пікселей з різною температурою

| | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_i, \text{ К}$ | 328,5 | 331,5 | 334,5 | 337,5 | 340,5 | 343,5 | 346,5 | 349,5 | 352,5 |
| $q_c^i, \text{ мВт}$ | 0,17 | 0,23 | 0,29 | 0,35 | 0,41 | 0,47 | 0,53 | 0,59 | 0,65 |
| $q_r^i, \text{ мВт}$ | 0,246 | 0,338 | 0,432 | 0,529 | 0,628 | 0,73 | 0,835 | 0,942 | 1,053 |
| $q_c^i + q_r^i, \text{ мВт}$ | 0,416 | 0,558 | 0,722 | 0,879 | 1,038 | 1,2 | 1,365 | 1,632 | 1,703 |

Сумарний тепловий потік зони дефекту чільного боку ФЕСБ знаходимо як суму потоків всіх пікселей за відповідною формулою (3.3) та даними таблиць 3.3 та 3.4:

$$P_d = 1220 \text{ мВт.}$$

Після подвоєння величини теплового потоку з метою врахування тильного боку ФЕСБ маємо:

$$P_d^{\text{full}} = 2P_d = 2,44 \text{ Вт.}$$

Перевіримо баланс теплової потужності Q ФЕСБ при її нагріванні темновим струмом. Враховуючи симетричне відведення тепла від чільного та тильного боків ФЕСБ маємо:

$$Q = 2(Q_c + Q_r), \quad (3.4)$$

Конвекційна компонента теплового потоку ФЕСБ:

$$Q_c = h_c S_1 (T_1 - T_0), \quad (3.5)$$

де $S_1 = 0,186 \text{ м}^2$ – площа нагрітої частини ФЕСБ;

$T_0 = 293 \text{ К}$ – температура повітря в лабораторії під час проведення експерименту.

$$Q_c = 5 \cdot 0,186(320 - 293) = 25,1 \text{ Вт.}$$

Радіаційна компонента:

$$q_r = \sigma S_1 \varepsilon (T_1^4 - T_0^4), \quad (3.6)$$

$$q_r = 30,8 \text{ Вт.}$$

Тоді загальний тепловий потік ФЕСБ: $Q = 2(25,1 + 30,8) = 111,8 \text{ Вт.}$

Отримане значення загального теплового потоку ФЕСБ дуже близьке до значення прикладеної електричної потужності, що дорівнює 114 В. Відносна похибка розрахованої величини складає 1.9%.

Дефект, займаючи малу область ФЕСБ, може бути причиною значного локального перегріву (до 77°C) в порівнянні з середньою температурою (45°C). При цьому теплова потужність дефекту порівняно невелика (2.44 Вт на фоні 114 Вт прикладеної до ФЕСБ електричної потужності або 2% від підведеної потужності).

3.2.1. Методика визначення площі об'єкту на термограмі, яка розташована в зоні інтересу.

Було відкрито скрін термограми в програмі Adobe Photoshop CS. Збільшуємо зображення в 400 разів (величина збільшення вибрана для чіткого бачення границі дефекту) , для того щоб можна було визначити область дефекту для подальшого підрахунку його площі. Щоб чітко визначити границі кольорів, необхідно здійснити постеризацію зображення (рис. 3.14).

Постеризація дозволяє визначити кількість тональних рівнів для кожного каналу в зображенні, з подальшою прив'язкою пікселів зображення до найближчого відповідного рівня. Наприклад, якщо вибрати два тональних рівня для зображення в режимі RGB, це дасть шість кольорів: два для червоного, два для зеленого та два для синього каналу. Ця корекція використовувалась для отримання згладжених однотонних зон на рисунках.

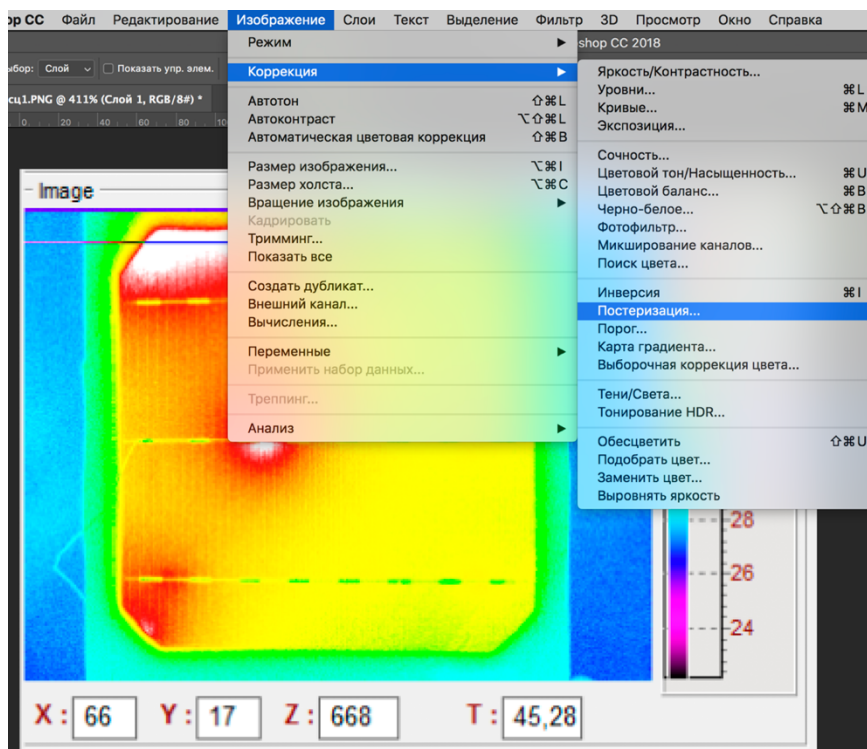


Рис. 3.14 Діалогове вікно з зображенням термограми з дефектними ділянками перед постеризацією.

Вибираємо рівень 4 (рівень постеризації), для якісного отримання переходу кольорів, без розмитих пікселів (рис. 3.15).

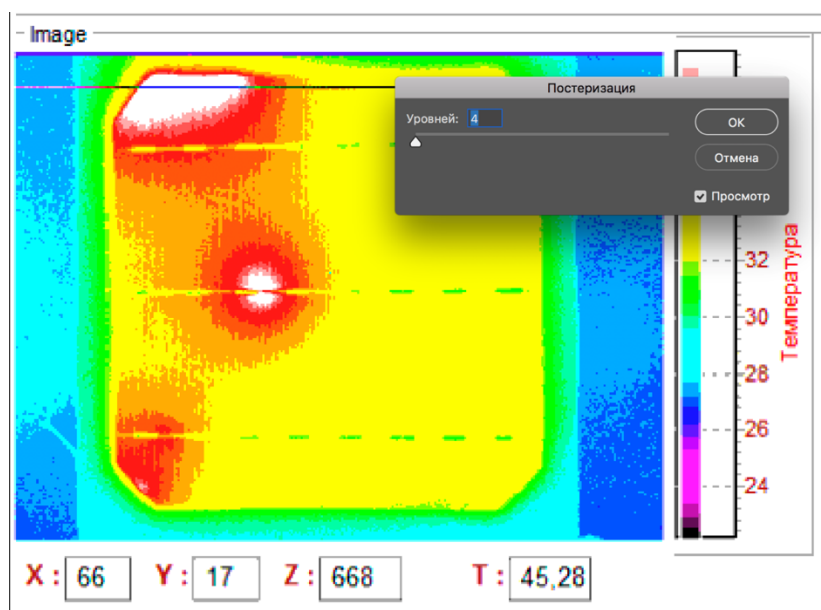


Рис. 3.15 Діалогове вікно вибору рівня постеризації

Збільшуємо зображення ще в 400 разів, для підвищення чіткості бачення області, площа якої рахуватиметься.

З допомогою інструменту «волшебная палочка» (рис. 3.16) виділяємо необхідний нам колір (рис. 3.17). Наприклад порахуємо кількість білих пікселів.

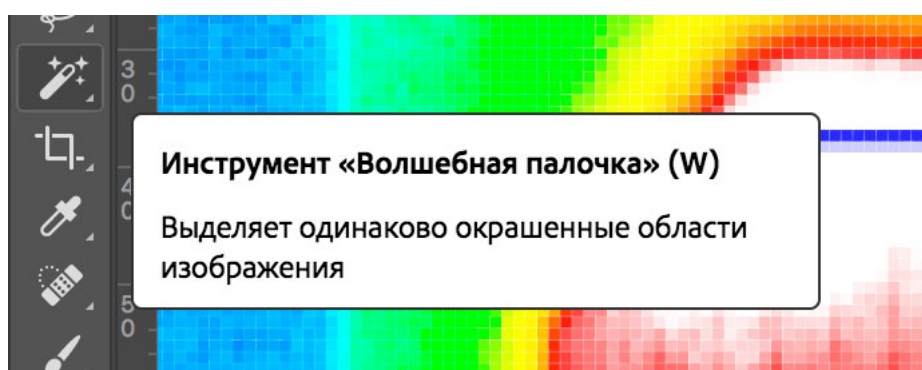


Рис. 3.16 Інструмент «волшебная палочка».

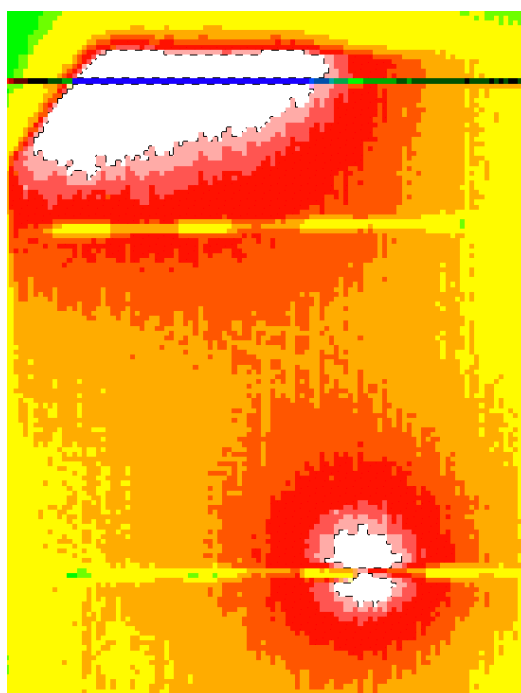


Рис. 3.17 Термограма сонячного елемента з виділеними ураженими пікселями з максимальною температурою (білий колір).

Відкриваємо гистограму цього рисунку, яку будує програма Adobe Photoshop CC автоматично, на якій вказано кількість виділених пікселів, а отже і площу виділеної дефектної ділянки (рис. 3.18)

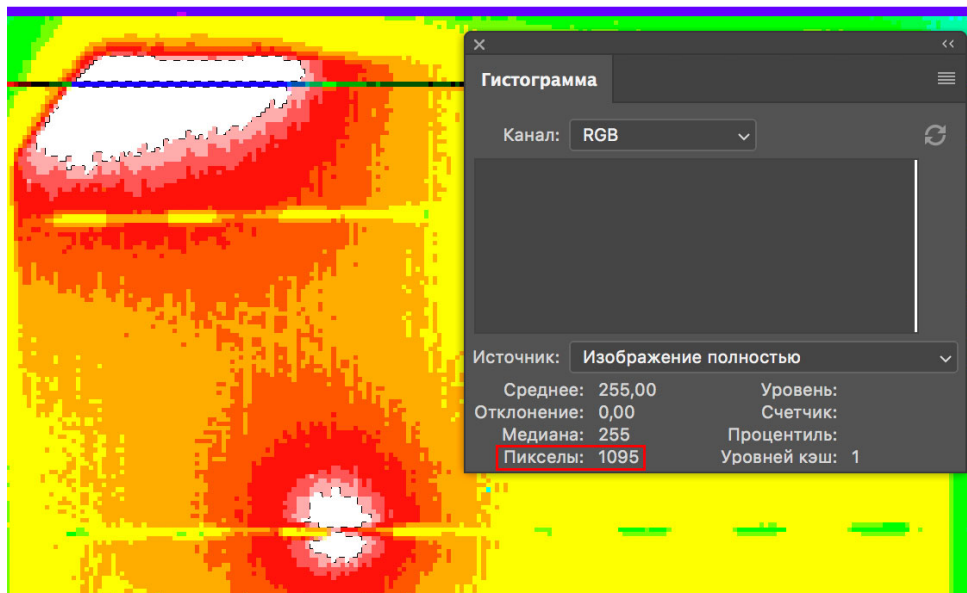


Рис. 3.18 Виділена область з порахованою програмно кількістю пікселів.

Таким чином, можна порахувати площу дефекту без особливих затрат часу.

3.3. Телевізійний контроль електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей

Електролюмінісценція дефектів (гарячих точок) кремнію є також основою методу їх візуалізації. Причиною появи цих дефектів є утворення паразитних світлодіодних структур на фосфіді алюмінію внаслідок недосконалості технології нанесення шин живлення на поверхню кремнієвої пластини.

Світіння ЕЛД супроводжується нагріванням поверхні темновим струмом. Ефект виникає при подачі на кремнієвий сонячний елемент

зворотної напруги. Більшість результатів за цим методом було отримано на пластинах кремнію із застосуванням оптичних систем.

В роботі було застосовано ТІВС при дослідженні ЕЛД як на окремих СЕ, так і на ФЕСБ. ТІВС дозволяє локалізувати дефект, визначити його розміри, форму контуру, характеристики окремих пікселів тощо.

При застосуванні каскадного джерела живлення 1000 В, 400 Вт за тою ж схемою, що при методі ІЧТ створено стенд для телевізійного контролю ФЕСБ. Позиціонування місць контролю виконують вручну на столику із прецизійним механічним приводом по трьох координатах. Похибка координати не перевищує 5 мікрон, що в умовах експерименту відповідає роздільній здатності системи (5 мікрон/піксел).

На рисунку 3.19 представлено загальний вид стенду. На столику закріплено монокристалічну кремнієву ФЕСБ із 4-х СЕ потужністю 3 Вт.

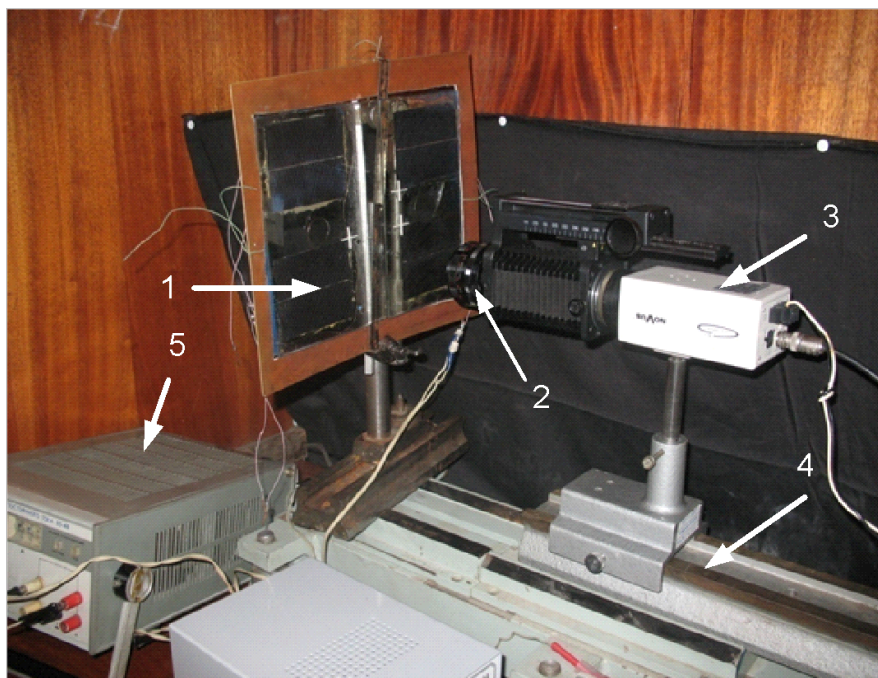


Рисунок 3.19 Стенд для телевізійного контролю ЕЛД: 1 – СЕ; 2 – об'єктив; 3 – телевізійна камера; 4 – оптична лава; 5 – джерело живлення

При рівномірному розподілі дефектів по поверхні СЕ нагрівання є також рівномірним і воно не веде до значної деградації ФЕСБ. Вкрай шкідливим є локальне скупчення дефектів, яке призводить до значного перепаду температури між зоною дефекту та неушкодженою частиною сонячного елемента.

На думку автора, контроль на основі методів візуалізації дефектів має супроводжувати весь життєвий шлях ФЕСБ – від виробництва до моменту виведення із експлуатації. Розвиток цих методів полягає у їх комплексному застосуванні, створенні мобільних засобів спеціально для умов експлуатації, побудові досконалих математичних моделей та комп'ютерних програм на їх основі.

На основі застосування розробленої ТІВС експериментально доведено, що залежність яскравості ЕЛД від напруги має вид:

$$A \sim \exp(-c/\sqrt{U})$$

Встановлено, що відсутність ЕЛД або їх рівномірний розподіл на поверхні СЕ в кількості 1-5 характерний для придатних до експлуатації ФЕСБ найвищого класу А. Нерівномірне розташування ЕЛД або їх велика кількість (Рис. 3.2) свідчать про невідповідність паспорту ФЕСБ. Послідовний опір таких СЕ зменшується у 5-10 раз з 200-300 Ом до 20-50 Ом. Встановлено, що ЕЛД розташовані не тільки біля шин СЕ, але і на віддаленні від них.

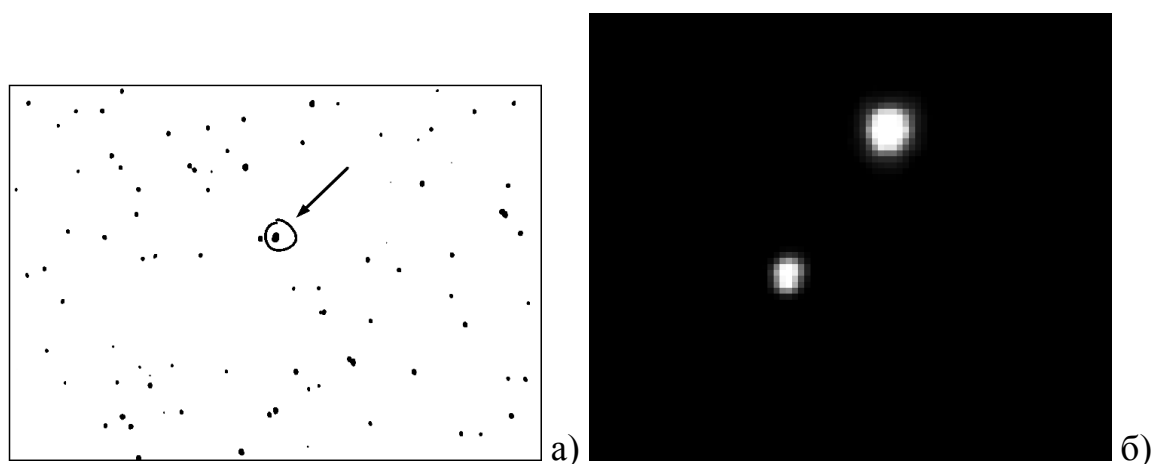


Рисунок 3.20 Розташування ЕЛД на ФЕСБ

а) – Інвертоване зображення ЕЛД дефектного СЕ; б) – збільшене у 100 раз зображення двох ЕЛД

3.3.1. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів електро-люмінісцентних дефектів

Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів ЕЛД проводимо, враховуючи результати досліджень сигналу на його межі та матеріалу розділу 2 стосовно компенсації нерівномірності чутливості. Вважаємо, що форма ЕЛД наближена до круга і тому задачу вимірювання його геометричних розмірів зводимо до задачі вимірювання діаметру ЕЛД.

Вважаємо нерівномірність чутливості СЕП скомпенсованою і для визначення середнього квадратичного відхилення результату вимірювання координат лівої $\sigma_{л}$ та правої $\sigma_{п}$ меж ЕЛД скористуємось формулою:

$$\sigma_{л} = \sigma_{п} = \sigma_{ш}^2 + \sigma_{ацп}^2 + \sigma_{м}^2, \quad (3.7)$$

де $\sigma_{ш}$, $\sigma_{ацп}$, $\sigma_{м}$ — складові, обумовлені флуктуаціями яскравості ЕЛД, шумом АЦП та методикою визначення координати, відповідно.

Методика оцінки внеску вказаних складових в похибку вимірювання координати межі контрастних ділянок базується на умові, що координата належить до перехідної області.

Для оцінки внеску складових $\sigma_{\text{ацп}}$ і $\sigma_{\text{м}}$ в похибку вимірювання діаметру ЕЛД скористаємось результатами роботи [58], в якій наведено такі значення: $\sigma_{\text{ацп}} = 0.29\Delta_{\text{ріх}}$, $\sigma_{\text{м}} = 0.29\Delta_{\text{ріх}}$, де $\Delta_{\text{ріх}}$ — лінійний розмір пікселя вздовж відповідної координати.

Ці результати отримані за слідуючих припущень. По-перше, формування сигналу ПЗЗ-матриці характеризується малими втратами переносу зарядів.

По-друге, методична похибка вимірювання координати обумовлюється характером зміни яскравості перехідної області. При цьому перехідна область, тобто область, на якій задані координати відрізка, є лінійною функцією яскравості (рис. 3.21).

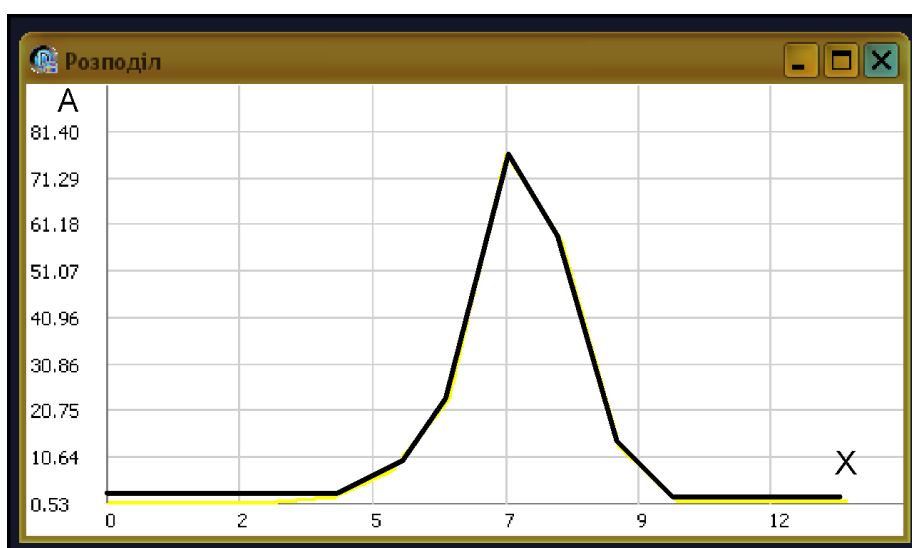


Рисунок 3.21 Зміни сигналу ПЗЗ-матриці на межі ЕЛД: масштаб 5 мкм/піксел. Середнє квадратичне відхилення при вимірюванні координати, яке обумовлене флуктуаціями яскравості, в [59] оцінюється наступною формулою:

$$\sigma_{ш} = 2\tau_{тр}/q, \quad (3.8)$$

де q — відношення сигналу до шуму в зображенні,
 $\tau_{тр}$ — тривалість відеосигналу перехідної області.

Врахуємо деякі особливості задачі вимірювання діаметру ЕЛД. По-перше, сигнал, який може бути сформований пікселом на межі ЕЛД, змінюється від A_0 до значення $A_{ЕЛД}$.

По-друге, значення q будемо визначати, запровадивши обмеження сигналу на рівні A_0 , тобто $q = A_{ЕЛД} - A_0 / \sigma_0$, де σ_0 — середньоквадратичне значення шуму в зображенні фрагменту поза межами ЕЛД.

Значення $\tau_{тр}$, A_0 , $A_{ЕЛД}$, q , σ_0 визначались нами експериментально. Наприклад, згідно з рис.3.1 $\tau_{тр} = 2\Delta_{ріх}$; $A_{ЕЛД} = 75$; $A_0 = 0,53$; $A_c = 74,4$ ум.од. (сигнал $A_c = A_{ЕЛД} - A_0$), $\sigma_0 = 0,2$; $q = 72,35$. Отже, згідно з формулою (3.8) $\sigma_{ш} = 0,06\Delta_{ріх}$.

Після підстановки значень $\sigma_{ш}$, $\sigma_{ащп}$, σ_m в формулу (3.1), отримаємо $\sigma_l = 0,42\Delta_{ріх}$.

Вважаємо, що при вимірюванні геометричних параметрів телевізійних зображень відхилення координат відрізків, а отже і їх розмірів від середніх значень, розподілені за нормальним законом. Тому середньоквадратичне відхилення при вимірюванні діаметру ЕЛД:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_n^2} = \sqrt{2}\sigma_l, \quad (3.9)$$

Прийнявши імовірність правильного рішення рівною 0.95, отримаємо, що похибка визначення діаметру ЕЛД становитиме $\Delta D = 2\sigma_D$.

Якщо лінійний розмір піксела ТЗВ $\Delta_{ріх} = 5$ мкм, то $\sigma_l = 2$ мкм, $\sigma_D = 4$ мкм, а похибка вимірювання діаметру ЕЛД в площині СЕП $\Delta D = 8$ мкм.

Згідно з розділом 1 така точність не може вважатися достатньою при вимірюванні діаметра ЕЛД, і вже зовсім не відповідає сучасним вимогам до точності визначення геометричних параметрів дефектів.

Як показано в [58], з метою підвищення точності визначення геометричних розмірів ЕЛД необхідно визначити кількість ділянок, які можуть бути розрізнені в межах пікселя як окремі:

$$N = (A_{\text{елд}} - A_0)/3,2\sigma_0 \quad (3.10)$$

Таким чином, виходячи з оцінки сигналів, які формуються на ЕЛД, можна стверджувати, що в межах пікселя із заданою імовірністю, в даному випадку 0.95, можна розрізнити N ділянок. З цього випливає, що при лінійному розмірі пікселя Δ_{pix} можлива ідентифікація положення межі ЕЛД з точністю до ділянки розміром Δ_{pix}/N .

Безумовною перевагою розглянутого вище підходу є те, що ефект може бути досягнений в межах існуючої структури приладу за рахунок вдосконалення методики визначення положення межі ЕЛД.

Згідно з процедурою деталізації після знаходження діаметру ЕЛД (в цілих значеннях піксел) сигнал, сформований крайніми пікселями, співставляється з визначеними рівнями квантування і відноситься до одного з них. Це приводить до підвищення точності вимірювання діаметру ЕЛД.

Наприклад, згідно з базовою методикою встановлено, що зображення лівої межі ЕЛД проходить через піксел $(i; j)$, а правої — через піксел $(i; k)$ (рис. 3.22).

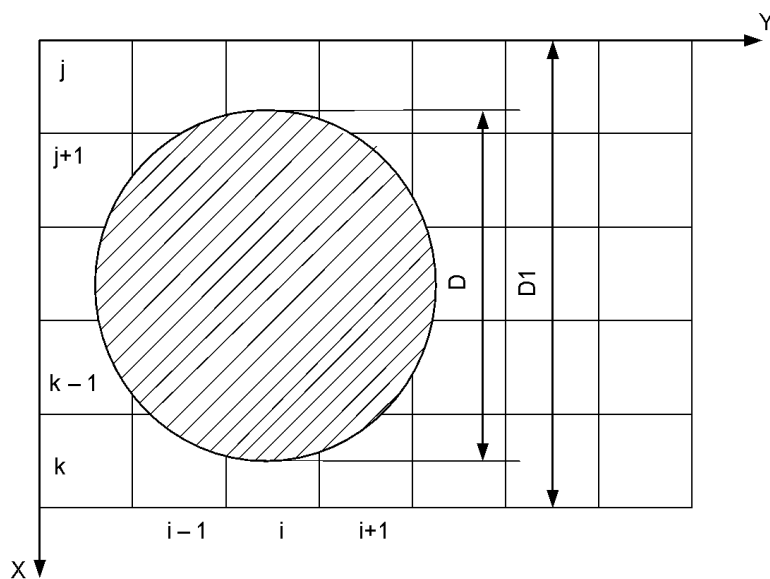


Рис. 3.22 Визначення діаметру ЕЛД

Діаметр ЕЛД обчислюється за формулою:

$$D_1 = X_{i,k} - X_{i,j}, \quad (3.11)$$

де $X_{i,k}$, $X_{i,j}$ — координати піксел $(i; j)$, $(i; k)$.

Оскільки лінія межі ЕЛД може довільно перетинати піксел, то максимальна абсолютна похибка визначення координати ΔX дорівнює розміру піксела $\Delta_{\text{pix}X}$ вздовж цієї координати. У відповідності з (3.11) максимальна абсолютна похибка вимірювання діаметру зображення ЕЛД:

$$\Delta D = 2\Delta X = 2\Delta_{\text{pix}X} \quad (3.12)$$

У відповідності з процедурою деталізації діаметр ЕЛД визначається за формулою:

$$D = (X_{i,k-1} - X_{i,j+1}) + (\Delta_{\text{pix}X}/N)(l_k + l_j), \quad (3.13)$$

де l_k, l_j – кількість ділянок розміром $\Delta_{\text{ріх}}X/N$, які займає зображення ЕЛД в межах пікселя $(i;k)$ та пікселя (i,j) відповідно.

Застосування процедури деталізації дозволяє зменшити похибку визначення координати, оскільки в формулі (3.6) та в формулах для визначення $\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma_{\text{ацп}}$, $\sigma_{\text{м}}$ використовується не $\Delta_{\text{ріх}}X$, а $\Delta^l_{\text{ріх}}X = \Delta_{\text{ріх}}X/N$.

При $N = 3$ та масштабі зображення 5 мкм/піксел похибку вимірювання координати ЕЛД зменшено з 5 мкм (півпікселя) до 1,7 мкм.

За аналогією, також можливе зменшення похибки вимірювання геометричних розмірів теплового поля дефекту в методі ІЧТ, якщо застосувати метод обробки зображення, аналогічний до описаного вище.

На захист даної тези можна навести такі аргументи:

- засоби телевізійного контролю та ІЧТ, які були використані в дослідженнях дефектів ФЕСБ, мають в основі матрицю фото-чутливих елементів, які відрізняються робочим діапазоном: видимого або інфрачервоного випромінювання;
- беручи до уваги попереднє твердження, маємо в результаті, що алгоритм визначення границь зображень ЕЛД, який був застосований в ТІВС, можна застосувати також при вимірюванні границі теплового поля дефекту ФЕСБ.

Вимірювання геометричних розмірів об'єктів різної природи для матричних засобів реєстрації зображень у різних діапазонах електромагнітних хвиль (інфрачервоному, видимому та інших) із величиною похибки, яка є меншою, ніж один піксел, на основі застосування відповідного алгоритму є окремою науковою задачею, яка значно перевершує завдання даного дослідження.

Таким чином, практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Було з'ясовано, що доцільно застосовувати нагрівання СЕ зворотним, а не прямим, темновим струмом, що забезпечує ефективне виявлення структурних дефектів в СЕ.

2. Впроваджено методику графічного обчислення теплової потужності дефектів при нагріванні фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом.

ВИСНОВКИ

1. В роботі розглянуто сучасний стан енергетики та енергетичних технологій, яку роль в розвитку енергетики грають сонячні елементи і сонячні батареї. Досліджено та порівняно методи визначення дефектності сонячних батарей.
2. Запропоновано метод інфрачервоної термографії сонячних елементів для виявлення дефектів при нагріванні зворотним темновим струмом, що дозволяє виявляти дефекти типу електричного пробую і мають характер резистивного шунта, в окремих сонячних елементах або у сонячних батареях.
3. Досліджено методи і засоби нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом з метою виявлення на ранній стадії та локалізації їх дефектів при застосування інфрачервоної термографії.
4. Апробовано методику локалізації місць дефектів типу електричного пробую за аномальним розігріванням поверхні сонячного елемента над місцями ушкоджень.
5. Показано що інфрачервона термографія є ефективним засобом у виявленні дефектів сонячної батареї в окремих модулях та сонячної батареї в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [Электронный ресурс] Солнечные электростанции в Украине начнут вырабатывать на 20% больше электроэнергии
<https://ubr.ua/market/industrial/solnechnye-elektrostantsii-v-ukraine-nachnut-vyrabatyvat-na-20-bolshe-elektroenerhii-3842557>
2. *Еременко А.* Главная задача Минтопэнерго – стабильное обеспечение потребителей энергоносителями и электроэнергией / *А. Еременко, И. Плачков* // Зеркало недели. – 14 мая 2005 г. – No 18 (546). – С. 8–9.
3. А.А. Долінський Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики
4. О.Т. Возняк, М.Є. Янів Енергетичний потенціал сонячних енергетики та перспективи його використання в Україні, 2010
5. [Электронный ресурс] Навчальні матеріали онлайн: вітроенергетика, 2010. Режим доступу до статті:
<https://pidruchniki.com/1754080137971/ekologiya/vitroenergetika>
6. Древаль М.А. Альтернативные источники энергии
7. Атлас енергетичного потенціалу поновлюваних джерел енергії України розроблено Інститутом електродинаміки НАН України за підтримки Державного комітету України з енергозбереження. – К., 2000.
8. Безнощенко, Д. Сонячна альтернатива ТЕПС. Сонячна енергетика. // Зелена енергетика. – 2006. – No 3. – С. 28. 3. 1991. – 208 с. 2. 8. Наумов А.В. Рынок солнечной энергетики начала XXI Прогнозы и проблемы// Экология и промышленность России. – 2006. – No8. – С.28–32.
9. W.G. Adams, R.E. Day. Phil. Trans. R. Soc., 167 (part 1) 313 (1877).
10. A.F. Ioffe, A.V. Ioffe. Phys. Z. Sov. Un., 7, 343 (1935).
11. D.M. Chapin, C.S. Fueller, G.L. Pearson. J. Appl. Phys., 25, 676 (1954).

12. Н.А. Горюнова. Автореф. дис. (ЛГУ–ФТИ, 1951).
13. [Електронний ресурс] Физические основы солнечной фотоэнергетики. Режим доступа до статті:
<https://msd.com.ua/solnechnayaenergetika/fizicheskie-osnovy-solnechnoj-fotoenergetiki/>
14. Мхитарян Н.М. Проблемы развития энергетики Украины. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика [Текст] /Н.М. Мхитарян, В.Ф. Мачулин // Наука та інновації. —2006. — Т. 2, No 2. — С. 63–75.
15. Наумов А.В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006–2010 гг. [Текст] /А.В. Наумов //Технология конструирования электронной аппаратуре. — 2006. — No 4. — С. 3–8.
16. Wurfel P. Physics of Solar Cells. From Principles to New Concepts [Текст] /P.Wurfel. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag. – 2005. — 186 p.
17. Renewables 2014. Global Status report [Текст]. – Paris. – 2014. – 264 p.
18. Оксанич А.П. Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії [Текст] /А.П. Оксанич, В.А. Тербан, С.О. Волохов та ін. – Кривий Ріг.:Мінерал. – 2010. — 267 с.
19. Патон Б.Є. Умови ефективного застосування сонячних електроенергетичних систем [Текст] / Б.Є. Патон, М.І. Ключ, О. Є. 155 Коротинський, А.В Макаров //Вісник НАН України. – 2012. – No 3. – С. 48-58.
20. Горбань А.П. Вплив концентрації надлишкових носіїв заряду на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації в кремнієвих фоточутливих структурах [Текст] /А.П. Горбань, В.П. Костильов, А.В.

Саченко та ін. // Український фізичний журнал – 2006. – Т.51, №6. – С. 599 – 605.

21. Jiang Chun-Sheng Carrier separation and transport in perovskite solar cells studied by nanometre-scale profiling of electrical potential. [Електронний ресурс] / Chun-Sheng Jiang, Mengjin Yang, Yuanyuan Zhou and others //Nature Communications, Published 28 Sep. 2015. – Access mode: www.nature.com/naturecommunications.

22. Green M. A. . Solar cell efficiency tables (version 38). [Текст] / M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa and others //Progress in Photovoltaics: Research and Applications, No 19. – 2011. – P. 565 – 572.

23. Li G. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self- organization of polymer blends [Текст] /G. Li , V. Shrotriya , J. Huang, Y. Yao and others // Nature Materials, 4(11). – 2005. – P. 864–868.

24. Levi D.H. Back Contact Effects on Junction Photoluminescence in CdTe/CdS Solar Cells [Текст] / D.H. Levi, L.M. Woods, D.S. Albin and others //26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – September 29 - October 3, 1997. – Anaheim, California. – 1997. – P. 1-5.

25. Rein S. Lifetime spectroscopy for defect characterization: Systematic analysis of the possibilities and restrictions [Текст] /S. Rein, T. Rehr, W. Warta, S.W. Glunz // Journal of Applied Physics. – 2002. – No91(4). – P. 2059–2070.

26. Fraunhofer ISE. Jahresbericht 2014/15 [Текст] . – Freiburg: Fraunhofer Publ. –2015.– 156p.

27. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering [Текст] /A. Luque, S. Hegedus . – New York.: Wiley. – 2003. – 1180 p.

28. Архипов С.А. Современное аппаратное обеспечение для исследования солнечных элементов [Текст] /С.А. Архипов, Н.Н. Боярко //Науковий вісник КУЕІТУ. Нові технології, No 1 (31). – 2011. – С. 25 – 30.

29. Борисов О.В. Твердотільна електроніка [Текст] / О.В. Борисов , Ю.І. Якименко. – Київ.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»». – 2015. – 484 с.
30. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 576 с.
31. Green M.A. Crystalline and thin film silicon solar cells: state of the art and future potential // Solar Energy. 2003. Vol. 74. P. 181-198.
32. Лигачев В. А. Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента [Текст] /В.А. Лигачев, А. И. Попов. – М: Издательство МЭИ. – 1999. – 13 с.
33. Schneider K. World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency [Текст] /К. Schneider. – Fraunhofer ISE. Press Release. Freiburg. – 2013. – No 22/13. – бр.
34. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2013. Приборы фотоэлектрические – Часть 3: Принципы измерения фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. – [Чинний від 2015 – 01 – 01]. – М.: Стандартиформ. – 2014. – 80с.
35. Brandhorst, Н.М. Terrestrial solar cell calibration and measurement procedures [Текст] /Н.М. Brandhorst //Proceedings of the Inter. Photovoltaic Solar Energy Conf., Luxemburg, 26-29 May 1977. – Dordrecht-Boston: Reidel Publ. Co. – 1978. – P.745–753.
36. Gueymard C.A. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing [Текст] /C.A. Gueymard //Solar Energy. – 2002. – Vol. 73. – P.443– 467.
37. Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: кандидат фізмат. наук: 05.11.13 / Божко Константин Михайлович. – К., 2016.

38. Божко К.М. Перехід до нового стандарту сонячної енергетичної світимості у вимірюваннях характеристик сонячних батарей [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женілова//Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 10): Всеукраїнська наукова конф. 22-23 грудня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С.33-35.
39. Фреїк Д.М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку.[Текст] /Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, М.О. Галушак та ін. //Фізика і хімія твердого тіла.– 2012. – Т. 13, No 1. – С. 7-20.
40. Rugescu R. (ed.). Solar Energy [Текст] / R. Rugescu (ed.). – :InTech. – 2010. – 432 p.
41. Perez-Higuerasa P. High concentrator photovoltaics efficiencies: Present status and forecast [Текст] /P.Perez-Higuerasa, E. Munoz, G. Almonacida, P. G. Vidala //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – No15(4). – P.1810–1815.
42. Glunz S. Crystalline Silicon Solar Cells [Текст] /S.Glunz. – Freiburg. :Fraunhofer-ISE. – 2014. – 46 p.
43. Philipps S.P. Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology [Текст] /Dr. Simon P. Philipps, Dr. Andreas W. Bet. – Freiburg.: Fraunhofer- ISE. – 2015. – 25 p.
44. Kazmerski L.L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 1997. Vol. 1, No. 1, 2. P. 71-170.
45. Dollars from sense: the economic benefits of re- newable energy. US Department of Energy, 1997. NREL Report No. 20505; DOE/GO-10097.
46. Фонаш С. и др. Современные проблемы полу- проводниковой фотоэнергетики / под ред. Т. Коутса, Дж. Микина. М.: Мир, 1988.

47. Meier J. Potential of amorphous and microcrystalline silicon solar cells // Thin Solid Films. 2004. Vol. 451-452. P. 518-524.
48. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 280 с.
49. Pysch D. A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells [Текст] /D. Pysch, A. Mette, S.W. Glunz //Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2007. – No91. – P.1698-1706.
50. Глуховський В.Ю. Особливості створення систем оцінки геометричних параметрів методом тепловізійного контролю [Текст] /В.Ю. Глуховський, В.О. Троїцький //Методи та прилади контролю якості. – 2014. – No2 (33). – С.3 – 9.
51. Simon M. Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells [Текст] /M. Simon, E.L. Meyer // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2010. – No 94. – P. 106–113.
52. Божко К. М., Дунаєвський В. І., Котовський В. Й., Маслов В.П., Порєв В.А Інфрачервона термографія сонячних елементів, нагрітих темновим струмом / Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2013. - №46. – С. 56-63.
53. Ali Ibrahim. Dark Current -Voltage Characteristics and Lock-in Thermography Techniques as Diagnostic Tools for Monocrystalline Silicon Solar Cells // International Journal Of Renewable Energy Research, IJREP, Vol.1, No3, – 2011. Pp.60-65.
54. Порев, В. А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] / В. А. Порев, Р. И. Пахалюк, К. М. Божко // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – 2014 . – No1. – С.11-14.
55. Божко К.М. Графічний розрахунок теплової потужності дефекту типу —hotspot‖ сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женілова

//Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 13): Всеукраїнська наукова конф. 20 – 21 травня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С.65 – 67.

56. Kreith F. Basic Heat Transfer. [Текст] /F. Kreith, W.Z. Black. – NewYork. : Harper and Row. – 1980. – 512 p.

57. Денисюк. В.П. Сплайны и их приложения в задачах моделирования и обработки сигналов [Текст] /В.П. Денисюк, Б.Г. Марченко. – К.: Техніка. – 246 с.

58. Порєв В.А. Застосування сплайн-функцій для збільшення швидкості контролю динамічних параметрів зонної плавки [Текст] /В.А. Порєв, Ю.А. Агінський, К.М. Божко //Вісник НТУУ «КПІ». Секція: Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 58 – 63.

59. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов [Текст] /М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983.— 696 с.