

Имя пользователя:  
Цареградська Тетяна Фізичний

ID проверки:  
1007729792

Дата проверки:  
06.05.2021 08:19:34 MSK

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:  
06.05.2021 08:36:43 MSK

ID пользователя:  
100002838

Название файла: Красько(Оліх)

Количество страниц: 39 Количество слов: 5546 Количество символов: 39468 Размер файла: 3.90 MB ID файла: 1007833375

## 0.29% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.14% с Интернет-источником (<https://sword.cit.ie/engmas/3>)

0.14% Источники из Интернета 1 ..... Страница 41

0.29% Источники из Библиотеки 13 ..... Страница 41

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 34

## Зміст

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 2  |
| 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....  | 4  |
| 1.1 S-ПОДІБНІ ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....                                  | 4  |
| 1.2 МЕТАЕВРИСТИЧНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ.....  | 7  |
| 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РОЗРАХУНКІВ.....  | 14 |
| 2.1. ЗРАЗКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА.....  | 14 |
| 2.2. ЕКВІВАЛЕНТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА.....   | 17 |
| 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....  | 19 |
| 3.1. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ МЕТАЕВРИСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ДВОДІОДНОЇ МОДЕЛІ..... | 19 |
| 3.2. ВПЛИВ РІВНЯ ОСВІТЛЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ.....                      | 24 |
| 3.3. ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ CUS-CDSE ВІД РІВНЯ ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ.....              | 32 |
| ВИСНОВКИ.....   | 40 |

## ВСТУП

Перша кремнієва сонячна батарея була створена в 1952 році і з того часу кремній домінує в галузі. Його рекордна ефективність була досягнута ще в 90-х і приблизно рівна 25%, але вона далеко позаду як від теоретичної термодинамічної ефективності в 32%, так і від практичної ефективності 29.4%[1]. Тому зараз ведуться дослідження для пошуку кращих матеріалів і структур для цієї галузі. Дуже перспективним є клас тонкоплівкових елементів, на дослідження яких направлена ця робота. Рис 1. Зображує ефективність різних класів елементів.

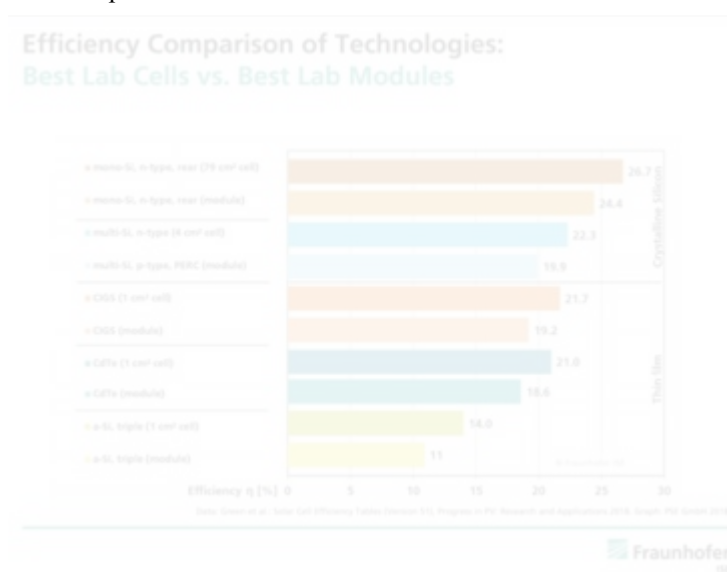


Рис. 1 — Ефективність тонкоплівкових структур в порівнянні з кремнієвими. Рисунок взято з [2]

Тонкоплівкові структури ще не перевершили кремнієві по ефективності окремого елементу, але у них є багато переваг. На наступному рисунку зображений спектр поглинання кремнію.

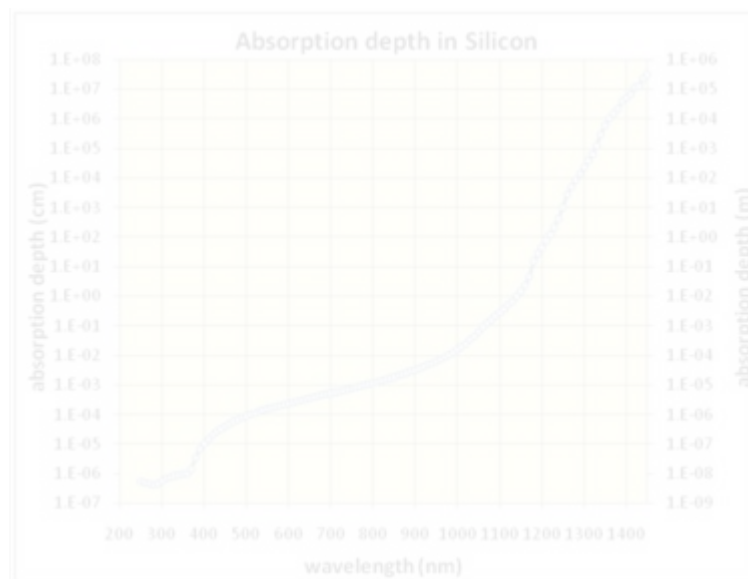


Рис. 2 —Глибина, при якій в кремнії поглинається  $1/e$  фотонів.

Рисунок взято з [3]

Як видно з рисунку, для червоного кольору поглинання на кілька порядків слабкіше на кілька порядків, ніж для фіолетового. Внаслідок цього виникає необхідність використання більшої кількості матеріалу для поглинання світла. З іншої сторони тонкоплівкові структури комбінують кілька шарів різних речовин, спектри поглинання яких покривають бажаний діапазон. Використання інших матеріалів забезпечує меншу вартість виробництва і екологічність. Менша товщина елемента додає структурі гнучкість. Перечислені причини доводять перспективність подальшого дослідження тонкоплівкових структур.

## 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 S-ПОДІБНІ ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Деякі перспективні типи сонячних батарей можуть проявляти небажану S-подібну деформацію вольт-амперних характеристик (ВАХ) при їх освітленні. S-подібну поведінку найбільш видно в четвертому квадранті, де вона понижує фактор форми (FF – Fill Factor). На наступному рисунку зображено точку максимальної потужності (MPP — Maximum Power Point). Зменшення фактору заповнення напряму негативно впливає на ефективність.

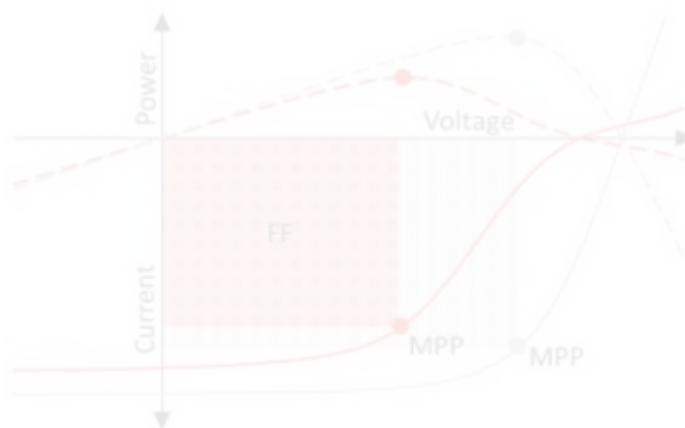


Рис. 1.1 — звичайна ВАХ (сіра лінія) і S-подібна ВАХ (червона лінія).  
Рисунок взято з [4]

Розглянемо причини виникнення S-кривої і як з нею борються для різноманітних типів елементів.

Розглянемо SHJ структуру. Зазвичай вона складається з пластини n-монокристалічного кремнію, яка зазвичай знаходиться між р- (зі сторони падаючого світла) і n-легованим **аморфним** кремнієм — a-Si. Аморфний кремній забезпечує селективні контакти для дірок і електронів, що полегшує екстракцію заряду [5]. Такі структури привертають багато уваги через високу

ефективність і просте виготовлення[6,7]. Для збільшення ефективності застосовують пасивовані шари, які зменшують рекомбінацію, збільшуючи цим шанс фотогенерованим носіям дійти до селективних контактів.

Це трохи зменшує струм короткого замикання, тому виграш в напрузі холостого ходу, який вони надають зменшується. Є кореляція між S-кривою і наявністю енергетичного бар'єру між кристалічним і аморфним кремнієм. S-крива стає менш виразною при збільшенні температури[8].

Проблемою аморфного кремнію є наявність паразитного поглинання. Це можна виправити, якщо знайти менш поглинаючий і більш провідний матеріал, ніж аморфний кремній. В ролі пасивуючих контактів замість нього розглядають, наприклад оксид молібдену  $\text{MoO}_x (x < 3)$ [9]. Це зменшує можливість фотогенерованих носіїв рекомбінувати, тому ефективність напряду зростає. Було виявлено, що збільшення температури відпалу приводить до виникнення S-кривої. Це пов'язано з перемішуванням різних шарів, що заважає транспорту заряду[10].

В кінці кінців, виникнення S-кривих у SHJ з альтернативним пасивованим контактом приписують бар'єрам в транспорті заряду. Ці бар'єри створюються через неспівпадіння зони з селективним контактом[9–11] або з пасивованим шаром[12–14]

CdTe має найбільший ринок серед тонкоплівкових елементів і ефективність, тому виникнення S-кривої для нього було детально вивчено як в експериментах[15], так і в комп'ютерних симуляціях[16]. Було виявлено, що висота потенціального бар'єра з контактом напряду впливає на виникнення S-кривої. Вже підтверджено, що зменшення висоти бар'єра корелює з менш виразною формою S-кривої і більшим фактором заповнення. В симуляціях з'ясувалось, що збільшення рівня легування зменшує ефект бар'єру для транспорту заряду і призводить до більшого фактору заповнення.

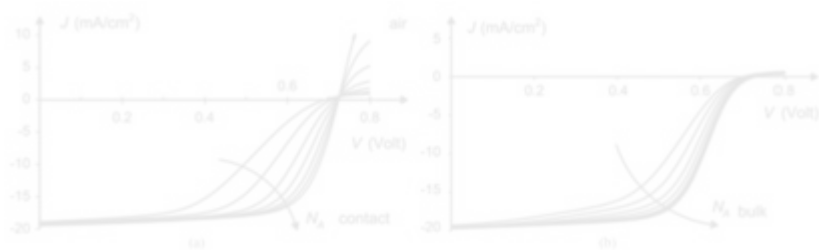


Рис. 1.2— ВАХ в залежності від легування. Рисунок взято з [16]

При збільшенні легування контакту S-крива зникає. Об'ємне легування збільшує FF, форма S-кривої трохи змінюється, але вона нікуди не зникає.

Елементи з CI(G)S (Copper Indium (Gallium) Selenide) мають високу ефективність, яка близька до найкращих кремнієвих батарей, S-крива в цих структурах часто з'являється в експериментах[17–21] і передбачується в теоретичних моделях[20,22]. Схоже до інших систем в цьому винен потенціальний бар'єр. Ще в цій системі присутня залежність S-кривої від довжини падаючого світла[19,23,24]. Її можна пояснити наявністю станів, в яких носій заряду застрягає до моменту рекомбінації(trap states)[19]. Використовуючи певну довжину світла ці стани можна заповнити і зробити їх неактивними. Ще однією причиною може бути невідповідність енергетичних зон.

Сонячні елементи з аморфного кремнію з'явилися в 1970-х роках[25]. Вони були популярними для невеликих калькуляторів, оскільки ті не потребували високої потужності, а самі елементи мали невелику вартість. На даний час аморфний кремній застосовується для пасивованих контактів, які зменшують рекомбінацію зарядів[26]. Для структур з аморфним кремнієм бар'єр між поглинаючим шаром і шаром транспорту заряду вважають приводить до виникнення S-кривої.

## 1.2 МЕТАЕВРИСТИЧНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ

Всі алгоритми оптимізації можна розбити на декілька великих груп: методи Диференціальної Еволюції(DE)[27], методи Вчитель – Учень(TLBO) [28] і методи, які пов'язані з природними процесами.

У цих методах на кожній ітерації буде генеруватись  $P$  векторів, де  $P$  є величиною популяції. Вектором далі буде називатись набір параметрів  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in})$ , який визначається в процесі оптимізації, за компоненту вектору  $j = 1..n$ . Кожен параметр  $X_{i,\min} < X_{ij} < X_{i,\max}$  лежить в деяких межах, що задаються заздалегідь. В нашому випадку вектором буде  $(I_{01}, n, R_{sh1}, I_{02}, n_2, R_{sh2}, R_s, I_{ph})$ . Похибка визначається наступним чином:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (V_{teor} - V_{real})^2}{k \sum_{i=1}^k V_{real}}}, \quad (1.1)$$

$V_{teor}$  – значення, отримане алгоритмом,  $V_{real}$  – значення виміряне в експерименті,  $k$  – кількість вимірюваних значень.

### Диференціальна еволюція

Диференціальна еволюція[27] є легким методом для розуміння, який має мало контролюючих параметрів, що робить його популярним вибором для задач оптимізації.

Параметри Диференціальної еволюції наступні:

1.  $F$  – параметр мутації.
2.  $CR$  – темп схрещення.
3.  $NP$  – розмір популяції.

Алгоритм методу:

1. Ініціалізація  $NP$  векторів проходить таким чином.  $I_{01} = I_{01\min} + \text{rand}(0, 1) * (I_{01\max} - I_{01\min})$ . Ця формула застосовується для всіх параметрів і векторів популяції,  $n * NP$  разів. Після цього ми отримуємо перше покоління векторів( $N = 1$ ).



2. Випадковим чином вибирається 3 різних члена популяції. Створюється вектор мутації за формулою.

$$V_i = X_{i1} + F * (X_{i2} - X_{i3})$$

3. Пробний вектор спочатку дорівнює стартовому вектору  $U_i = X_i$ . Генерується ціле випадкове число  $num_1 = \text{randint}(1, n)$ . Це число відповідає індексу параметру, який буде замінений параметром вектору мутації  $U_{num1} = V_{num1}$ . Це гарантує зміну хоча б однієї компоненти і подальше дослідження зони параметрів.

Далі йде ітерація по інших індексах. В кожному циклі ітерації генерується число з плаваючою точкою  $num_2 = \text{rand}(0, 1)$ . Залежно від результату

$$U_{i,j} = \begin{cases} V_{i,j}, & \text{якщо } num_2 < CR \\ X_{i,j} & \end{cases} \quad (1.2)$$

4. Вибір результуючого вектору проходить так:

$$X_i^{N+1} = \begin{cases} U_i^{N+1}, & \text{якщо } f(U_i^{N+1}) < f(X_i^N) \\ X_i^N & \end{cases} \quad (1.3)$$

Обраний вектор залежить лише від похибки.

5. Цикл закінчився.  $N \Rightarrow N + 1$ . Перевірка на умови зупинки. Прикладами умов є перевищення максимальної кількості ітерацій  $N > N_{\max}$ , або падіння похибки до якогось граничного значення  $\varepsilon \leq \varepsilon_{\min}$ . Якщо якась умова задовільняється, то алгоритм закінчує своє виконання. Якщо умова зупинки не виконується, повертаємося до кроку 2.

Недоліками стандартної ДЕ є застрягання в локальних мінімумах і неможливість знайти глобальний мінімум. Тому у цього метода є нащадки, які виправляють ці недоліки.

ADELI(Adaptive Differential Evolution with a Lagrange Interpolation)

ADELI[29] – диференціальна еволюція з апроксимацією Лагранжа. Цей метод має додаткові контролюючі параметри – немає якогось визначеного коефіцієнту мутації, він адаптується і лежить в проміжку між  $F_{low}$  і  $F_{up}$ . Абсолютно новим параметром є параметр пошуку Лагранжа  $LR_{min} < LR < LR_{max}$  та  $\tau_1, \tau_2$ , які контролюють мутацію та схрещення,  $LR, LR_{min}, LR_{max}, \tau_1, \tau_2, F_{low}, F_{up}, CR$  ініціалізуються на початку.

Основною відмінністю цього методу від попереднього є локальний пошук з інтерполяцією Лагранжа(LSLI). Для запуску пошуку потрібно знати найкращий метод популяції, який ми запам'ятовуємо. На початку кожної ітерації перевіряється умова  $rand(0, 1) < LR$ . Якщо умова виконується, то запускається LSLI.

Вибирається найкращий вектор  $X_{best}$ . Після цього запускається цикл по всім параметрам

$$i=1, n$$

$$R_i = \frac{1}{NP} * (X_{i,max} - X_{i,min}) * rand(0,1)$$

$$X^1 = X_{best} + R_i$$

$$X^2 = X_{best} - R_i$$

Далі ми апроксимуємо ці 3 точки поліномом другого порядку і маємо чотири варіанти розташування, які зображені на наступному рисунку.

$$P = ax^2 + bx + c$$

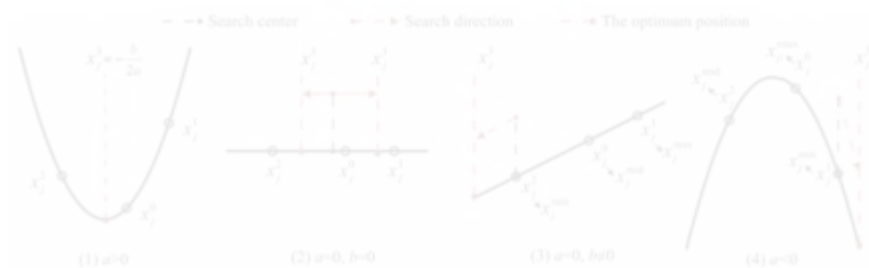


Рис 1.3 Можливі варіанти поведінки функції в невеликому інтервалі  
Рисунок взято з [29]

$$\begin{aligned}
& \frac{-b}{2a}, \text{ якщо } a \geq 0 \\
& \frac{1}{2} (X^1 + X^2) + (rand(0,1) - 0.5) * (X^1 - X^2), \text{ якщо } a = 0, b = 0 \\
& \max_{i \in \{1, \dots, n\}} X_{min}^i - X_i \\
& X_{min} + rand(0,1) * (X_{min} - X_{mid}) + rand(0,1) * i \\
& X^3 = i
\end{aligned} \tag{1.4}$$

$X_{min}$ ,  $X_{mid}$ ,  $X_{max}$  вибираються з  $X^1$ ,  $X^2$  та  $X_{best}$  базуючись на похибці. Найменшому значенню похибки відповідає  $X_{max}$ . Якщо  $\varepsilon(X^3) < \varepsilon(X_{max})$ , то  $X_{best} = X^3$  і  $LR_{G+1} = \min(LR_G + 1, LR_{max})$ ,  $G$  – номер нинішньої ітерації. На цьому пошук Лагранжа завершений

Якщо заміни  $X_{best}$  не відбулось то  $LR_{G+1} = \max(LR_G - 1, LR_{min})$ . Після цього продовжується звичайна DE з маленькими поправками:

$$F_{i,G+1} = \begin{cases} F_{low} + rand(0,1) * F_{up}, & \text{якщо } rand(0,1) < \tau_1 \\ F_{i,G} \end{cases} \tag{1.5}$$

$$CR_{i,G+1} = \begin{cases} rand(0,1), & \text{якщо } rand(0,1) < \tau_2 \\ CR_{i,G} \end{cases} \tag{1.6}$$

### EBLSHADE

Ця модифікація диференціальної еволюції[30] використовує нову стратегію мутації. Вона має список в якому записуються параметри для генерації коефіцієнту мутації та темпу схрещення. Коефіцієнти генеруються для кожного члена популяції на основі нормального розподілу та розподілу Коші таким чином:

$$F_{i,G} = randcauch(M_{F,ri}, 0.1) \tag{1.7}$$

$$CR_{i,G} = randnorm(M_{CR,ri}, 0.1) \tag{1.8}$$

Коефіцієнти  $M$  на початку виконання алгоритму встановлюються рівними 0.5. Після генерації параметрів DE продовжує своє звичайне виконання до кінця ітерації.

Якщо виконуються умови рівняння (3.3), то  $F_i^G$   $CR_i^G$  вважаються успішними і записані в як  $S_F$  та  $S_{CR}$  відповідно. Після обчислення нинішнього покоління параметри оновлюються наступним чином.

$$M_{F,k}^{G+1} = \begin{cases} mean_{WL}(S_F), & \text{якщо } S_F \neq \emptyset \\ M_{F,k}^G \end{cases} \quad (1.9)$$

$$mean_{WL}(S_F) = \frac{\sum_{k=1}^{S_F} w_k S_{F,k}^2}{\sum_{k=1}^{S_F} w_k S_{F,k}} \quad (1.10)$$

$$w_k = \Delta f_k / \sum_{k=1}^{S_F} \Delta f_k \quad (1.11)$$

$$\Delta f_k = f(X_k^G) - f(U_k^G) \quad (1.12)$$

$$M_{CR,k}^{G+1} = \begin{cases} mean_{WL}(S_{CR}), & \text{якщо } S_{CR} \neq \emptyset \\ M_{CR,k}^G \end{cases} \quad (1.13)$$

$$mean_{WL}(S_{CR}) = \sum_{k=1}^{S_{CR}} w_k S_{CR,k} \quad (1.14)$$

### TLBO(Teaching Learning Based Optimization)

Цей алгоритм[28] має 2 типи векторів - найкращий вектор називається вчителем, інші вектори є учнями. Після генерації початкових векторів алгоритмом схожим на DE, знаходиться найкращий вектор. Після цього решта модифікується за наступною формулою

$$X_{new} = X_i + r * (X_{teacher} - T_F * X_{mean}) \quad (1.15)$$

$X_{new}$  – нове отримане значення вектора,  $r$  – випадковий параметр, який визначає скільки знань отримує індивідуальний учень від вчителя,  $X_{mean}$  – середнє значення учнів в класі,  $T_F$  визначає як зміщується нове

положення середнього значення відносно вчителя. Це називається фазою вчителя  $X_{new}$  заміняє  $X_i$ , якщо  $\varepsilon(X_{new}) < \varepsilon(X_i)$ .

Після фази вчителя настає фаза учня. Кожен учень ( $X_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) взаємодіє з іншим випадково вибраним учнем ( $X_j$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ,  $j \neq i$ ). Гірший учень навчається від кращого  $X_{new} = X_i + r(X_i - X_j)$ , якщо  $\varepsilon(X_j) < \varepsilon(X_i)$ . Якщо умова закінчення алгоритму не задоволена, знову знаходиться найкращий вектор і починається фаза вчителя.

### **GOTLBO(Generalized Oppositional Teaching Learning Based Optimization)**

Метод[31] пропонує використовувати вектор, координати якого симетричні відносно найкращого вектору. Якщо ми маємо один параметр, при цьому  $a$  – мінімальне значення параметру,  $b$  – максимальне значення і

$$x' = a + b - x, \quad (1.16)$$

то  $x'$  буде симетричний до  $x$  відносно середнього значення цього параметру. Симетричний вектор використовують оскільки у нього більше шансів бути ближче до глобального мінімуму, ніж у випадкового вектору. Основним параметром цього методу буде  $J_r$ , частота генерації опозиційного покоління. Процес ініціалізації алгоритму проходить наступним чином.

- 1) Випадкова ініціалізація першого покоління  $P$ .
- 2) Ініціалізація опозиційного покоління  $GOP$
- 3) Визначення похибки у обох поколінь.
- 4) Вибір  $NP$  найкращих з  $P \cup GOP$  популяції.

Далі проходить звичайний алгоритм TLBO, але в кінці ітерації  $rand(0, 1)$  порівнюється з  $J_r$ . Якщо  $rand(0, 1)$  менше, то генерується ще одне опозиційне покоління.

### **STLBO(Simplified Teaching Learning Based Optimization)**

У цьому алгоритмі[32] повністю змінена стадія учителя. В стадії вчителя вибирається найгірший учень і мутується наступним чином.

$$X_{new,i} = \begin{cases} X_{teacher,i} + 2 * Ch_n - 1, & \text{якщо } rand(0,1) < \mu \\ X_{teacher,i} & \end{cases} \quad (1.17)$$

$Ch_n$  — Таблица для хаотичних значень.

$Ch_0 = rand(0, 1)$  — початкове значення.

$$Ch_{n+1} = 4 * Ch_n * (1 - Ch_n)$$

$$\mu = 1 - FES / MAXFES,$$

$MAXFES$  — максимальна кількість обрахунків заданої функції, вибрана при запуску алгоритму,  $FES$  — кількість обрахунків виконана на даний момент.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РОЗРАХУНКІВ

### 2.1. ЗРАЗКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

В роботі для досліджень використовувалися тонкоплівкові гетероструктури  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ -CdSe, призначень для реєстрації ультрафіолетового випромінювання. Шар полікристалічного CdSe товщиною 7 мкм з електронною провідністю та концентрацією носіїв  $10^{15}\text{см}^{-3}$  був нанесений на сітлову підкладку. На нього у вакуумі осаджувався шар сульфиду міді  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$  товщиною 15 нм з дірковою провідністю та концентрацією носіїв  $5 \cdot 10^{21}\text{см}^{-3}$ . Омічні контакти створювалися завдяки напиленню плівки молібдена (товщина 100-200 нм, опір  $1\text{ Ом/см}^2$ ). Схема структури представлена на Рис.2.1, а. Структура знаходилася у металевому корпусі з віконцем для проходження випромінювання (Рис.2.1, б).

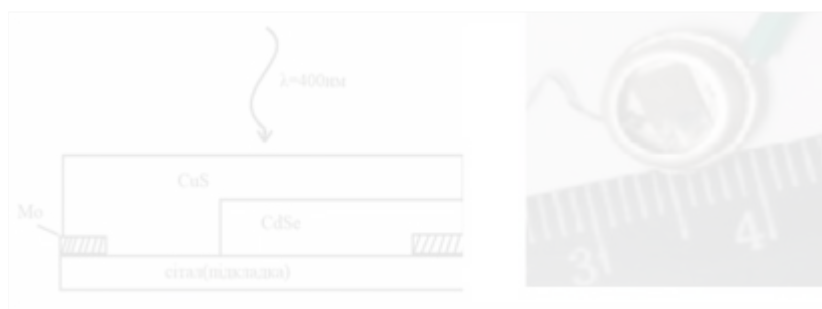


Рис.2.1 Схема структури  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ -CdSe (а) та її зовнішній вигляд (б)

В роботі проводилося вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) досліджуваних структур як при різних рівнях освітлення, так і в темряві в температурному діапазоні 295-340 К за допомогою експериментальної установки, блок-схема якої представлена на Рис.2.2.

Схема безпосереднього вимірювання ВАХ наведена на Рис.2.3. Джерелом напруги, яка подавалася на зразок слугував ЦАП AD5752. Вимірювання

струму проводилося за допомогою датчика INA226, напруга – за допомогою АЦП ADS115.



Рис.2.2. Схема дослідної установки. 1 – персональний комп'ютер; 2 – мікроконтролер (ATmega2560); 3 – ПІД контролер; 4 -джерело струму D30-12; 5 – елемент Пельтьє; 6 - датчика температури (HTU21D); 7 – теплопровід; 8 – досліджуваний фотоелектроперетворювач; 9 – світловід; 10 – блок вимірювання ВАХ; 11 – LED (PM2B-1LLE); 12 – термостат (W1209); 13 – блок стабілізації струму живлення; 14 – АЦП.

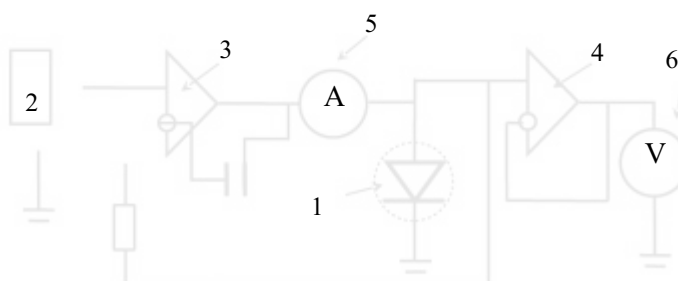


Рис. 2.3 – Схема блоку вимірювання ВАХ. 1 – досліджувана структура, 2 – джерело напруги, 3, 4 – операційні підсилювачі, 5 – вимірювач струму, 6 – вимірювач напруги

Освітлення зразка проводилося зі боку  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$  за допомогою світлодіод PM2L-1LLE-SD-U, який випромінює електромагнітні хвилі з довжиною



400±10 нм. Сталість температури LED забезпечувалась за допомогою термостату W1209. Точність виміру температури датчиком термостату складає 0,1°C в діапазоні від -9,9°C до 99,9°C, що дозволило підтримувати температуру PM2L-1LLE-SD-U у необхідному діапазоні (30 градусів за шкалою Цельсія) з точністю  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ . Зразок та світловипромінюючий елемент були температурно розв'язані: світло з LED потрапляло у світлопровід (оптоволоконний, діаметром 1 см) і лише з нього – на зразок.

Інтенсивність випромінювання LED (а отже і рівень освітленості досліджуваної структури) змінювалась шляхом варіації струму через світлодіод. Відповідно до паспортних даних, світловий потік лінійно залежить від величини прямого струму  $I_{\text{LED}}$  через PM2L-1LLE-SD-U (при  $I_{\text{LED}} > 30$  мА). Струмо-контролюючим елементом у колі живлення LED слугував польовий транзистор, опір якого контролювався величиною напруги на затворі, джерелом якої слугував ЦАП ET1255. Наявність операційного підсилювача та резистора забезпечувала негативний зворотній зв'язок та стійкість системи до випадкових змін зовнішніх параметрів. Схема дозволяє встановлювати необхідне значення струму через LED з точністю та стабільністю в межах 0,01%. В дослідженнях використовувалися значення струму 50, 100, 150, 200 та 250 мА.

Температура зразка контролювалася за допомогою цифрового датчика NTU21D. Зміна температури зразка забезпечувалась системою, яка складалася з елемента Пельт'є та керованого джерела струму D30-06. Термостабілізація досягалася шляхом використання програмно реалізованого пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) контролера, вхідним сигналом якого були покази термодатчика, а вихідний сигнал служив керуючим для джерела струму. Система дозволяла стабілізувати задану температуру зразка з точністю  $\pm 0,04^\circ\text{C}$ .

## 2.2. ЕКВІВАЛЕНТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

Під час попередніх досліджень (проведених під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра) було показано, що для опису ВАХ структур  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}-\text{CdSe}$  доцільно використовувати різні еквівалентні моделі при описі проходження струму за відсутності освітлення та при його наявності. А саме для темнових ВАХ потрібно використовувати одноступінчасту модель, а для світлових – двоступінчасту з увімкненими назустріч діодами. Відповідні схеми представлені на Рис.2.4.

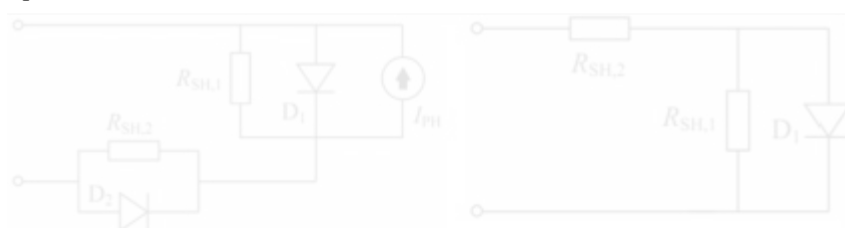


Рис. 2.4 – Еквівалентні схеми освітленого (ліворуч) та неосвітленого (праворуч) фотоперетворювача  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}-\text{CdSe}$ .

Для апроксимації темнових ВАХ використовувався вираз

$$I = I_{0,1} \left[ \exp \left( \frac{q(V - R_{SH,2}I)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] + \frac{V - R_{SH,2}I}{R_{SH,1}}, \quad (2.1)$$

де  $I$  та  $V$  – струм через структуру та прикладена до неї напруга, відповідно,  $I_{0,1}$  та  $n_1$  – струм насичення та фактор неідеальності діоду,  $R_{SH,1}$ ,  $R_{SH,2}$  – послідовний та паралельний опори, відповідно.

Щодо ВАХ, отриманих при освітленні, то відповідно до [33–35], в цьому випадку доцільно застосовувати наступні вирази:

$$V = \frac{n_1 kT}{q} g(x_1) - \frac{n_2 kT}{q} g(x_2) - \frac{n_1 kT}{q} \log \left[ \frac{q}{n_1 kT} I_{0,1} R_{SH,1} \right] + \frac{n_2 kT}{q} \log \left[ \frac{q}{n_2 kT} I_{0,2} R_{SH,2} \right], \quad (2.2)$$

де  $I_{0,2}$  та  $n_2$  – струм насичення та фактор неідеальності зустрічного діоду,

$$x_1 = \log \left[ \frac{q}{n_1 k T} I_{0,1} R_{SH,1} \right] + \frac{q}{n_1 k T} R_{SH,1} (I + I_{PH} + I_{0,1}) , \quad (2.3)$$

$$x_2 = \log \left[ \frac{q}{n_2 k T} I_{0,2} R_{SH,2} \right] + \frac{q}{n_2 k T} R_{SH,2} (I - I_{0,2}) , \quad (2.4)$$

$I_{PH}$  – величина фотоструму,

а функція  $g(x) = \log(W(\exp(x)))$  ( $W$  – функція Ламберта) може бути обчислена за допомогою методу послідовних наближень:

$$g_{n+1}(x) = g_n(x) - \frac{2(g_n + \exp(g_n) - x)(1 + \exp(g_n))}{2(1 + \exp(g_n))^2 - (g_n + \exp(g_n) - x)\exp(g_n)} , \quad (2.5)$$

причому

$$g_0(x) = \begin{cases} \text{при } x \leq -1 \\ -e + \frac{1+e}{2e} (x+e) \text{ при } -1 < x < e \\ \log(x) \text{ при } x \geq e \end{cases} . \quad (2.6)$$

Саме вирази (2.7-2.6) були використані для апроксимації експериментально отриманих ВАХ структур  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$ . При цьому величини  $I_{0,1}$ ,  $I_{0,2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $R_{SH,1}$ ,  $R_{SH,2}$  та  $I_{PH}$  виступали у ролі шуканих параметри і використовувався метаевристичний метод апроксимації, вибір якого обґрунтовано у розділі 3.1.

Крім того, з освітлених ВАХ визначалися такі параметри фотоелектричного перетворення як струм короткого замикання ( $I_{SC}$ ), напруга холостого ходу ( $V_{OC}$ ), максимальна вихідна потужність ( $P_{MP}$ ) та фактор заповнення ( $FF = P_{MP} / I_{SC} V_{OC}$ ). При цьому продилося нелінійна апроксимація різних ділянок ВАХ за методом, запропонованим в роботі[36].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ МЕТАЕВРІСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ДВОДІОДНОЇ МОДЕЛІ

Для оптимізації ВАХ використовують наступну формулу

$$V = (I + I_{ph} + I_{01}) R_{SH1} - \dot{U} - \frac{n_1 kT}{q} W \left\{ \frac{q}{n_1 kT} I_{01} R_{SH1} \exp \left[ \frac{q}{n_1 kT} R_{SH1} (I + I_{01} - I_{PH}) \right] \right\} + \dot{U} + \frac{n_2 kT}{q} W \left\{ \frac{q}{n_2 kT} I_{02} R_{SH2} \exp \left[ \frac{-q}{n_2 kT} R_{SH2} (I - I_{02}) \right] \right\} + \dot{U} + (I - I_{02}) R_{SH2} - I R_S \quad (3.1)$$

Ця формула має 8 параметрів. Для розв'язання такої задачі застосовують метаевристичні методи оптимізації. No free lunch theorem (NFL) доводить, що немає алгоритму оптимізації, який працює для всіх типів задач. Тому була використана група різних алгоритмів оптимізації на невеликій кількості даних для визначення оптимального алгоритму за результатами в наступних категоріях:

- 1) Мінімізація відносного середньоквадратичного відхилення.
- 2) Повторення результатів оптимізації при багатократному запуску.

Ми використовували наступні алгоритми: DE[27], EBLSHADE[30], ADEL[29], NDE[37], MABC[38], TLBO[28], GOTLBO[31], STLBO[32], PSO[39], PJAYA[40], ISCA[41], NNA[42], CWOA[43], Waterwave[44].

Ці алгоритми були реалізовані моїм науковим керівником Оліхом О. Я. Для оцінки алгоритмів використовувались 40 файлів, в кожному з яких було по 20 точок  $V(I)$ . На Рис 3.1 зображено початкові межі в яких можуть лежати параметри. Якщо кілька алгоритмів натикались на границю якогось

параметру, ми розширяли можливі значення цього параметру. Фінальні межі оптимізації можна побачити на Рис 3.2.

| Variable | Limit values             | Mode        | Node |
|----------|--------------------------|-------------|------|
| x01      | min: 11-15, max: 54-67   | Normal      | 1    |
| x02      | min: 21-05, max: 0.004   | Logarithmic | 1    |
| x03      | min: 0, max: 1           | Constant    | 1    |
| x04      | min: 1, max: 5           | Normal      | 1    |
| x05      | min: 3, max: 12          | Logarithmic | 1    |
| x06      | min: 0.0002, max: 0.0003 | Constant    | 1    |
| x07      | min: 100, max: 2005      | Normal      | 1    |
| x08      | min: 100, max: 1104      | Logarithmic | 1    |
| x09      | min: 100, max: 1104      | Constant    | 1    |

Рис. 3.1 — Початкові межі оптимізації

| Variable | Limit values             | Mode        | Node |
|----------|--------------------------|-------------|------|
| x01      | min: 11-17, max: 0.001   | Normal      | 1    |
| x02      | min: 11-06, max: 0.01    | Logarithmic | 1    |
| x03      | min: 0, max: 1           | Constant    | 1    |
| x04      | min: 0.9, max: 7         | Normal      | 1    |
| x05      | min: 2.3, max: 16.5      | Logarithmic | 1    |
| x06      | min: 54-05, max: 0.00055 | Constant    | 1    |
| x07      | min: 90, max: 1105       | Normal      | 1    |
| x08      | min: 100, max: 1105      | Logarithmic | 1    |
| x09      | min: 100, max: 1105      | Constant    | 1    |

Рис. 3.2 — Фінальні межі оптимізації

Як говорилось раніше, вибір алгоритму в основному залежав від двох параметрів:

- 1) Мінімізація відносного середньоквадратичного відхилення.
- 2) Повторення результатів оптимізації при багатократному запуску програми.

На наступних графіках зображені залежності двох параметрів Error та Scatter від температури для різних алгоритмів. Error позначає похибку, яка визначена в формулі(1.1). Scatter показує розкид параметрів за такою формулою

$$Scatter = \frac{X_{i,k,max} - X_{i,k,min}}{X_{i,max} - X_{i,min}} \quad (3.1)$$

$X_{i,k,min}$ ,  $X_{i,k,max}$  – мінімальне та максимальне значення параметру  $i$ , визначене за  $k$  запусків алгоритму оптимізації

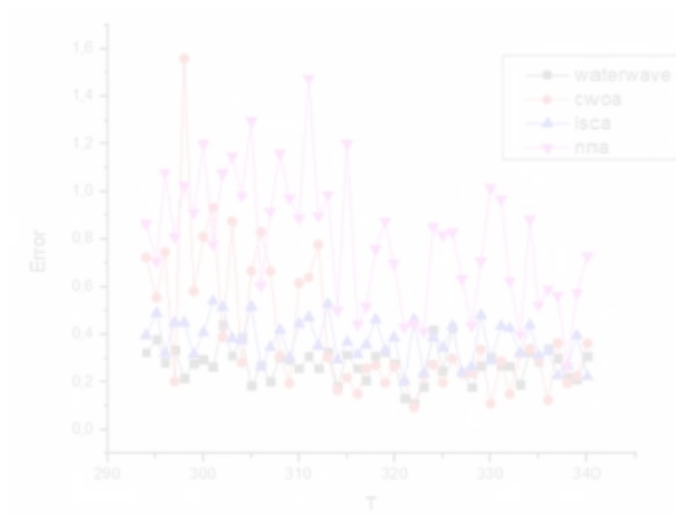


Рис 3.3 Похибка для найгіршої групи

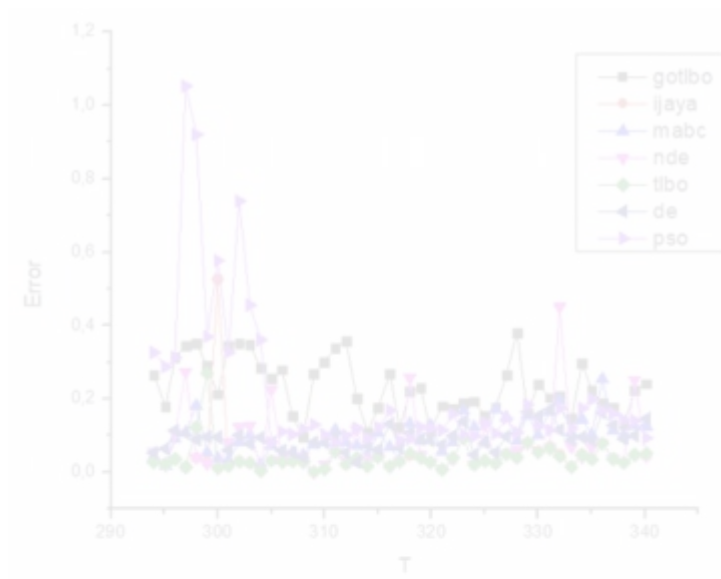


Рис 3.4 Похибка для середньої групи

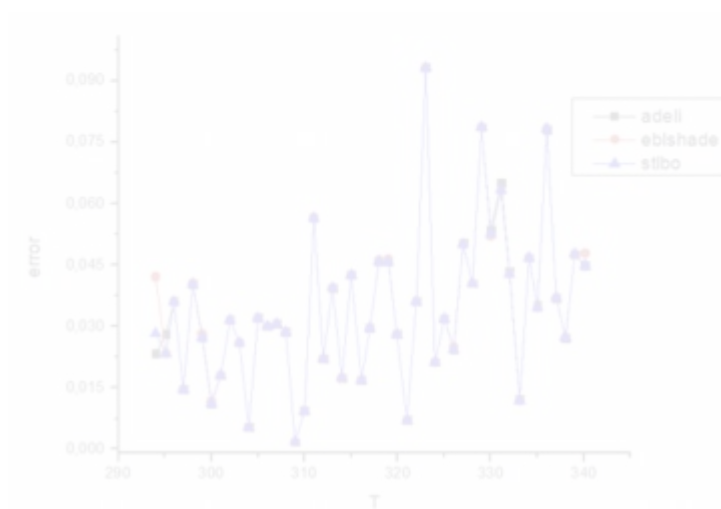


Рис 3.5 Похибка для найкращої групи

По значенням похибки ADELI, EBLSHADE і STLBO впевнено лідирують. Залишилось перевірити придатність цих методів по розкиду.

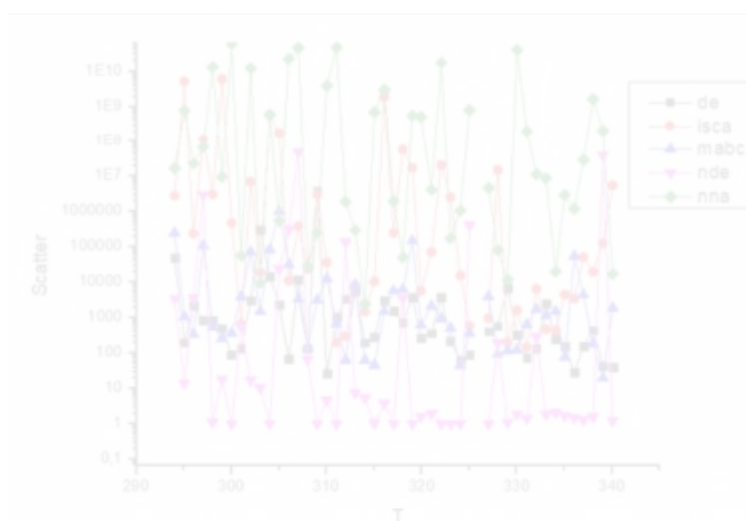


Рис 3.6 Розкид для найгіршої групи

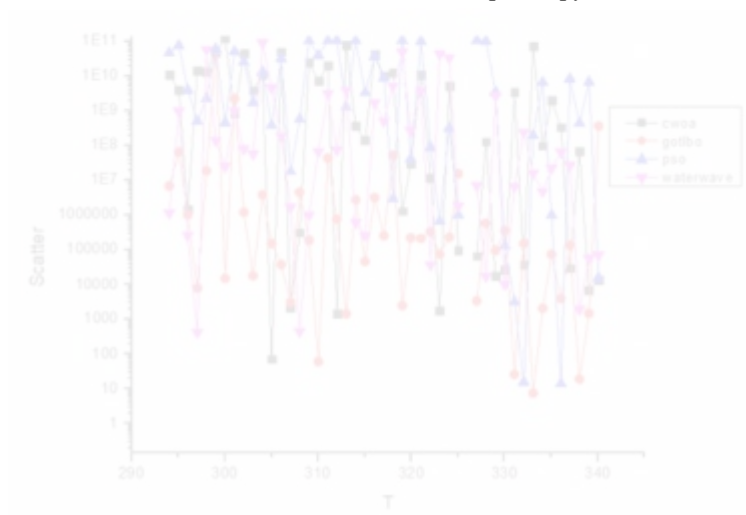


Рис 3.7 Розкид для середньої групи



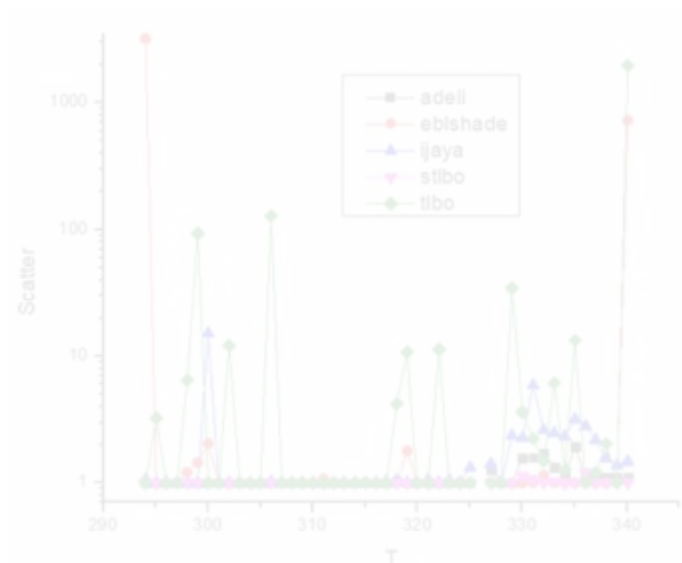


Рис. 3.8 Розкид для найкращої групи

По розкиду ADELI, EBLSHADE і STLBO показують себе добре. Таким чином, я розбив алгоритми на 3 групи:

- 1) Eblshade, Adeli, Stlbo – найкращі.
- 2) Gotlbo, Ijaya, Mabc, Nde, Tlbo, Pso, De – середні.
- 3) Waterwave, Cwoa, Isca, Nna – найгірші.

Серед найкращих алгоритмів Eblshade і Stlbo майже на порядок обганяють Adeli за швидкістю, тому саме Eblshade і Stlbo були обрані для подальших обрахунків.

### 3.2. ВПЛИВ РІВНЯ ОСВІТЛЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Процеси фотоелектричного перетворення в напівпровідникових приймачах суттєво залежать від температури та від рівня освітлення. На Рис.3.9 наведено типовий вигляд ВАХ, отриманих в різних умовах.

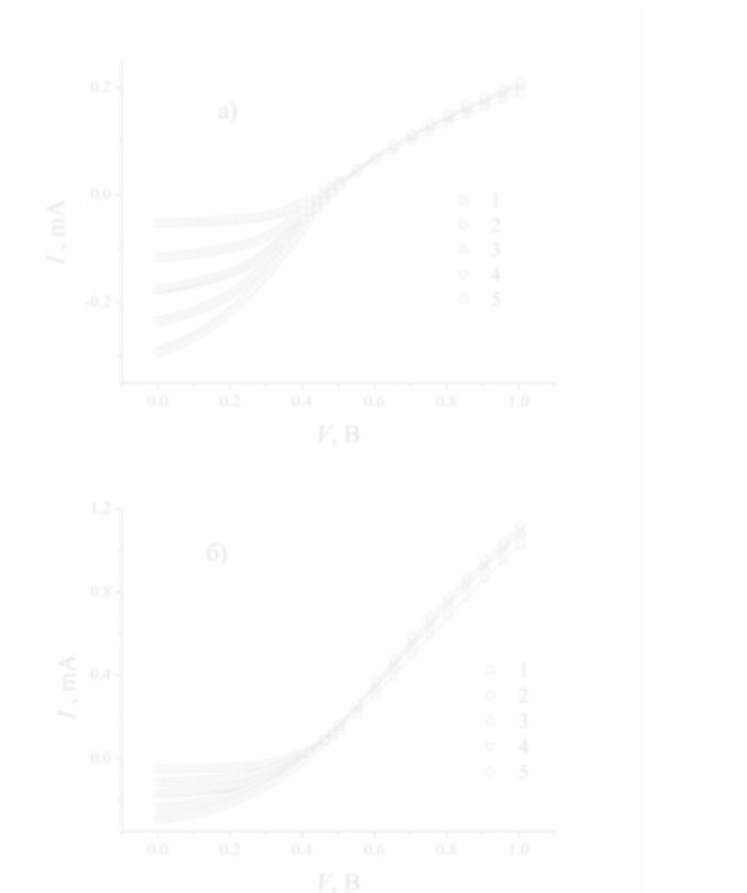


Рис. 3.9. ВАХ структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$ , отримані при різних температурах та рівнях освітлення. Температура, К: 295 (а), 300 (б).  $I_{\text{LED}}$ , мА: 50 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5). Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формул (2.2)-(2.6)

З наведених залежностей видно, що при зростанні температури суттєво зменшується напруга холостого ходу, а підвищення рівня освітленості спричинює зростання струму короткого замикання.

На Рис. 3.10 приведено температурні залежності  $V_{\text{oc}}$ . З літератури[45] відомо, що для тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів з

гетеропереходом температурна залежність напруги холостого ходу має описуватися виразом:

$$V_{oc} = \frac{E_a}{q} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{00}}{I_{sc}}, \quad (3.1)$$

де  $E_a$  – активаційна енергія рекомбінаційних процесів,  $I_{00}$  – температурно незалежний множник у струмі насичення через діод, розташований у прямому напрямі. З рисунка видно, що на експерименті дійсно спостерігається лінійна залежність:

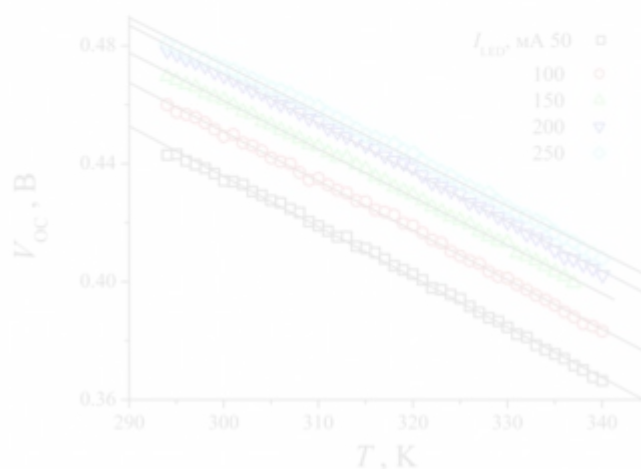


Рис. 3.10. Температурні залежності напруги холостого ходу структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$  при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація.

$$V_{oc} = V_{0,oc} - \beta_{V_{oc}} T. \quad (3.2)$$

Визначені з експериментальних залежностей значення  $V_{0,oc}$  та  $\beta_{V_{oc}}$  зведено у

Табл.3.1. Порівняння виразів (3.1) та (3.2) показує, що  $V_{0,oc} = E_a / q$ , а  $\beta_{V_{oc}}$  має залежати від струму короткого замикання. Дані Табл. 3.1 підтверджують очікувану незалежність активаційної енергії рекомбінаційних процесів

( $E_a = 0,95 \text{ eV}$ ), в той же час як  $\beta_{voc}$  зменшується з підвищенням рівня освітлення, що можна пов'язати зі зростанням струму короткого замикання.

Табл. 3.1. Параметри, визначені з експериментальних температурних залежностей параметрів фотоелектричного перетворення

| $I_{LED},$<br>мА | $V_{0,OC},$<br>В | $\beta_{voc},$<br>$10^{-3}$<br>В/К | $I_{0,SC},$<br>$10^{-5}$ А | $\beta_{sc},$<br>$10^{-8}$<br>А/К | $I_{0,PH},$<br>$10^{-5}$ А | $\beta_{ph},$<br>$10^{-8}$<br>А/К | $T_{M,PMP},$<br>К | $T_{M,FF},$<br>К |
|------------------|------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| 50               | 0,95             | 1,70                               | 7,7                        | 8,0                               | 8,1                        | 8,5                               | 295               | 331              |
| 100              | 0,95             | 1,67                               | 14,1                       | 7,8                               | 14,5                       | 6,7                               | 301               | 330              |
| 150              | 0,95             | 1,63                               | 18,9                       | 3,6                               | 28,4                       | 31                                | 309               | 331              |
| 200              | 0,96             | 1,61                               | 24,1                       | 1,7                               | 39,1                       | 44                                | 311               | 330              |
| 250              | 0,95             | 1,59                               | 29,3                       | 2,4                               | 45                         | 42                                | 313               | 329              |

На наступному рисунку (Рис.3.11) представлені температурні залежності фотоструму та струму короткого замикання. Величина  $I_{PH}$  переважає  $I_{SC}$ , що пов'язано з необхідністю врахування в еквівалентній схемі опорів  $R_{SH,1}$  та  $R_{SH,2}$ [46]:

$$I_{SC} \approx I_{PH} \frac{R_{SH1}}{R_{SH1} + R_{SH2}}. \quad (3.3)$$

Відмінності між ними зростають з підвищенням рівня освітленості та зменшенням температури, що свідчить про несталість величин опорів. Видно, що обидва струми достатньо слабо залежать від температури і ці залежності можна описати лінійними функціями:

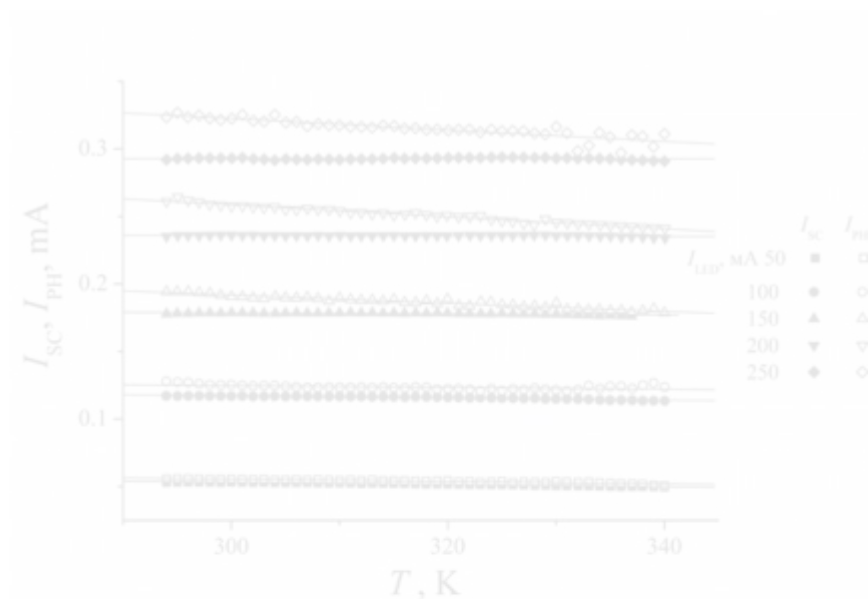


Рис. 3.11. Температурні залежності струму короткого замикання та фотоструму  $\text{CuSi}_{1.8}\text{--CdSe}$  при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація.

$$I_{SC} = I_{0,SC} - \beta_{I_{SC}} T, \quad (3.4)$$

$$I_{PH} = I_{0,PH} - \beta_{I_{PH}} T. \quad (3.5)$$

Визначені величини параметрів відповідно до формул (3.4) та (3.5) наведені в Табл.3.1. Видно, що температурні коефіцієнти струму короткого замикання достатньо малі, в той же час як для фотоструму при збільшенні рівня освітлення залежність від температури підсилюється.

В свою чергу, величина фотоструму може бути визначена наступним чином[47]

$$I_{PH} = I_{PH,lim} \frac{\mu V_{FB}}{d^2} \left[ 1 + \exp \left( \frac{d^2}{\mu \tau V_{FB}} \right) \right], \quad (3.6)$$

де  $I_{PH,lim}$  – так званий граничний фотострум (optically limited light generated current), величина якого, зокрема, пропорційна потоку падаючих фотонів,  $\mu$  та

$\tau$  – рухливість та час життя носіїв заряду,  $V_{FB}$  – напруга у наближенні плоских зон,  $d$  – товщина поглинаючого світло шару напівпровідника. В нашому випадку граничний фотострум пов’язаний з  $I_{0,PH}$  ( $I_{0,SC}$ ) і очікується, що ці величини мають біти прямопропорційні ступеню освітленості. Дійсно, така залежність і спостерігається на експерименті – див. Рис.3.12, а. Лінійність наведених на цьому рисунку залежностей також підтверджує, що інтенсивність випромінювання використаного світлодіода дійсно пропорційна струму через нього. В свою чергу, суттєве підсилення температурної залежності фотоструму при високих рівнях освітлення свідчить, що в цьому випадку відбуваються зміни рухливості та/або часу життя носіїв заряду.

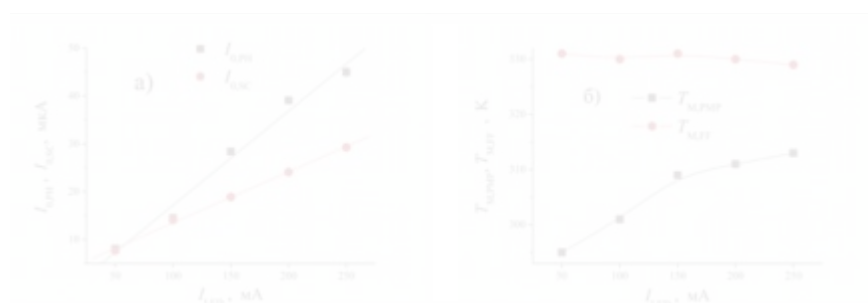


Рис. 3.12. Залежності температурнезалежних компонент струму короткого замикання та фотоструму (а) та температур, що відповідають максимальним значенням вихідної потужності та коефіцієнта форми (б) від рівня освітлення. Точки – експеримент, лінії – лінійна апроксимація (а).

Температурна залежність максимальної вихідної потужності досліджуваних структур є немонотонною функцією температури – див. Рис.3.13. Причому температура, при якій спостерігається максимальна ефективність фотоелектричного перетворення ( $T_{M,PMR}$ ) зсувається в бік більших значень при зростанні потоку падаючих фотонів (див. дані Табл.3.1 та Рис.3.13,б).

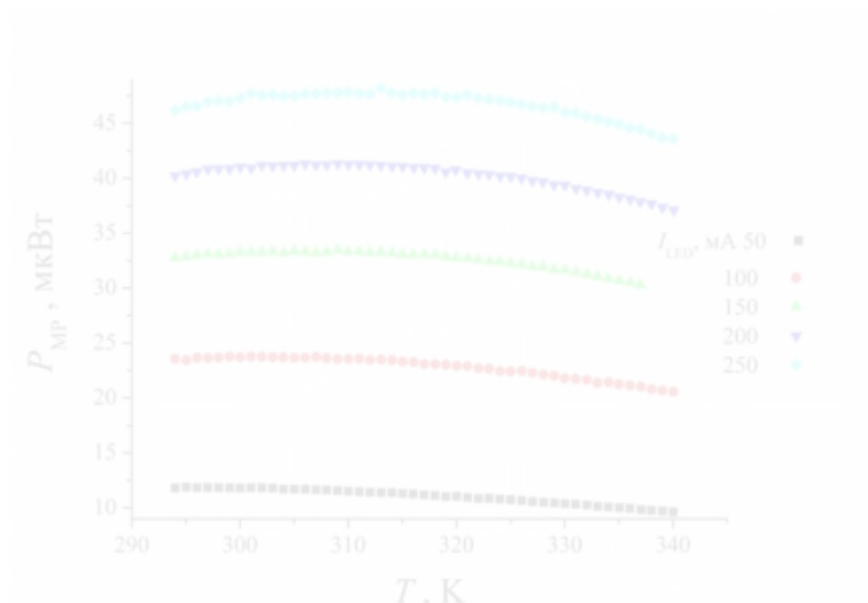


Рис. 3.13. Температурні залежності максимальної вихідної потужності структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$  при різних рівнях освітлення.

Також була розглянута величина відносної вихідної потужності, нормована до інтенсивності освітлення. Відповідна залежність представлена на Рис. 3.14. При розрахунках використовувалось значення  $P_{MP}$ , яке відповідає максимуму температурної залежності. Представлені дані свідчать, що зростання концентрації фотогенерованих носіїв заряду викликає зниження ефективності фотоелектричного перетворення, причому ефект достатньо суттєвий і може досягати 25 %.

Рис. 3.15 наводить ілюструє температурні залежності фактора форми ВАХ. Подібно до випадку вихідної потужності,  $FF$  також немотонно залежить від температури. Проте, на відміну від згаданого випадку температура, при якій спостерігається найбільше значення фактору форми ( $T_{M,FF}$ ) практично не залежить від рівня освітленості (див. дані Табл.3.1 та Рис.3.12,б)

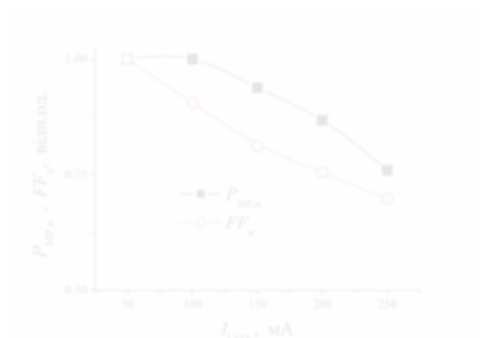


Рис.3.14. Залежність нормованих вихідної потужності та коефіцієнта форми від інтенсивності освітлення

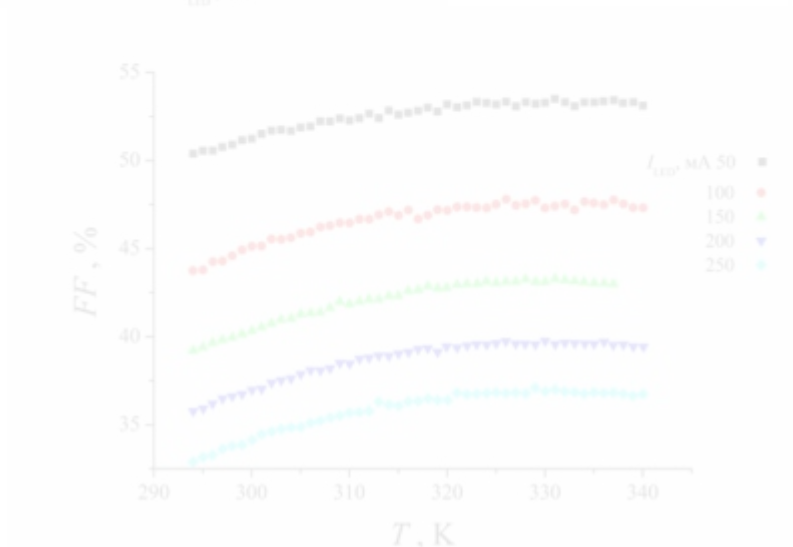


Рис. 3.15. Температурні залежності коефіцієнта форми ВАХ структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{--CdSe}$  при різних рівнях освітлення.

Зауважимо, величина  $FF$  характеризує відхилення реальної форми ВАХ у четвертому квадранті від ідеалізованої прямокутної, а її зменшення свідчить про зростання втрат фотоприймача. Дані Рис.3.15 свідчать, що внутрішні втрати структури  $\text{CuS}\text{--CdSe}$  зростають при підвищенні рівня освітлення. Зрозуміло, що  $FF$  прямопропорційно залежить від максимальної вихідної потужності, проте, як свідчать дані Рис. 3.14, зменшення  $FF$  неможливо пояснити лише деградацією величини  $P_{MP}$ .



### 3.3. ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ CuS-CDSE ВІД РІВНЯ ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ

Як вже зазначалося, при освітленні починає спостерігатися S-подібна форма ВАХ, що свідчить про часткову зміну механізму перенесення заряду, що і призводить до необхідності врахування наявності зустрічно увімкненого діода у еквівалентній схемі. Враховуючи це, спочатку зупинимось на механізмі проходження струму у структурі CuS-CdSe без освітлення. На Рис.3.16 представлені типові ВАХ для цього випадку при різних температурах, а на Рис.3.17 – температурні залежності струму насичення та фактору неідеальності. Наявний злам на обох залежностях, представлених на Рис. 3.17 свідчить, що навіть за відсутності освітлення в різних температурних діапазонах механізм перенесення заряду відмінний.

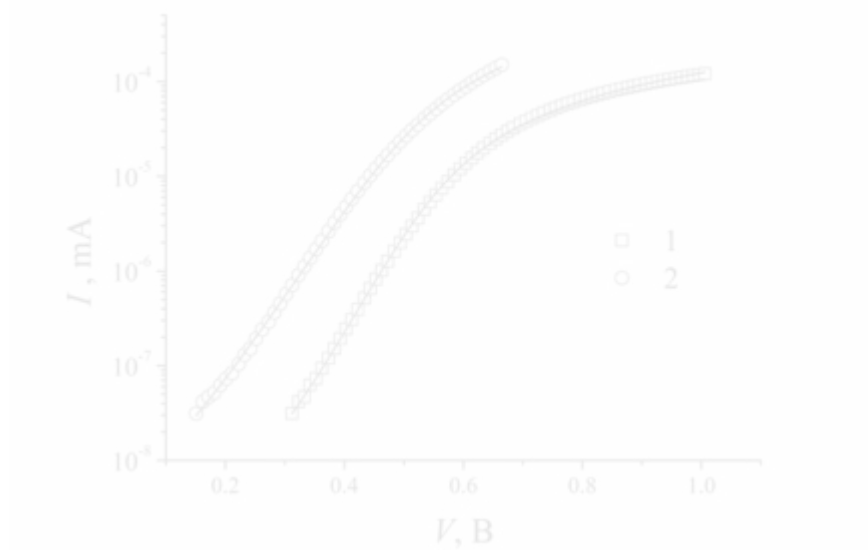


Рис. 3.16. Темнові ВАХ структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$  при температурі 295 К (1) та 340 К (2). Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до (2.1).



Рис. 3.17. Температурні залежності струму насичення (а) та фактору неідеальності та тунельного коефіцієнта (б) темнових ВАХ. Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формули (3.8).

Дійсно, струм через бар'єрну структуру може проходити або внаслідок термоактиваційних процесів і описуватися виразом (2.1), або бути пов'язаним з тунелюванням носіїв. В останньому випадку ВАХ має описуватися виразом

$$I = I_{0,1} \left[ \exp \left( A(V - R_{SH,2}I) \right) - 1 \right] + \frac{V - R_{SH,2}I}{R_{SH,1}}, \quad (3.7)$$

де  $A$  – тунельний коефіцієнт, який не має залежати від температури і визначається, зокрема, висотою бар'єру; як видно з формул (2.1) та (3.7)

$A = (n_1 kT/q)^{-1}$ . На рис. 3.17, б також представлена температурна залежність цього коефіцієнта. Видно, що при  $T > 315$  К ця величина не залежить від температури. Таким чином, можна зробити висновок, що за відсутності освітлення механізм перенесення заряду при температурах нижче 315 К термоактиваційний, а при більш високих – тунельний. Як видно, з Рис. 3.17, а, в обох випадках величина струму насичення добре описується експоненційною залежністю:

$$I_{0,1} = I_{001} \exp \left[ -\frac{E_{a,I1}}{kT} \right], \quad (3.8)$$

де  $E_{a,I1}$  – активаційна енергія. Її значення відрізняється для різних механізмів, про що свідчить зміна нахилу кривої на Рис. 3.17,а. Як показали розрахунки, для термоактиваційного механізму подолання бар'єру (при  $T < 315$  К)  $E_{a,I1} = (1,26 \pm 0,03)$  еВ, а для тунельного (при  $T > 315$  К)  $E_{a,I1} = (0,59 \pm 0,02)$  еВ.

На рис. 3.18 та 3.19 представлені температурні залежності  $I_{01}$  та  $n_1$  при різних рівнях освітлення структури, та, для зручності порівняння, повторені темнові. Видно, що при освітленні а) пригнічується тунельна складова струму (залежності  $I_{01}$  та  $n_1$  від температури при освітленні за своїм характером схожі на темнові при  $T < 315$  K); б) суттєво зростають величини як фактору неідеальності, так і струму насичення, причому ефекти нелінійні щодо інтенсивності падаючого світла. З іншого боку, характерна енергія активації струму не залежить (в межах похибок) від інтенсивності освітлення – відповідні дані приведені у Табл.3.2. Зауважимо, що для низьких рівнів освітлення ( $I_{LED}$  50 та 100 mA) виникли певні труднощі точної оцінки  $I_{01}$ , так як ця величина набагато менша  $I_{02}$  – див. далі.

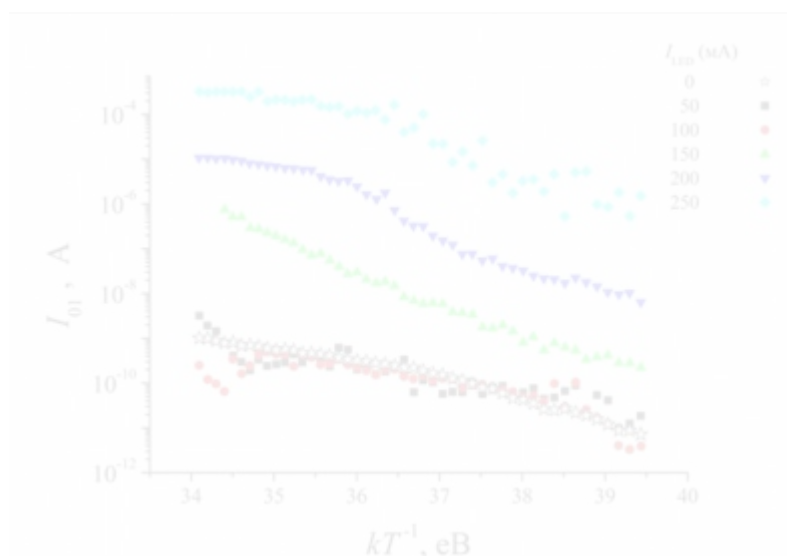


Рис. 3.18. Температурні залежності струму насичення прямого діоду при різних рівнях освітлення.

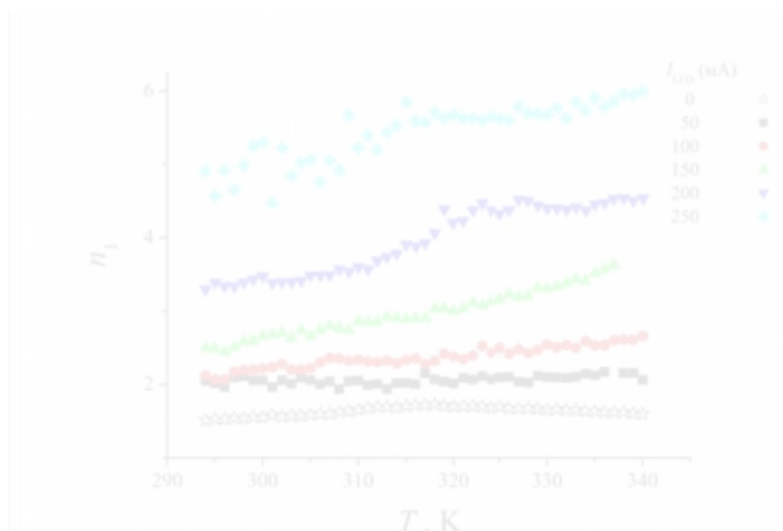


Рис. 3.19. Температурні залежності фактору неідеальності прямого діоду при різних рівнях освітлення.

Табл.3.2. Активаційні енергії струмів насичення структури  $\text{CuS}_{1.8}\text{-CdSe}$

| $I_{\text{LED}}, \text{mA}$ | $E_{a1}, \text{meV}$ | $E_{a2}, \text{meV}$ |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 0                           | $1260 \pm 30$        | -                    |
| 50                          |                      | $643 \pm 7$          |
| 100                         |                      | $618 \pm 5$          |
| 150                         | $1260 \pm 70$        | $488 \pm 4$          |
| 200                         | $1100 \pm 200$       | $472 \pm 6$          |
| 250                         | $1500 \pm 300$       | $442 \pm 5$          |

На нашу думку, поява значної кількості фотогенерованих носіїв заряду стає причиною заповнення пасток, розташованих на границі розділу структури. В свою чергу, це викликає зміну висоти бар'єру та перерозподіл відносних інтенсивностей термоemisійних та тунельних процесів. До речі, наявність S-подібної форми у літературі нерідко пов'язується з процесами накопичення заряду на внутрішніх інтерфейсах.

На Рис.3.20 та 3.21 наведено результати, отримані для величин шунтуючих опорів. Видно, освітлення стає причиною суттєвого зменшення  $R_{\text{SH1}}$ , яке залежить і від кількості падаючих фотонів. В однодіодній моделі цей опір пов'язується з наявністю альтернативних каналів (поряд з подоланням

бар'єру) проходження носіїв заряду. Як видно, освітлення суттєво полегшує цей процес.

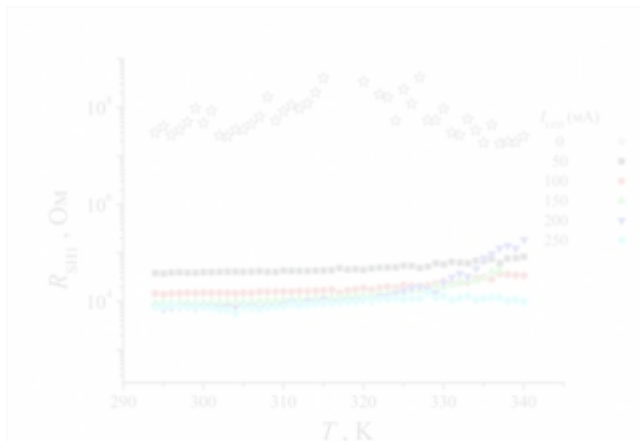


Рис. 3.20. Температурні залежності шунтуючого опору прямого діоду при різних рівнях освітлення.

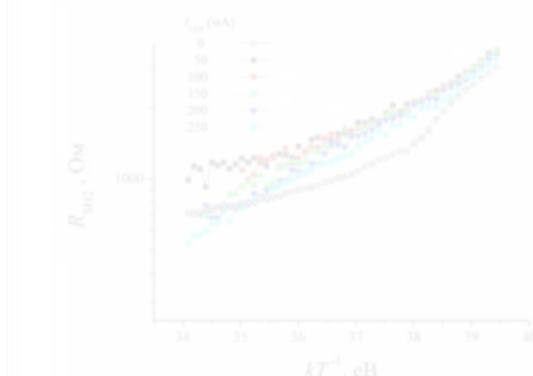


Рис. 3.21. Температурні залежності шунтуючого опору прямого діоду при різних рівнях освітлення.

Щодо  $R_{SH2}$ , до його величина за умов освітлення переважає значення, отримане у темряві, що достатньо несподівано. З іншого боку, у однодіодному наближенні ця величина має бути пов'язана з послідовним до переходу опором, зокрема об'єму напівпровідника. При освітленні відбувається часткова перебудова зонної структури і  $R_{SH2}$  перестає визначатися послідовним опором, що у зумовлює її ефективне зростання,

визначене з апроксимації ВАХ. Водночас вона залежить від концентрації вільних носіїв (рівноважних та нерівноважних): з рис.3.12 видно, що має місце експоненційне зменшення цього опору при зростанні температури, а також спад при підвищенні інтенсивності освітлення.

Отримані температурні залежності  $R_{SH1}$  і  $R_{SH2}$  дозволяють пояснити співвідношення між  $I_{PH}$  та  $I_{SC}$  (рис.3.2). Дійсно, при малих рівнях освітлення  $R_{SH1} \gg R_{SH2}$  і тому відмінності між  $I_{PH}$  та  $I_{SC}$  незначні (див. формулу (3.3)). Збільшення рівня освітлення викликає зменшення і  $R_{SH1}$ , і  $R_{SH2}$ , проте  $R_{SH1}(I_{LED} = 50 \text{ мА}) / R_{SH1}(I_{LED} = 250 \text{ мА}) \approx 5$ , тоді як  $R_{SH2}(I_{LED} = 50 \text{ мА}) / R_{SH2}(I_{LED} = 250 \text{ мА}) \approx 1,2$  при  $T = 300 \text{ К}$  і тому різниця струмів зростає. В свою чергу,  $R_{SH1}$  практично не залежить від температури, тоді як  $R_{SH2}$  зменшується при нагріві структури, що спричинює виявлене зменшення різниці  $I_{PH}$  та  $I_{SC}$ .

З Рис. 3.22 видно, що струм насичення  $I_{02}$  також, як і  $I_{01}$ , є термоактивованим, тобто описується виразом

$$I_{0,2} = I_{002} \exp \left[ - \frac{E_{a,I2}}{kT} \right]. \quad (3.9)$$

Визначені з експериментальних даних енергії активації  $E_{a,I2}$  приведені в Табл.3.2. Як видно з даних табл. та Рис.3,22, збільшення рівня освітлення викликає зменшення енергії активації предекспоненційного множника. Крім того, в цих умовах зменшується як температурна залежність фактору неідеальності  $n_2$ , так і його абсолютна величина. На нашу думку, це пов'язано з тим, що за наявності значної кількості фотогенерованих носіїв заряду спостерігається зменшення висоти бар'єру зустрічно увімкненого діоду.

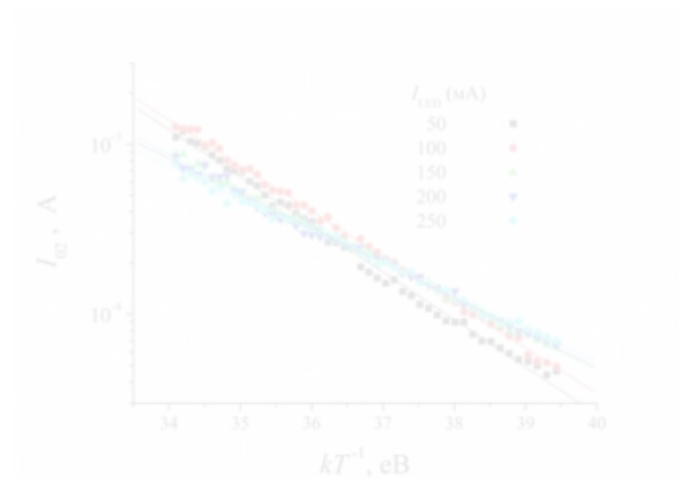


Рис. 3.22. Температурні залежності струму насичення зворотного діоду при різних рівнях освітлення. Точки – експеримент, лінії – апроксимація відповідно до формули (3.9).

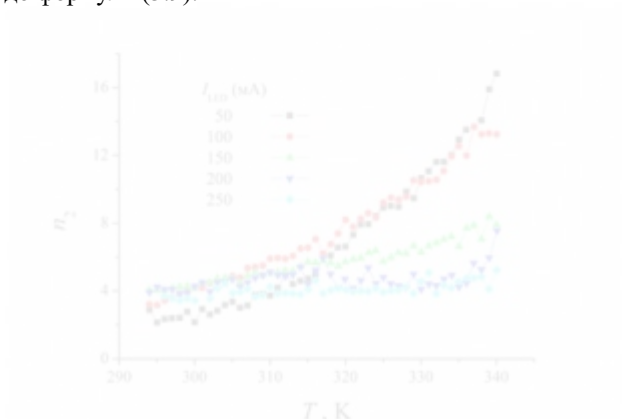


Рис. 3.23. Температурні залежності фактору неідеальності зворотного діоду при різних рівнях освітлення.

## ВИСНОВКИ

1. Шляхом застосування 14 метаевристичних методів апроксимації вольт-амперних характеристик відповідно до дводіодної моделі (із зустрічним ввімкненими діодами) встановлено, що найбільш придатним для вирішення подібної задачі є EBLSHADE.

2. Встановлено, що ефективність фотоелектричного перетворення тонкоплівкових фотоприймачів ультрафіолетового випромінювання CuS-CdSe немонотонно залежить від температури. З підвищенням рівня освітлення ефективність зменшується, а максимум температурної залежності зміщується в бік більших температур.

3. З'ясовано, що при збільшенні рівня освітленості в структурах CuS-CdSe суттєво послаблюються тунельні процеси перенесення заряду, зменшується активаційна енергія процесів, пов'язаних з накопиченням заряду на внутрішній границях розділу і залишається незмінною активаційна енергія термостимульованих процесів.



## Совпадения

Источники из Интернета

1

1 <https://sword.cit.ie/engmas/3>

0.14%

Источники из Библиотеки

13

2 Студенческая работа ID файла: 5918727 Учебное заведение: National University of Life and Environ 11 Источник 0.14%

3 Студенческая работа ID файла: 5700775 Учебное заведение: National Technical University of Ukrain 2 Источник 0.14%