

# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНІЧНОГО СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА З АКТИВНИМ ШАРОМ D18:L8-BO

Т. В. Сіряк<sup>1,а</sup>, А. В. Гільчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

## Анотація

У цій роботі проведено чисельне моделювання органічної сонячної комірки на основі системи D18:L8-BO за допомогою програмного середовища *OghmaNano*. Досліджено вплив ключових технологічних параметрів — товщини активного шару, температури експлуатації, інтенсивності освітлення та мобільності носіїв заряду — на фотоелектричні характеристики пристрою. Змодельовано вольт-амперні характеристики ( $J-V$  криві) у світловому режимі при різних рівнях освітлення (0–100 %). При цьому, рівень освітлення 100 % відповідає стандартному сонячному спектру AM1.5G, а 0 % — умовам повної темряви. Побудовано залежності параметрів  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  і  $PCE$  від варійованих умов, проведено аналіз чутливості до змін рухливості та температури, а також проведено порівняння результатів з теоретичними і наявними теоретичними даними. Результати можуть бути використані для проектування високоефективних мобільних і гнучких органічних фотоелектричних пристроїв.

**Ключові слова:** органічні сонячні комірки, D18:L8-BO, вольт-амперна характеристика, рекомбінація

## Вступ

У сучасному світі, що стрімко переходить до цифровізації, зростають не лише технологічні потреби суспільства, а й вимоги до джерел енергії. Глобальні енергетичні виклики вимагають переходу від традиційних викопних ресурсів до відновлюваних, чистих і довготривалих джерел енергії [1].

Одним із найбільш перспективних напрямів у цій галузі є використання сонячної енергії — невичерпного ресурсу, доступного у більшості регіонів світу. Особливу увагу наукової спільноти привертають органічні сонячні елементи, які поєднують гнучкість, низьку собівартість виробництва та екологічність [2, 3]. Серед сучасних органічних систем значний інтерес викликають фотоелементи на основі системи D18:L8-BO, які продемонстрували лабораторні значення ефективності понад 18–19 % та характеризуються гарною оброблюваністю та стабільністю [4, 5].

У даній роботі здійснено чисельне моделювання органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO за допомогою програмного середовища *OghmaNano*. Метою дослідження є вивчення впливу ключових технологічних параметрів на фотоелектричні характеристики комірки, зокрема: товщини активного шару, температури експлуатації, мобільності носіїв заряду та інтенсивності освітлення.

В рамках дослідження змодельовано вольт-амперні характеристики ( $J-V$  криві) у різних режимах роботи, включаючи повну темряву, а також

побудовано залежності основних фотоелектричних параметрів — струму короткого замикання  $J_{SC}$ , напруги холостого ходу  $V_{OC}$ , коефіцієнта заповнення  $FF$  та ефективності перетворення енергії  $PCE$  — від технологічних умов.

Результати роботи можуть бути використані для оптимізації структури органічної сонячної комірки D18:L8-BO з метою досягнення максимальної ефективності перетворення сонячної енергії в електричну.

## 1. Переваги органічних сонячних комірок з використанням D18:L8-BO та принцип їх роботи

Органічні сонячні комірки на основі D18:L8-BO є перспективною технологією для створення мобільних, гнучких та інтегрованих фотоелектричних пристроїв. Завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям органічних напівпровідників, такі комірки вирізняються малою вагою, гнучкістю, низькою собівартістю виробництва, можливістю виготовлення методом рулонного друку та відсутністю токсичних компонентів [2, 3, 4]. Ці характеристики роблять їх привабливими для застосування у носимій електроніці, будівельній інтеграції, авіаційній та космічній техніці.

Принцип роботи ґрунтується на перетворенні енергії фотонів у електричну енергію через кілька послідовних процесів. Після поглинання світла органічним матеріалом утворюються екситони — зв'язані пари електрона і дірки. Через низьку діелектричну

<sup>а</sup>siryak.t05@gmail.com

проникність органічних матеріалів екситони не розпадаються самостійно, тому їхнє розділення відбувається на межі донорного та акцепторного компонентів активного шару. У цьому процесі електрон переходить до матеріалу з нижчим рівнем LUMO, тоді як дірка залишається у донорному матеріалі, формуючи вільні носії заряду.

Вільні носії транспортуються до відповідних електродів завдяки механізмам дрейфу та дифузії. Успішне збирання носіїв заряду на електродах формує електричний струм у зовнішньому колі. Ключовими параметрами, що визначають ефективність комірки, є довжина дифузії екситонів, енергія бар'єру на межі розділення, рухливість електронів та дірок, а також швидкість рекомбінаційних процесів [5, 6].

Система D18:L8-BO є однією з найефективніших у класі нефулеренових OSC. Її переваги зумовлені високою електронною мобільністю, збалансованими енергетичними рівнями НОМО/LUMO, сприятливою морфологією суміші та можливістю формування добре організованих наноструктур в активному шарі [4]. Завдяки цим властивостям, пристрої на основі D18:L8-BO демонструють ефективність понад 18–19 % у лабораторних умовах [2], з потенціалом досягнення понад 22 % при подальшому вдосконаленні інтерфейсів та селективних транспортних шарів.

Таким чином, органічні сонячні комірки на основі D18:L8-BO поєднують в собі високий потенціал енергетичної ефективності, економічність і екологічність, що робить їх конкурентоспроможною альтернативою для новітніх фотоелектричних застосувань.

## 2. Методологія досліджень

У даній роботі здійснено моделювання органічної сонячної комірки з активним шаром на основі суміші D18:L8-BO. Для дослідження використовувалася комп'ютерна модель одновимірної структури комірки, яка дозволяє аналізувати процеси перенесення носіїв заряду, рекомбінації та вплив технологічних параметрів на ефективність перетворення енергії.

Варіювалася товщина активного шару в межах 50–200 нм для визначення оптимального балансу між поглинанням світла та рухливістю носіїв. Досліджено вплив температури (250–350 К) і змінної інтенсивності освітлення, включаючи повну темряву. Оцінювалися основні фотоелектричні характеристики: густина струму короткого замикання  $J_{SC}$ , напруга холостого ходу  $V_{OC}$ , коефіцієнт заповнення FF, зовнішня квантова ефективність EQE та коефіцієнт перетворення енергії PCE.

Моделювання здійснювалося шляхом чисельного розв'язання рівнянь дрейфу та дифузії носіїв заряду із врахуванням рекомбінаційних процесів, оптичного поглинання та граничних умов у програмному середовищі *OghmaNano*.

### 2.1. Система рівнянь

Тепер можна перейти до опису системи рівнянь, яка використовується для чисельного моделювання

роботи органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO у середовищі *OghmaNano*.

Побудова геометрії задачі здійснювалася з урахуванням необхідності оптимізації розрахункової області для досягнення високої точності обчислень за наявних обчислювальних ресурсів. Моделювання органічної сонячної комірки враховує специфічні фізичні процеси, характерні для органічних напівпровідників: низьку рухливість носіїв заряду, генерацію екситонів із наступною дисоціацією, наявність пасткових станів та високий рівень рекомбінаційних втрат.

Для коректного опису цих процесів модель включає систему рівнянь, яка описує розподіл електростатичного потенціалу, динаміку екситонів, транспортування електронів і дірок, пасткові ефекти та механізми рекомбінації.

Розподіл електростатичного потенціалу в активному шарі описується рівнянням Пуассона:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-), \quad (1)$$

де  $\varphi$  — електростатичний потенціал, В;  $\epsilon_0$  — діелектрична проникність вакууму, Ф/м;  $\epsilon_r$  — діелектрична проникність активного шару;  $q$  — заряд електрона, Кл;  $p$ ,  $n$  — концентрації дірок і електронів відповідно,  $\text{м}^{-3}$ ;  $N_D^+$ ,  $N_A^-$  — концентрації іонізованих донорів і акцепторів,  $\text{м}^{-3}$ .

Оскільки в органічних сонячних комірках носії заряду утворюються через екситони, необхідно враховувати їхню генерацію, дифузію та дисоціацію. Динаміка екситонів описується рівнянням:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_X \nabla^2 X - k_d X - k_f X p + G_X, \quad (2)$$

де  $X$  — концентрація екситонів,  $\text{м}^{-3}$ ;  $D_X$  — коефіцієнт дифузії екситонів,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $k_d$  — швидкість спонтанної дисоціації екситонів,  $1/\text{с}$ ;  $k_f$  — коефіцієнт френелівської рекомбінації,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G_X$  — швидкість генерації екситонів під дією світла,  $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$ .

Після дисоціації екситонів вільні електрони та дірки рухаються через дрейф у електричному полі та дифузію, що описується рівняннями струму:

$$J_n = q \mu_n n E + q D_n \nabla n, \quad (3)$$

$$J_p = q \mu_p p E - q D_p \nabla p, \quad (4)$$

де  $J_n$ ,  $J_p$  — густини струму електронів і дірок,  $\text{А}/\text{м}^2$ ;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  — рухливості електронів і дірок,  $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $E$  — електричне поле, В/м;  $D_n$ ,  $D_p$  — коефіцієнти дифузії електронів і дірок,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Вплив пасткових станів на перенесення заряду враховується через ефективну рухливість носіїв:

$$\mu_e(n) = \frac{\mu_{0,e} n_{\text{free}}}{n_{\text{free}} + n_{\text{trap}}}, \quad (5)$$

$$\mu_p(p) = \frac{\mu_{0,p} p_{\text{free}}}{p_{\text{free}} + p_{\text{trap}}}, \quad (6)$$

де  $n_{\text{free}}, p_{\text{free}}$  — концентрації вільних електронів і дірок,  $\text{м}^{-3}$ ;  $n_{\text{trap}}, p_{\text{trap}}$  — концентрації пасткових станів,  $\text{м}^{-3}$ ;  $\mu_{0,e}, \mu_{0,p}$  — номінальні рухливості в ідеальному випадку без пасток,  $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

Домінуючим механізмом рекомбінації в органічних сонячних комірках є рекомбінація за механізмом Shockley-Read-Hall, яка описується рівнянням:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_t) + \tau_n(p + p_t)}, \quad (7)$$

де  $R_{\text{SRH}}$  — швидкість рекомбінації за механізмом SRH,  $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;  $n_i$  — власна концентрація носіїв у матеріалі,  $\text{м}^{-3}$ ;  $\tau_n, \tau_p$  — середні часи життя електронів і дірок, с;  $n_t, p_t$  — концентрації захоплених носіїв,  $\text{м}^{-3}$ .

Таким чином, запропонована система рівнянь дозволяє комплексно врахувати основні фізичні процеси, що визначають ефективність перетворення енергії в органічних сонячних комірках на основі D18:L8-BO.

## 2.2. Чисельне моделювання органічної D18:L8-BO комірки

Для чисельного моделювання роботи органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO використовувалося програмне середовище OghmaNano. Побудова геометрії задачі здійснювалася з урахуванням необхідності оптимізації розрахункової області для досягнення високої точності обчислень на доступних обчислювальних ресурсах. Оптимальним виявився двовимірний профіль комірки, який дозволяє точно відтворити основні фізичні процеси при мінімальних обчислювальних витратах. Оптимальним виявився двовимірний профіль комірки, який дозволяє точно відтворити основні фізичні процеси при мінімальних обчислювальних витратах. Розміри моделі складали  $100 \text{ мкм} \times 380 \text{ нм}$  (по осях  $X$  та  $Y$  відповідно).

Процес побудови моделі складався з етапів:

1. Створення базової структури органічної сонячної комірки із заданими параметрами матеріалів і вибором типу пристрою (Organic Solar Cell) із запропонованого переліку (рис. 1).
2. Налаштування геометрії, зокрема завдання товщини кожного шару відповідно до даних, наведених у таблиці 1.
3. Визначення фізичних процесів, які розраховуються: перенесення заряду (дрейф-дифузія), генерація та рекомбінація екситонів, розподіл електростатичного потенціалу.
4. Проведення тестів на чутливість для аналізу впливу параметрів моделювання на фотоелектричні характеристики пристрою.

Органічна сонячна комірка має багатшарову структуру (рис. 2), яка включає:

- прозорий анод ITO,
- шар транспортування дірок PEDOT:PSS,
- активний шар D18:L8-BO,
- шар транспортування електронів PNDIT-F3N,
- катод срібла (Ag).

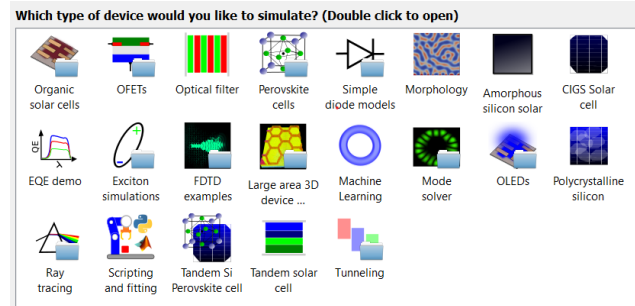


Рис. 1. Види девайсів, доступних для моделювання в середовищі OghmaNano.

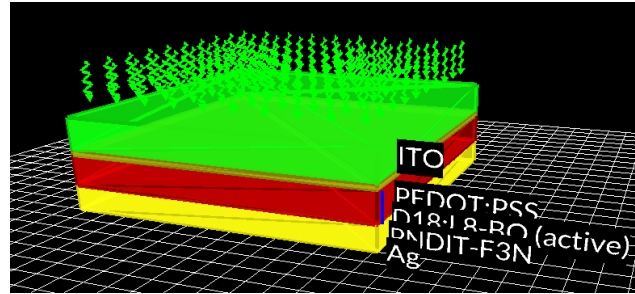


Рис. 2. Структура органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO.

Кожен функціональний шар виконує певну роль у роботі пристрою. Прозорий електрод ITO забезпечує інжекцію носіїв та високу прозорість. Шар PEDOT:PSS згладжує поверхню та транспортує дірки. Активний шар D18:L8-BO відповідає за поглинання світла, утворення та дисоціацію екситонів. PNDIT-F3N транспортує електрони до катода, а срібний електрод ефективно збирає носії заряду.

Для оцінки продуктивності комірки проводилася серія тестів на чутливість:

- Варіювалася товщина активного шару в межах 50–200 нм.
- Аналізувався вплив рівня освітлення: від стандартного спектру  $AM1.5G$  (100 %) до поступового зниження інтенсивності випромінювання, включаючи режим повної темряви (0 %).
- Досліджувався вплив температури в діапазоні 285–350 К.

Для коректного моделювання електричних процесів у багатшаровій структурі сонячної комірки було виконано налаштування електричної сітки за допомогою модуля Electrical Mesh Editor у середовищі OghmaNano. Графічне відображення побудованої сітки наведено на рис. 3.

Сітка будувалася вздовж осі  $Y$ , що відповідає напрямку зміни товщини шарів. Кожен шар мав задану товщину, кількість вузлів (10 точок на шар) та коефіцієнт збільшення кроку (1.0), що забезпечувало рівномірний розподіл точок у межах шару. Загальна кількість шарів становила 5, що відповідно дало 50 вузлів у моделі. Загальна товщина структури становила приблизно  $4.0 \times 10^{-7}$  м. Така сітка забезпечує баланс між точністю моделювання та швидкістю обчислень.

Таблиця 1. Товщина різних шарів органічної сонячної комірки

Шар	Товщина (м)
ITO	$1.3 \times 10^{-7}$
PEDOT:PSS	$2.0 \times 10^{-8}$
D18:L8-BO	$5.0 \times 10^{-8} - 2.0 \times 10^{-7}$
PNDIT-F3N	$5.0 \times 10^{-9}$
Ag	$1.0 \times 10^{-7}$

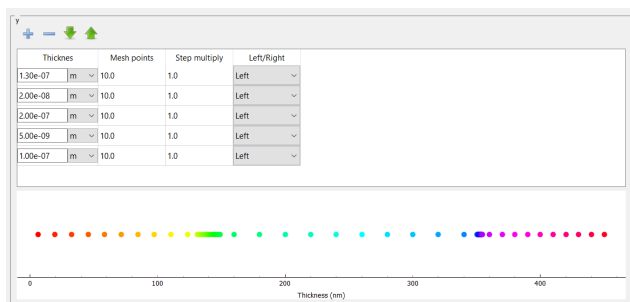


Рис. 3. Сітка для структури сонячної комірки.

Основними параметрами побудови сітки є рівномірний розподіл точок усередині кожного шару, відповідність кількості вузлів товщині шару для підвищення точності розрахунків, оптимізація кількості елементів сітки для забезпечення балансу між точністю та обчислювальними витратами.

### 3. Результати і обговорення

У ході чисельного моделювання органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO було досліджено вплив товщини активного шару, рухливості носіїв заряду, температури та інтенсивності освітлення на ключові фотоелектричні параметри пристрою.

Моделювання проведено для товщин активного шару в діапазоні 50–200 нм. Встановлено, що максимальне значення коефіцієнта перетворення енергії (PCE) досягається при товщині 110 нм. При подальшому збільшенні товщини спостерігається зниження  $V_{OC}$ , FF та PCE, що обумовлено підвищеними рекомбінаційними втратами. Детальні результати наведені у Таб. 2.

Залежності  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF та PCE від товщини активного шару представлені відповідно на рисунках 4, 5, 6 та 7.

Характеристики J–V при різній товщині активного шару подані на рис. 8, де видно оптимальну форму кривих при товщині 110 нм.

Досліджено вплив рухливості носіїв заряду у діапазоні від  $1.4 \times 10^{-7}$  до  $1.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Результати наведено в Таб 3, де найвищу ефективність PCE = 18.41% отримано при  $1.4 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Залежності J–V характеристик при зміні рухливості наведено на рис. 9.

Було проведено моделювання залежності фотоелектричних параметрів комірки від температури в

Таблиця 2. Вихідні параметри при різній товщині активного шару.

Товщина, нм	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	FF, %	PCE, %
50	0.867	-16.589	77.9	11.505
65	0.867	-21.000	77.3	14.002
80	0.866	-24.896	76.8	16.568
110	0.858	-25.041	74.1	15.911
125	0.855	-24.520	72.4	15.000
140	0.851	-23.890	70.7	14.368
170	0.845	-24.010	65.9	13.378
200	0.841	-24.792	60.0	12.533

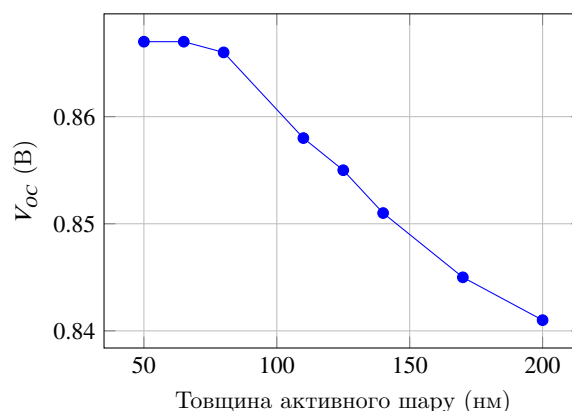


Рис. 4. Залежність  $V_{OC}$  від товщини активного шару

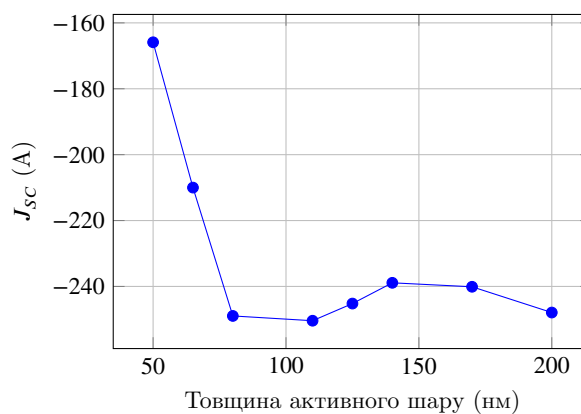


Рис. 5. Залежність  $J_{SC}$  від товщини активного шару

Таблиця 3. Вихідні параметри при різній рухливості носіїв заряду.

Рухливість, $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	FF, %	PCE, %
$1.4 \times 10^{-4}$	0.81	-25.57	85.97	17.81
$1.4 \times 10^{-5}$	0.83	-25.56	85.99	18.41
$1.4 \times 10^{-6}$	0.84	-25.51	82.34	17.71
$1.4 \times 10^{-7}$	0.85	-24.79	60.00	12.53

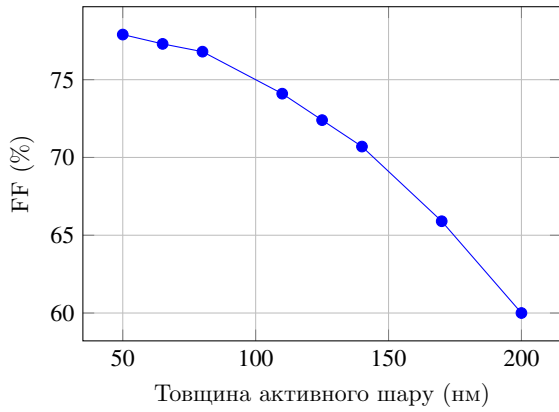


Рис. 6. Залежність FF від товщини активного шару

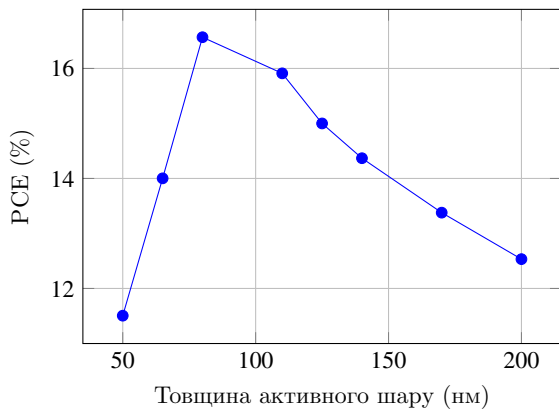


Рис. 7. Залежність PCE від товщини активного шару

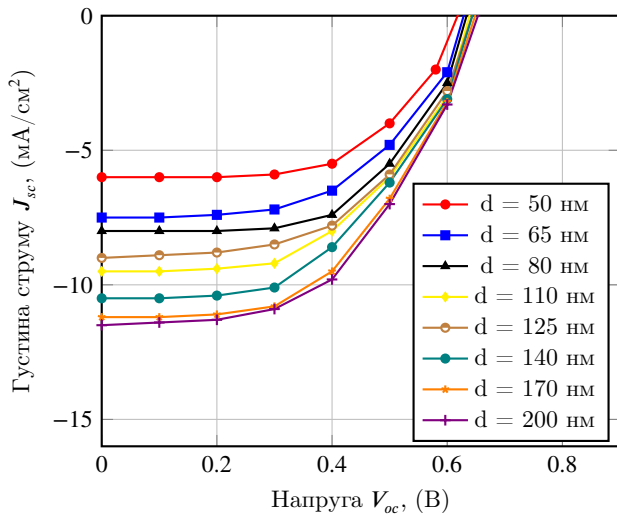


Рис. 8. J–V характеристики органічної сонячної комірки при різних товщинах активного шару.

діапазоні 285–380K при оптимальній товщині 110нм.

Дані наведені у таблиці 4. Із підвищенням температури спостерігається зниження  $V_{OC}$  та PCE, а також невелике FF.

Графічне зображення залежностей  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF та PCE від температури наведено на рис. 10 та 11.

У Таблиці 5 наведено зміну ключових параметрів органічної сонячної комірки при різних інтенсивно-

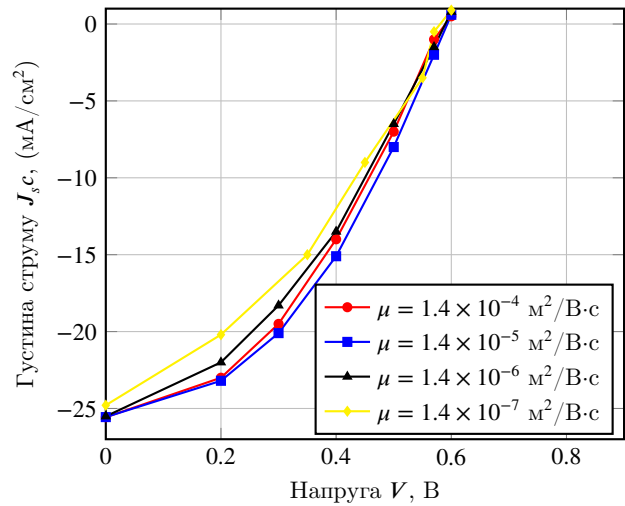


Рис. 9. J–V характеристики органічної сонячної комірки при зміні рухливості носіїв заряду.

Таблиця 4. Вихідні параметри при різній температурі.

Температура, К	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	FF, %	PCE, %
285	0.86	-24.68	60.02	13.01
300	0.84	-24.71	60.10	12.53
315	0.81	-24.73	61.13	12.06
330	0.79	-24.74	61.24	11.58
345	0.77	-24.75	61.89	11.01
360	0.74	-24.76	61.62	10.85
370	0.73	-24.77	61.42	10.62
380	0.72	-24.77	61.40	10.51

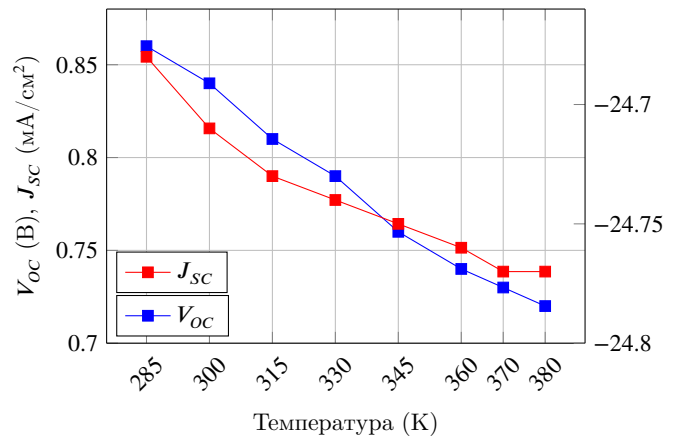


Рис. 10. Залежність  $V_{OC}$  та  $J_{SC}$  від температури.

сті освітлення: від стандартного сонячного спектру AM1.5 до повної темряви. Як видно з таблиці, із зменшенням інтенсивності падають як  $J_{SC}$ , так і  $V_{OC}$ , що відповідає фізичній природі процесів фотогенерації. У повній темряві не відбувається генерація екситонів, відповідно — струм відсутній. Найвищу ефективність ( $PCE = 12.53\%$ ) отримано при стандар-

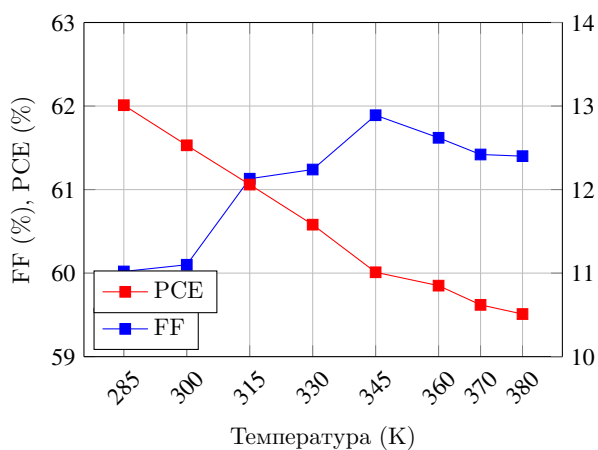


Рис. 11. Залежність FF та PCE від температури.

тній інтенсивності (100%). Значення  $V_{OC}$  демонструє логарифмічну залежність, а  $J_{SC}$  — майже лінійну.

Таблиця 5. Вихідні параметри при різній інтенсивності освітлення.

Інтенсивність, % від AM1.5	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	FF, %	PCE %
0	0.00	0.00	—	0.00
50	0.74	-12.35	63.4	5.80
75	0.79	-18.75	67.8	10.04
100	0.85	-24.79	60.0	12.53

На Рис. 12 зображено вольт-амперні характеристики ( $J-V$ ) органічної сонячної комірки за різної інтенсивності освітлення. Чітко видно зростання густини струму короткого замикання та напруги холостого ходу зі збільшенням інтенсивності світла. У режимі темряви струм практично відсутній, що відповідає лише темновим струмам витоку. Графік підтверджує ефективну фотоактивацію комірки при освітленні.

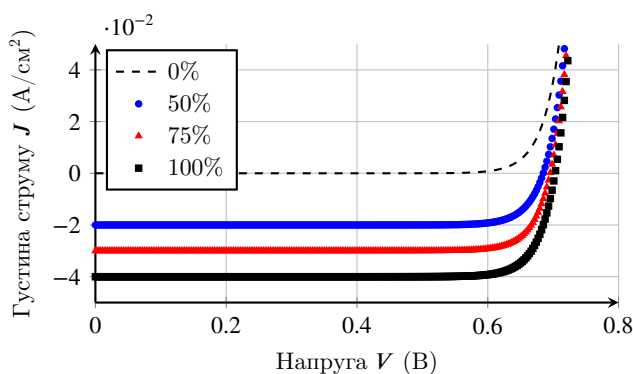


Рис. 12. Вольт-амперна характеристика при різній інтенсивності освітлення.

### 3.1. Верифікація комп'ютерного моделювання

Для оцінки достовірності чисельного моделювання органічної сонячної комірки на основі D18:L8-BO було проведено верифікацію результатів із теоретичними даними з літератури. Порівняння виконано для основних фотоелектричних параметрів:  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF та PCE. Результати верифікації наведено у таблиці 6.

Таблиця 6. Порівняння параметрів моделювання і теорії.

Параметр	Модель	Теорія	Відхилення (%)
$V_{OC}$ (В)	0.858	0.870	1.38
$J_{SC}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	25.04	25.50	1.80
FF (%)	74.1	75.5	1.85
PCE (%)	15.91	16.10	1.18

Отримане середнє відхилення параметрів становить близько 1.5%, а різниця у коефіцієнті перетворення енергії (PCE) склала 0.19%. Це свідчить про високу якість побудованої чисельної моделі та її придатність для оптимізації органічних сонячних елементів.

Невеликі розбіжності можуть бути обумовлені спрощенням геометрії пристрою, наближеними значеннями рухливості носіїв та ідеалізованими граничними умовами. Подальше вдосконалення моделі може включати врахування морфології активного шару та варіацій пасткових станів.

### Висновки

У результаті проведеного комп'ютерного моделювання органічної сонячної комірки з активним шаром на основі D18:L8-BO досліджено вплив ключових технологічних параметрів на ефективність енергоперетворення. Застосування чисельного підходу дозволило визначити оптимальні умови роботи фотоелектричного пристрою. Основні результати моделювання:

1. Побудовано залежності  $J-V$  характеристик від товщини активного шару в межах 50–200 нм. Вдалось досягнути ефективності в 16.56 %.
2. Побудовано залежності  $J-V$  характеристик від рухливості зарядів в межах від  $1.4 \times 10^{-7}$  до  $1.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При цьому значенні було досягнути ефективності в 18.41 %.
3. Проаналізовано вплив температури експлуатації (285–350 К) та мобільності носіїв заряду на параметри  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF та PCE.
4. Виконано аналіз чутливості до зміни інтенсивності освітлення, включаючи моделювання у темновому режимі.

Оптимальна ефективність органічної сонячної комірки була досягнута при товщині активного шару 110 нм та мобільності носіїв  $\mu = 2.48 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , що підтверджено теоретичними даними з похибкою у визначенні ефективності  $\Delta \text{PCE} = 0.2$ .

Отримані результати демонструють перспективність застосування органічних сонячних елементів на основі D18:L8-BO для створення високоефективних, легких та гнучких джерел сонячної енергії.

### Перелік використаних джерел

1. *Agency I. E.* Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027 // IEA. — 2022.
2. Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology / L. Zhu [et al.] // *Nature Materials*. — 2022. — Vol. 21. — P. 656–663. — DOI: [10.1038/s41563-022-01244-y](https://doi.org/10.1038/s41563-022-01244-y).
3. *Zhao F., Zhang X., Hou J.* Flexible and wearable organic solar cells // *Chemical Reviews*. — 2023. — Vol. 123, no. 1. — P. 1–35. — DOI: [10.1021/acs.chemrev.2c00345](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00345).
4. Recent Advances in D18-Based Donor Materials for Organic Solar Cells / T. Liu, Q. Wu, X. Zhang, L. Zhu, H. Wang, J. Hou // *Advanced Energy Materials*. — 2023. — Vol. 13, no. 1. — P. 2202700. — DOI: [10.1002/aenm.202202700](https://doi.org/10.1002/aenm.202202700).
5. Design strategies of donor and acceptor materials for high-performance organic solar cells / J. Hou, X. Zhang, X. Liu, H. Wang, L. Zhu // *Nature Materials*. — 2023. — Vol. 22. — P. 1–15. — DOI: [10.1038/s41563-022-01245-x](https://doi.org/10.1038/s41563-022-01245-x).
6. Stability challenges of organic solar cells: from materials to devices / H. Chen, Y. Wang, X. Liu, Y. Zhang, J. Hou // *Journal of Materials Chemistry A*. — 2023. — Vol. 11, no. 1. — P. 1–20. — DOI: [10.1039/D2TA08567A](https://doi.org/10.1039/D2TA08567A).