

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
Центр заочної та дистанційної форм навчання

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**Вплив фізичних характеристик на структурні властивості тонких плівок  
PbSe**

Студент гр. ЕПз-41к

К.В. Вербило

Науковий керівник,  
к.ф.-м.н., ст. викладач

М.М. Іващенко

Нормоконтроль,  
к.т.н., доцент

О.Д. Динник

Конотоп 2019

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження дипломної роботи є вплив фізико-технологічних режимів отримання конденсатів на структуру сонячних перетворювачів на основі плівок селеніду свинцю.

Мета роботи полягає у аналізі фотоелектричного перетворювача CdTe/PbSe як високоефективного конвертера енергії сонячного випромінювання та аналізу можливості його приладового використання.

При виконанні роботи використовувались сучасні літературні джерела з даної тематики.

У першому розділі був проведений літературний аналіз сучасних джерел, за яким був обраний подальший напрям дослідження з даного питання.

У другому розділі був описаний гетероперехід на основі халькогенідів телуриду кадмію та селеніду свинцю, його електрофізичні характеристики та проведено числове моделювання його основних експлуатаційних характеристик, таких як напруга холостого ходу, струм короткого замикання, фактор заповнення та коефіцієнт корисної дії.

За результатами проведеної роботи зроблені відповідні висновки.

Робота викладена на 27 сторінках, у тому числі включає 7 рисунків, 6 таблиць та список цитованої літератури із 17 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ГЕТЕРОПЕРЕХІД, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ, ТЕЛУРИД КАДМІЮ, СЕЛЕНІД СВИНЦЮ.

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	5
1.1 Сучасний стан ринку фотоперетворювачів.....	5
1.2 Сонячні перетворювачі на основі гетеропереходу типу PbSe/CdTe.....	10
1.3 Моделювання характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів.....	13
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ PbSe/CdTe...	16
2.1 Вибір вхідних параметрів для моделювання.....	16
2.2 Вплив товщини поглинаючого шару CdTe на електричні характеристики фотоперетворювача.....	17
2.3 Вплив товщини віконного шару PbSe на електрофізичні властивості сонячного елемента.....	20
2.4 Вплив експлуатаційної температури на електричні характеристики плівкової системи.....	22
ВИСНОВКИ.....	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	26

## ВСТУП

Зростання енергоспоживання є однією з найбільш суттєвих та нагальних особливостей сучасного людства. До недавнього часу розвиток енергетики не зустрічав суттєвих складностей, так як збільшення виробництва енергії в основному відбувалося за рахунок збільшення видобутку корисних копалин (нафта, природний газ, кам'яне вугілля тощо), які є достатньо зручними у використанні. На теперішній час більше 75 % енергії виробляється за рахунок спалювання органічного та мінерального палива. Однак, енергетика вже на даному етапі стикнулася з проблемою виснаження власної сировинної бази. Однією з причин даного явища є обмеженість енергетичних ресурсів. Крім того, нафта, газ та вугілля є також цінною сировиною для хімічної промисловості, яка інтенсивно розвивається. Атомна енергетика також останнім часом стикнулася зі значними труднощами, пов'язаними в першу чергу з необхідністю значного збільшення витрат на забезпечення безпеки роботи ядерних об'єктів.

Виходячи з вищенаведених фактів, є природнім зростання зацікавленості до поновлювальних джерел енергії, найбільш перспективним напрямком з яких і геліоенергетика.

Підвищений інтерес до фотоелектричного перетворення сонячної енергії в електричну зумовлений реальною можливістю створення стабільних у експлуатації, дешевих та високоефективних сонячних елементів (СЕ), що й зумовило мету даного дослідження, яка полягає у аналізі гетеропереходу CdTe/PbSe в якості базового матеріалу для нових високоефективних фотоперетворювачів..

# РОЗДІЛ 1

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

### 1.1. Сучасний стан ринку фотоперетворювачів

Гетеропереходом називають контакт двох напівпровідників, які розрізняються структурними та електрофізичними параметрами: кристалічною структурою, шириною ЗЗ, величиною електронної спорідненості, діелектричними сталими, ефективною масою тощо [1]. Внаслідок цього їх експериментальне дослідження та теоретичний опис набагато складніші ніж у випадку *p-n*-переходів [2]. Як правило, більшість вивчених у наш час гетеросистем мають монокристалічну структуру та складаються з масивного монокристалу та епітаксимальної плівки [3].

Гетеро переходи на оснві напівпровідникових з'єднань типу А2В6 привертають особливу увагу дослідників завдяки своїм унікальним властивостям, серед яких можна перелічити наступні: прямозонність матеріалу, що дозволяє використовувати шари структур доволі малої товщини, їх хімічну стійкість до зовнішніх чинників, широкі значення (діапазон) оптичної ширини забороненої зони, тощо.

ВАХ ідеального *p-n*-переходу описується дифузійною моделлю або моделлю Андерсона [4]. Дана модель нехтує присутністю зарядів на межі розділу напівпровідників, обумовлених приповерхневими станами. У цьому випадку теорія зарядоперенесення через ГП являє собою узагальнення теорії перенесення струму через гомо перехід.

Хоча модель Андерсона звичайно використовується для побудови енергетичних діаграм анізотипних ГП, залежність струму від напруги та температури реальних структур ця модель описує погано. Крім того, експериментальні значення струму через двошарову структуру виявляються набагато меншими, ніж отримані з використанням типової теоретичної моделі.

Для опису механізму перенесення струму через ГП в наш час, крім моделі

Андерсона запропоновано декілька інших фізичних моделей: емісійну, рекомбінаційну, емісійно-рекомбінаційну, тунельну і тунельно-рекомбінаційну. Відповідно, всі струми, що протікають через перехід [5], поділяють на теплові і нетеплові.

Важливою особливістю дифузійної, емісійної та емісійно-рекомбінаційної моделей є те, що вони приводять до однакового виразу, що описує ВАХ ГП. Цей вираз не відрізняється від того, що описує ВАХ гомопереходів, і має вигляд [6]:

$$I = I_d - I_c = I_0 \left[ \exp\left(\pm \frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

де

$$I_0 = I_{00} \exp\left(-\frac{eU_{k0}}{AkT}\right) \quad (1.2)$$

де  $I_0$  – струм насичення ГП;

$e$  – заряд електрона;

$U$  – зовнішня напруга, прикладена до  $p$ - $n$ -переходу;

$A$  – діодний коефіцієнт (коефіцієнт ідеальності переходу);

$I_{00}$  – константа, яка не залежить від температури;

$U_{k0}$  – висота потенційного бар'єру на переході при відсутності зовнішньої напруги.

У виразі (1.1) знак плюс відповідає прямій гілці ВАХ, мінус – зворотній. Механізм струмоперенесення визначає величину діодного коефіцієнта та струму насичення. Сам механізм зарядоперенесення через міжфазну границю визначається присутністю приповерхневих станів, видом зонної діаграми, ступенем легування плівок та ін. [6].

Для пояснення особливостей проходження струму через деякі реальні ГП з великою концентрацією приповерхневих станів на гетеромежі була запропонована модель, яка враховує наявність на ній тонкого шару речовини зі спотвореною кристалічною решіткою та високою швидкістю рекомбінації носіїв заряду [6]. Відповідно, електрони та дірки досягають локалізованих

станів на даній межі за допомогою тунелювання з енергетичних зон матеріалів гетеропари. Фактично, в моделі, яка отримала назву тунельно-рекомбінаційної, ГП являє собою два послідовно з'єднані контакти метал – напівпровідник [6].

У цьому випадку зарядоперенесення через ГП визначається процесами, які не залежать від температури вимірювання. Відповідна ВАХ може бути записана у вигляді

$$I = I_0 [\exp(\pm \alpha U) - 1], \quad (1.3)$$

де 
$$I_0 = I_{00} \exp(\beta T). \quad (1.4)$$

де  $I_{00}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – константи, які не залежать від  $U$  та  $T$ .

ГП, утворені сполуками  $A_2B_6$ , досліджуються більше 40 років. В основному, вивчені структури, де на монокристалічну підкладку з однієї сполуки нанесена епітаксіальна плівка іншої [7]. Основні характеристики ГП, що містять у своєму складі сполуки CdS, ZnTe, PbSe наведені в табл. 1.1.

Із таблиці видно, що найбільш дослідженими є ГП «кристал-плівка», при цьому найбільш якісні епітаксіальні шари отримуються при використанні газотранспортних методів. Тільки пара ZnTe-CdSe створює перехід з межею розділу, близькою до ідеальної, в інших випадках відмінність параметрів кристалічних ґраток сполук складає декілька відсотків, і тому властивості ГП визначаються приповерхневими дислокаціями невідповідності та створеними ними зарядженими центрами.

Для з'ясування механізму проходження струму через ГП, необхідно вивчити його електричні властивості в широкому інтервалі температур, що, на даний момент, зроблено не в повній мірі. Одним з найбільш досліджених на даний час є ГП ZnTe/PbSe. Такий вибір пояснюється досить добрими люмінесцентними властивостями обох матеріалів та можливістю отримання на їх основі високоефективних світловипромінювальних діодів синьої та зеленої областей спектру. Ці ГП отримувалися та досліджувалися в [8-9].

Таблиця 1.1

## ГП на основі плівок А2В6 та деякі їх характеристики [10]

Гетероперехід	Невідп. ґраток, %	Метод виготовлення	Структура плівок
CdS-CdSe	4,0	нанесення CdSe на кристал CdS	полікристалічна
PbSe-CdTe	14,0	нанесення PbSe у вакуумі на кристал CdTe	полікристалічна текстурована
PbSe-Cd <sub>0,4</sub> Zn <sub>0,6</sub> Te	7,5	нанесення PbSe у вакуумі на кристал Cd <sub>0,4</sub> Zn <sub>0,6</sub> Te	полікристалічна текстурована
PbSe-CdSe	6,8	одночасне вакуумне нанесення PbSe та CdSe	плавний полікристалічний перехід
		послідовне нанесення PbSe та CdSe	плавні та різкі полікристалічні переходи
CdSe-ZnTe	6,0	послідовне нанесення ZnTe та CdSe	полікристалічна
PbSe-ZnTe	7,0	вакуумне нанесення PbSe на кристал ZnTe	полікристалічна
		вакуумна епітаксія PbSe і ZnTe	мозаїчна
ZnTe-CdSe	0,2	епітаксія з газової фази CdSe на кристал ZnTe	монокристалічна
		вакуумне нанесення CdSe на кристал ZnTe	полікристалічна

Великий інтерес як для дослідження фізичних процесів на гетеромежі, так і для подальшого практичного використання має ГП PbSe/CdTe, оскільки невідповідність ґраток сполук у даній парі хоча і складає 14,00 %, однак даний гетеро перехід має перспективи подальшого використання завдяки незначній різниці між значеннями ширини забороненої зони віконного та поглинаючого шарів. Матеріали даної гетеросистеми є широкозонними, що робить перспективним її використання в якості джерела випромінювання у видимій



області. Вивчення ВАХ ГП  $p\text{-PbSe}/n\text{-CdTe}$  свідчить про дифузійний механізм перенесення струму через структуру при малих напругах зміщення, та рекомбінаційний – при більших. При кімнатній температурі коефіцієнт ідеальності ГП дорівнює  $A = 1,68\text{-}2,04$  в області дифузії носіїв заряду та  $A = 2,73\text{-}3,41$  при їх рекомбінації [7].

У ГП  $\text{PbSe}/\text{CdTe}$  область спектральної чутливості обмежена енергіями фотонів, які є близькими до ширини забороненої зони обох шарів [5]. Підбір товщини матеріалів, що створюють ГП, дозволяє отримати спектральні характеристики фото-ЕРС з рівномірною чутливістю від 0,55 до 0,75 мкВ при кімнатній температурі [5]. При зниженні температури до 77 К форма кривої фотовідгуку змінюється. Фоточутливість зменшується в довгохвильовій області та збільшується при енергіях фотонів, що збуджують електронно-діркові пари в області енергій, близькій до ширини  $3\text{З PbSe}$ . Даний ефект пояснюється тим, що при кімнатній температурі товщина шару об'ємного заряду є приблизно однаковою за всією товщиною  $p\text{-}n\text{-}$ переходу. При зменшенні температури від кімнатної до температури рідкого азоту концентрація дірок в телуриді цинку зменшується більше ніж на 4 порядки, в той час як в селеніді кадмію, – тільки в 10 разів. В результаті цього при даній температурі відбувається перерозподіл об'ємного заряду та більш ефективно розділення електронно-діркових пар в телуриді цинку.

ВАХ ГП  $\text{PbSe}/\text{CdTe}$  можуть бути описані наступним виразом:

$$I = I_s \exp\left[\frac{e(V - IR_s)}{\eta kT}\right] - I_f \quad (1.5)$$

де  $I_s$  - темновий струм насичення;  
 $I_f$  – фотострум;  
 $R_s$  – послідовний опір переходу.

На відміну від гомопереходів на експериментальних кривих від ГП [11], не спостерігається паралельного зміщення світлового зворотнього струму в

порівнянні з темновим, прямі гілки темної та світлової ВАХ перетинаються. Ці особливості пов'язані з фотопровідністю CdTe. Крім того, швидке зростання прямого струму при освітленні зумовлене фотоінжекцією електронів в PbSe. Якщо в темряві, внаслідок різниці бар'єрів для дірок та електронів, струм є в основному дірковим, то при освітленні з'являється і електронна складова [12].

При кімнатній температурі на ГП PbSe/CdTe ЕРС холостого ходу при сонячному освітленні складає 0,8 В. При опроміненні неодимовим лазером з малою інтенсивністю пучка значення  $V_{xx}$  та його залежність від рівня збудження не відрізняються від аналогічних залежностей, отриманих при звичайному освітленні [12].

## **1.2. Сонячні перетворювачі на основі гетеропереходу типу PbSe/CdTe**

Фотоперетворювачі на основі ГП CdTe/PbSe являють собою типові ГП на основі широкозонних матеріалів. Їх електрофізичні характеристики суттєво залежать від наступних параметрів: середніх розмір кристалітів у шарах, середнє значення областей когерентного розсіювання та рівня мікродеформацій у плівках, значення оптичної ширини забороненої зони, які, у свою чергу, залежать від значень коефіцієнтів пропускання, відбивання, поглинання, екстинкції, заломлення. Отже, структурні та оптичні характеристики суттєво впливають на електрофізичні характеристики гетеро переходу.

На рисунку 1.1 приведені залежності оптичного пропускання плівок селеніду цинку від довжини хвилі.

Як видно з рисунку, в залежності від такого параметру нанесення, як температура конденсації (підкладки) плівки, коефіцієнт пропускання суттєво змінюється в межах від 40 % до 80 %. Такий ефект можна пояснити зміною механізму росту у плівках при зміні температури підкладки, що супроводжується змінює орієнтації кристалітів у них.

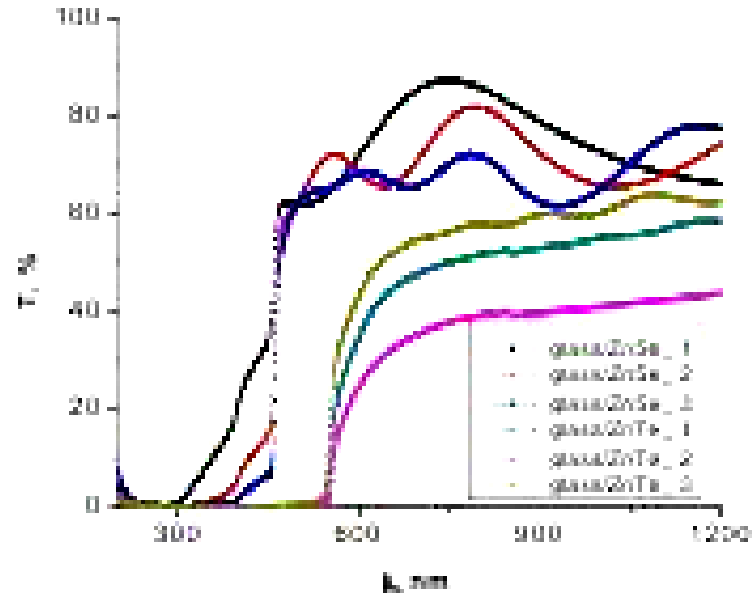


Рис. 1.1. – Значення коефіцієнту пропускання від довжини хвилі плівок селеніду цинку [13].

На рис. 1.2 приведений графік визначення оптичної ширини забороненої зони плівок селеніду цинку.

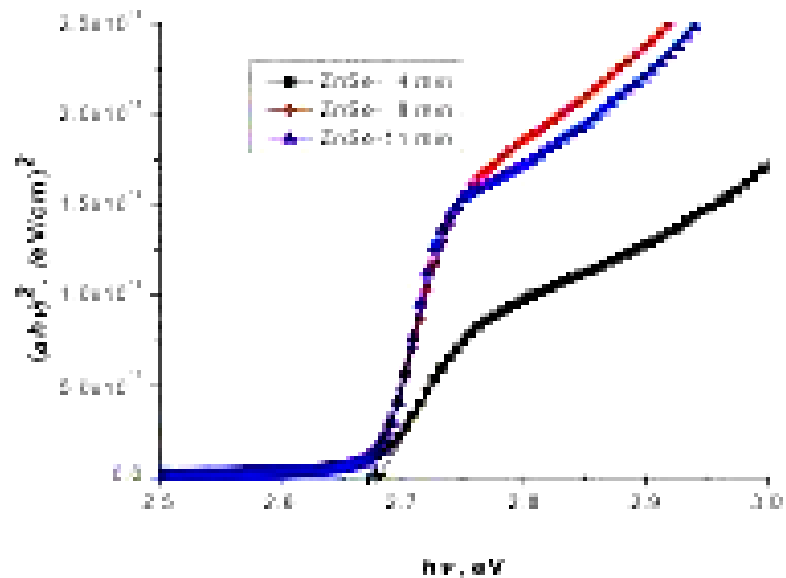


Рис. 1.2. – Визначення оптичної ширини забороненої зони плівок селеніду цинку [13]

Як видно з рисунку, значення оптичної ширини забороненої зони плівок селеніду цинку можна визначити шляхом екстраполяції лінійної ділянки кривої на вісь енергій фотона (так званий Тауківський графік). Відповідно, в залежності від температури підкладки, при її підвищенні значення ширини забороненої зони дещо підвищуються від 2,64 до 2,8 еВ. Даний ефект пояснюється зміною стехіометрії плівок селеніду цинку при підвищенні температури конденсації [14].

На рис. 1.3 приведені вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетеро переходу PbSe/CdTe.

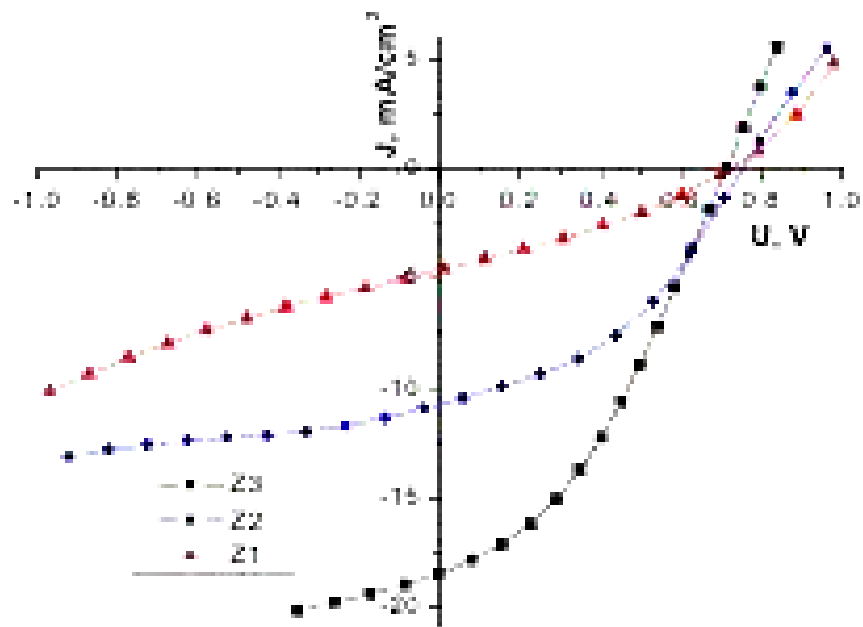


Рис. 3.3. – ВАХ гетеропереходу PbSe/CdTe [13]

Виходячи з рисунку, можна прийти до висновку, що фактичне значення коефіцієнту корисної дії може досягати 10 %, що в порівнянні з фотоперетворювачами на основі кремнію, суттєво перевищує стандартні показники.

### 1.3. Моделювання характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів

Комп'ютерне моделювання основних фізичних процесів, які відбуваються в тонкоплівкових СЕ, привертає особливу увагу дослідників ще з початку 80-х років ХХ століття. Для моделювання роботи фотоперетворювачів, розрахунку їх оптичних та електрофізичних характеристик використовується достатньо велика кількість експериментальних моделей. Однак, інтерпретація отриманих при їх використанні результатів дуже часто є досить важкою. Тривимірне числове моделювання в наш час широко використовується також для попереднього проектування СЕ та їх тестування.

Ідеальний програмний пакет, призначений для моделювання роботи тонкоплівкових СЕ, повинен відповідати наступним критеріям:

- мати можливість моделювання процесів у багатошарових структур;
- можливість моделювання процесів у СЕ з шарами, ширина ЗЗ яких є більшою 3 еВ;
- врахувати рекомбінацію генерованих носіїв заряду на глибоких рівнях в об'ємі матеріалу та на поверхні;
- можливість розділення енергетичних зон на складові частини;
- можливість моделювання основних електричних характеристик СЕ як функції від часу;
- мати велику швидкість моделювання фізичних процесів та легкість в користуванні.

Мінімальна кількість шарів СЕ, з якими спроможний працювати прийнятний для використання пакет моделювання, повинна складати не менше 6; повинна бути передбачена можливість моделювання не лише темнових і світлових ВАХ, а і інших залежностей, наприклад, квантового виходу, частотно-ємнісних залежностей тощо [15].

Порівняльні характеристики деяких основних програмних пакетів, які використовуються для моделювання фізичних процесів у СЕ на основі ГП, наведені в табл. 1.2.

Основний інструмент, яким користувач оперує у відмічених програмних продуктах, є так звана «активна» панель, в якій дослідник встановлює початкові (стартові) параметри для моделювання: робочу температуру, діапазон напруги, частоту, тип випромінювання тощо. Далі, після введення стартових параметрів, ще одним необхідним інструментів для

Таблиця 1.2

**Порівняльні характеристики програм для моделювання фізичних процесів у СЕ [16]**

	AMPS	SCAPS	ASA	PC1D
Макс. кільк. шарів	30	7	необмежена	5
Побудова зонних діаграм	Враховується модель Андерсона			
Розділення енергетичних зон	ні	ні	так	ні
Глибокі стани в ЗЗ	50	3	4	без заряду
Глибокі поверхневі стани	ні	так	ні	ні
Багатопрофільне моделювання	ні	так	так	короткочасно
Числове наближення	враховується			
Швидкість	мала	висока	дуже висока	дуже висока
Інтерактивність	задовільна	добра	відсутня	добра

моделювання, є «активний перелік розрахункових залежностей», який дозволяє отримувати ВАХ, частотно-ємнісні характеристики, залежності «квантовий вихід – довжина хвилі (енергія фотона)» та ін.

Кожен з програмних пакетів, наведених у таблиці 1.2 має як свої переваги так і недоліки, однак одним з найбільш привабливих з них є програмний пакет SCAPS. Його особливістю є те, що основні параметри симуляції

(моделювання) можуть бути скриптовані користувачем власноручно, що дозволяє оптимізувати пакет програм під певні, більш вузьконаправлені задачі, які в результаті будуть розв'язуватися більш ефективно.

Однією з особливостей програмного пакету SCAPS також є можливість збереження результатів моделювання в форматі ASCII, що дає змогу їх подальшої обробки в інших програмних пакетах без використання зовнішніх інтерпретаторів [16]. Цей програмний продукт має ще ряд переваг перед іншими, що обумовило його широке використання. Деякі основні конструктивні особливості програмного пакету SCAPS-1D наведені нижче:

1. Можливість розділення рівнів Фермі – необхідні показники для визначення електростатичного потенціалу та положення рівнів Фермі можуть бути відредаговані користувачем;
2. При наявності значних відхилень в розрахунках дані виводяться на екран у вигляді, який дозволяє спостерігати всі розраховані точки;
3. Можливість освітлення ГП як з фронтальної, так і з тильної сторони;
4. Основні параметри SE визначаються методом інтерполяції з розрахованих раніше ВАХ;
5. Можливість виведення результатів як в лінійному, так і в логарифмічному масштабах;
6. Можливість збереження числових даних моделювання та подальшої їх обробки в інших утилітах, наприклад Microsoft Excel.

Програмний пакет SCAPS у наш час широко використовується, перш за все, для моделювання основних характеристик SE на основі ГП CdS/CdTe [17].

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ PbSe/CdTe

#### 2.1 Вибір вхідних параметрів для моделювання

За останні два десятиліття моделювання основних характеристик тонкоплівкових СЕ стало визнаним методом оптимізації їх конструкції з метою створення реальних високоефективних приладів. Нами для розрахунку темнових та світлових ВАХ та квантової ефективності СЕ на основі ГП PbSe/CdTe був вибраний програмний пакет SCAPS-3201. Даний програмний пакет дозволяє розв'язувати основні рівняння, що описують генерацію та перенесення носіїв у тонкоплівкових СЕ (рівняння Пуассона та рівняння неперервності для електронів та дірок).

Перед тим, як розпочати процедуру моделювання, необхідно, перш за все, задати вхідні параметри матеріалів, що входять до складу фотоперетворювача, такі як, наприклад, товщина віконного та поглинаючого шару ( $d$ ), ширина ЗЗ матеріалів ( $E_g$ ), їх електронна спорідненість ( $\chi$ ), діелектричні сталі напівпровідників ( $\epsilon/\epsilon_0$ ), рухливості електронів та дірок ( $\mu$ ), тощо.

Зі світлових ВАХ СЕ в подальшому визначалися такі важливі параметри фотоелектричних приладів як:

- напруга холостого ходу  $U_{OC}$ ;
- струм короткого замикання  $J_{SC}$ ;
- фактор заповнення  $FF$ ;
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .

Базові вхідні параметри шарів, що використовувалися для моделювання фізичних процесів у СЕ, наведені в табл. 2.1.



**Вхідні параметри моделювання процесів у СЕ PbSe/CdTe [18]**

Шар	<i>n</i> -PbSe	<i>n</i> -CdTe
Товщина <i>l</i> , мкм	0,10-0,50	3,00
Ширина ЗЗ $E_g$ , еВ	2,70	1,50
Спорідненість електронів $\chi$ , еВ	4,09	4,50
Діелектрична стала $\varepsilon/\varepsilon_0$	5,70	9,10
Густина станів в зоні провідності $N_C$ , см <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^{18}$	$1,80 \cdot 10^{18}$
Густина станів в валентній зоні $N_V$ , см <sup>-3</sup>	$1,80 \cdot 10^{19}$	$2,10 \cdot 10^{19}$
Рухливість електронів $\mu_e$ , см <sup>2</sup> /с	500	650
Рухливість дірок $\mu_h$ , см <sup>2</sup> /с	30	-
Ефективна маса електронів $m_e$	0,21	0,13
Ефективна маса дірок $m_h$	0,60	0,45

**2.2 Вплив товщини поглинаючого шару CdTe на електричні характеристики фотоперетворювача**

Товщина поглинаючого шару є важливою характеристикою СЕ, що впливає на кількість поглинутого приладом випромінювання, тому дослідження її впливу на основні електрофізичні характеристики фотоперетворювача є необхідним.

При моделюванні були взяті наступні вхідні параметри: температура навколишнього середовища становила 300 К, товщина віконного шару PbSe приймалася сталою та складала  $d = 0,30$  мкм. Товщина поглинаючого шару CdTe змінювалась в межах  $d = (1,0 - 4,0)$  мкм.

На рис. 2.1 наведені результати числового моделювання темнових ВАХ ГП PbSe/CdTe в залежності від товщини поглинаючого шару CdTe.

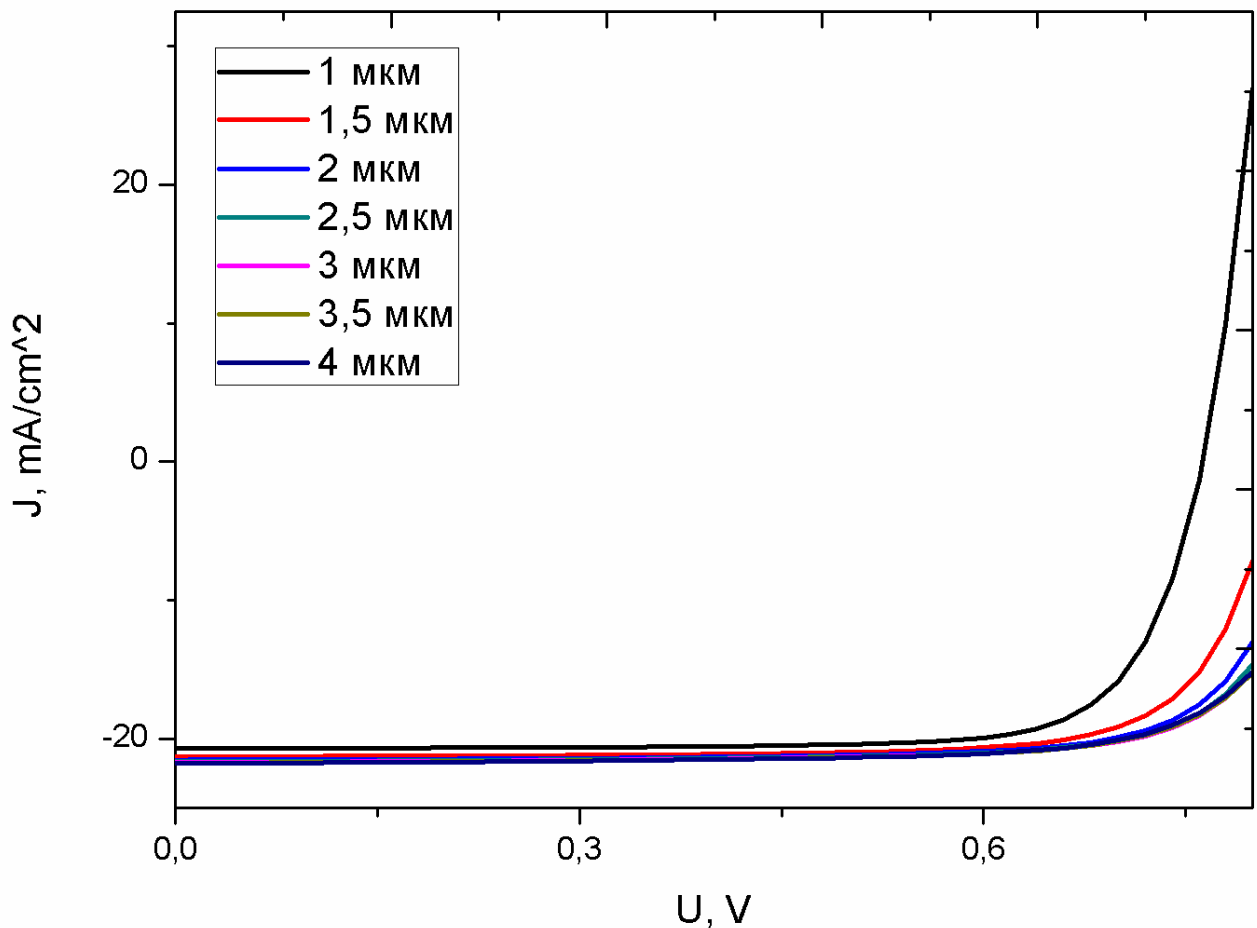


Рис. 2.1. Темнові ВАХ ГП PbSe/CdTe

Результати моделювання основних характеристик СЕ на основі ГП PbSe/CdTe при освітленні в умовах АМ-1,5, наведені в табл. 2.2.

З аналізу результатів моделювання видно, що при підвищенні товщини поглинального шару спочатку спостерігається деяке підвищення ККД СЕ до рівня 14,217 %. При цьому спостерігається відповідне збільшення значень  $U_{oc}$  від 0,763 В до 0,971 В, та  $J_{sc}$  від 20,691 до 21,750 mA/cm<sup>2</sup>. Однак, при досягненні товщини шару CdTe 3.5 мкм, величина  $\eta$  стає сталою, а при подальшому її підвищенні - знижується до 14,151 %. Даний ефект можна пояснити тим, що при товщині абсорбуючого шару 4,0 мкм відбувається насичення поглинальної здатності СЕ і, відповідно, кількості генерованих електронно-діркових пар, в той же час подальше збільшення  $d$  веде до збільшення послідовного опору приладу та віддалення області генерації носіїв від ГП. В результаті відбувається загальне зниження ККД приладу.

На зниження ККД СЕ при малій товщині поглинаючого шару впливає підвищена рекомбінація генерованих носіїв на глибоких центрах, розташованих на границі розділу поглинаючого шару і струмознімального контакту.

Таблиця 2.2

**Вплив товщини поглинаючого шару CdSe на електричні властивості ГП ZnTe/CdSe та PbSe/CdSe**

Товщина шару CdTe $d$ , мкм	$U_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , мА/см <sup>2</sup>	$FF$ , %	$\eta$ , %
1,0	0,763	20,697	78,168	12,340
1,5	0,829	21,280	76,044	13,416
2,0	0,894	21,593	72,619	13,978
2,5	0,937	21,656	69,920	14,192
3,0	0,961	21,722	68,233	14,243
3,5	0,971	21,751	67,262	14,217
4,0	0,974	21,778	66,711	14,151

Як видно з рисунку 2.1, досліджені СЕ проявляють високу фотоактивність в області довжин хвилі  $\lambda = 530 - 800$  нм. Верхня межа fotocутливості відповідає поглинанню в шарі CdTe, квантовий вихід при довжині хвилі меншій 530 нм обумовлений поглинанням випромінювання в віконному шарі PbSe.

Розрахунки свідчать, що фотоактивність у цій області збільшується зі збільшенням товщини шару CdTe.

В результаті проведених розрахунків встановлено, що найбільш оптимальною товщиною поглинального шару для СЕ на основі ГП PbSe/CdTe є значення  $d = 3,5$  мкм. Саме це значення і було використане нами при подальших розрахунках.

### 2.3 Вплив товщини віконного шару PbSe на електрофізичні властивості сонячного елемента

Товщина віконного шару в ГП є важливою характеристикою, оскільки визначає кількість випромінювання, що надходить до абсорбуючого шару фотоперетворювача, тому дослідження характеру її впливу на електричні властивості СЕ теж є актуальним.

Виходячи з попередніх розрахунків, були встановлені оптимальні початкові умови для моделювання основних характеристик СЕ. Товщина поглинального шару у випадках віконного шару PbSe була сталою і складала  $d_{CdSe} = 3,5$  мкм. Товщина віконного шару змінювалась в інтервалі:  $d = (0,025 - 0,3)$  мкм. Моделювання проводилося при  $T = 300$  К. Результати моделювання наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

#### Вплив товщини віконних шарів на електричні властивості СЕ на основі ГП ZnTe/CdSe та PbSe/CdSe

Товщина віконного шару $d$ , мкм	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , мА/см <sup>2</sup>	$FF$ , %	$\eta$ , %
0,025	0,978	24,049	67,590	15,897
0,050	0,971	23,090	67,821	15,207
0,100	0,961	21,722	68,233	14,248
0,150	0,954	20,823	68,490	13,618
0,200	0,951	20,238	68,699	13,200
0,250	0,947	19,827	68,703	12,912
0,300	0,944	19,535	68,881	12,708

В результаті проведених розрахунків було встановлено, що у випадку використання ГП ZnTe/CdSe при підвищенні товщини віконного шару від 0,025 до 0,300 мкм спостерігається збільшення ККД СЕ майже на 1 %.

При збільшенні товщини віконного шару ZnSe в ньому починає поглинатися більша кількість фотонів з енергією  $h\nu > E_g$  матеріалу. Це призводить до зменшення значення квантового виходу СЕ в області довжин хвиль випромінювання  $\lambda < 530$  нм.

Внаслідок більшої ширини ЗЗ матеріалу віконного шару розширюється область fotocутливості СЕ в ультрафіолетовій частині спектру. Зміна товщини PbSe приводить до незначної зміни квантового виходу фотоперетворювачів при енергіях, більших  $E_g$  селеніду цинку.

Моделювання процесів, що відбуваються у СЕ на основі ГП, дозволило визначити оптимальні конструкційні характеристики реальних фотоперетворювачів: для ГП PbSe/CdTe  $d_{PbSe}$  повинна складати 0,025 мкм;  $d_{CdTe} = 3,5$  мкм.

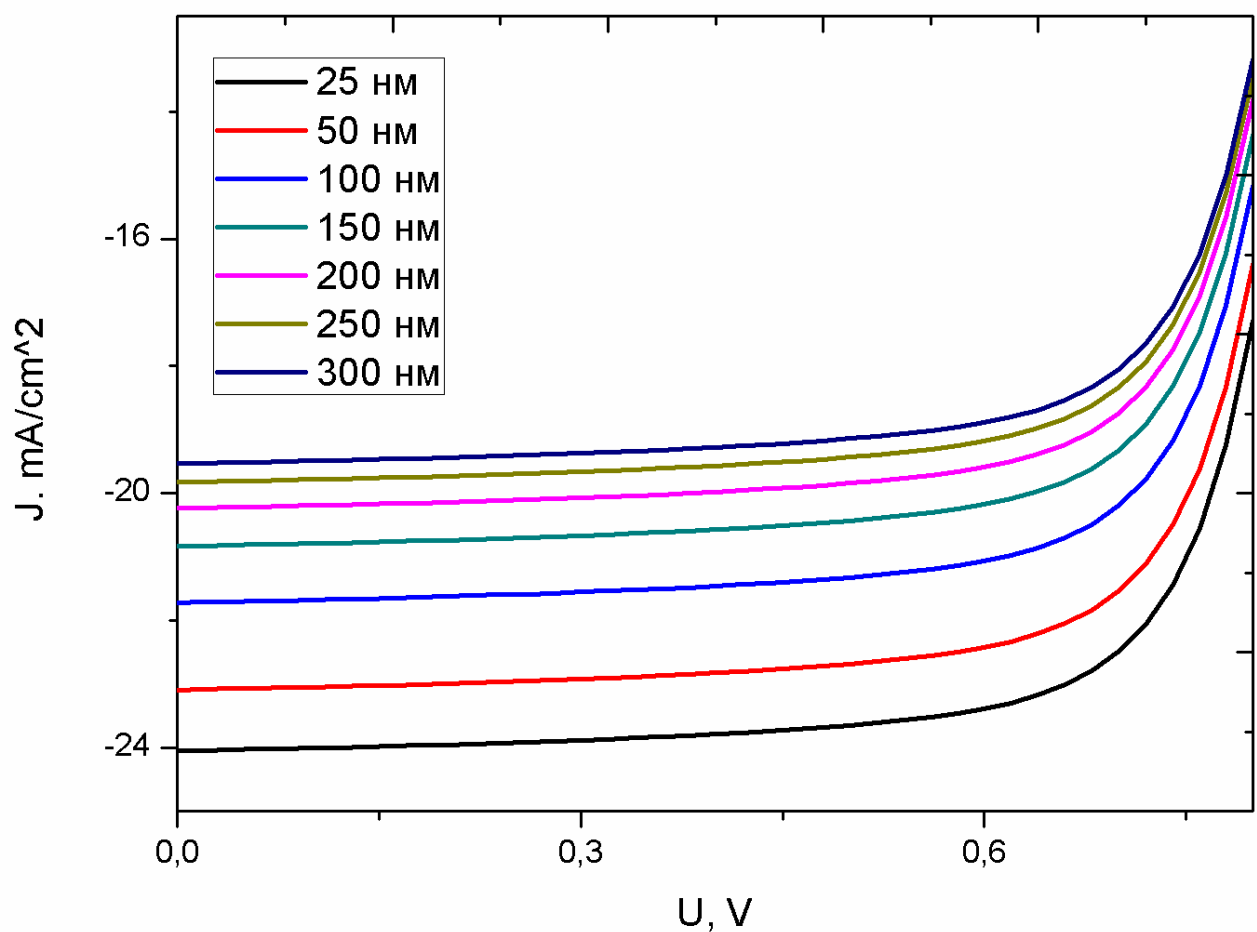


Рис. 2.3. Світлові ВАХ СЕ на основі ГП PbSe/CdTe

## 2.4 Вплив експлуатаційної температури на електричні характеристики плівкової системи

В процесі експлуатації під дією сонячного випромінювання СЕ можуть розігріватися, що може суттєво вплинути на їх робочі характеристики. В зв'язку з цим, нами проводились дослідження впливу робочої температури на вигляд ВАХ фотоперетворювачів на основі ГП PbSe/CdTe. Моделювання проводилося в інтервалі температур  $T = 280-340$  К.

Результати розрахунків основних характеристик фотоперетворювачів наведені на рис. 5.10-5.11 та в таблиці 2.4.

Встановлено, що при збільшенні температури експлуатації ККД СЕ на основі ГП PbSe/CdTe незначно зменшувалося від 16,173% (280 К) до 14,261 % (340 К).

*Таблиця 2.4*

### Вплив експлуатаційної температури на електричні характеристики СЕ на основі ГП PbSe/CdTe

Робоча температура $T$ , К	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , мА/см <sup>2</sup>	$FF$ , %	$\eta$ , %
340	0,771	24,699	74,894	14,261
330	0,795	24,699	75,468	14,820
320	0,831	24,701	74,823	15,361
310	0,892	24,702	72,059	15,876
300	0,983	24,703	67,394	16,357
290	1,108	24,705	61,533	16,791
280	1,524	24,706	55,423	17,173

Узагальнена залежність квантового виходу ГП приведена на рисунку 2.5.

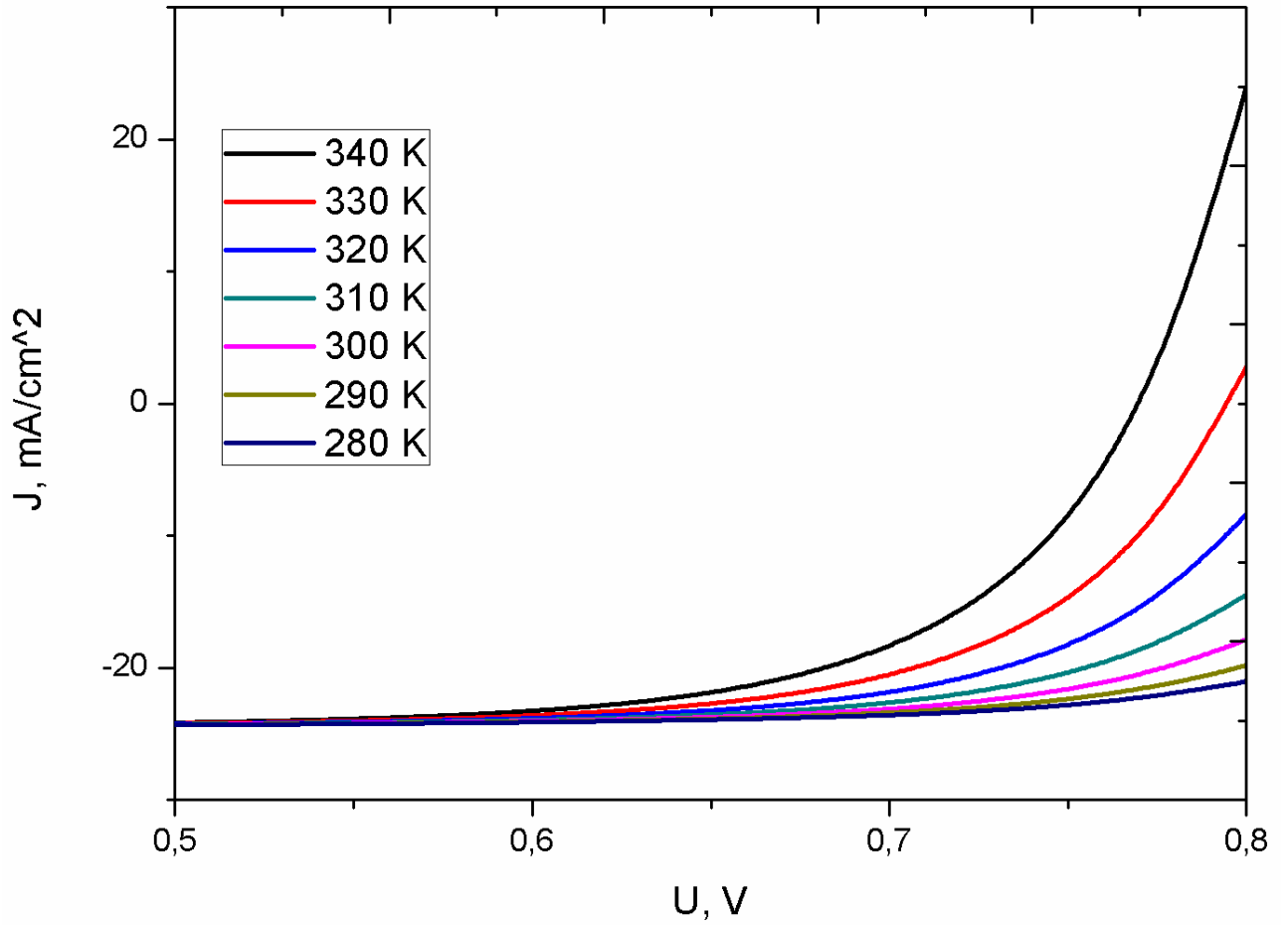


Рис. 5.11. Світлові ВАХ СЕ на основі ГП PbSe/CdSe (а) та їх спектральні залежності квантового виходу (б). Експлуатаційна температура  $T$ , К: 290 (а); 300 (б); 310 (в); 320 (г); 330 (д).

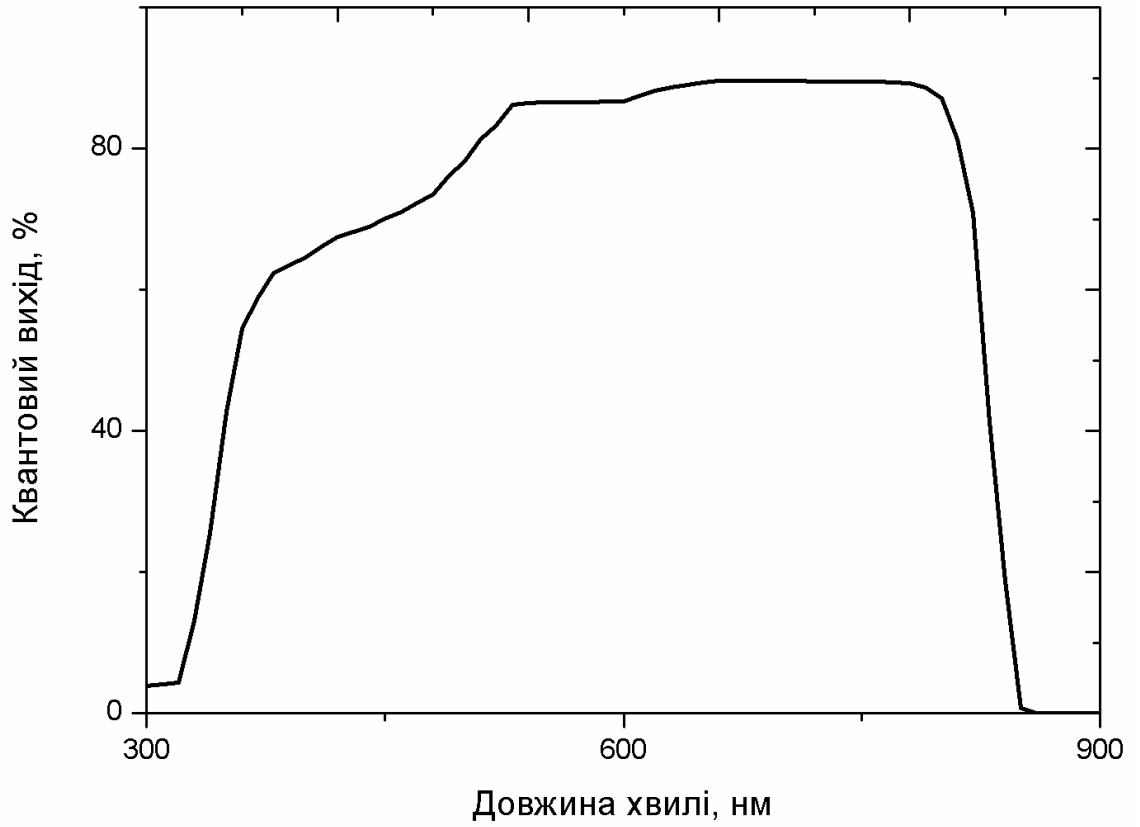


Рисунок 2.5 – Залежність квантового виходу гетеро переходу від довжини хвилі



## ВИСНОВКИ

У результаті огляду літературних джерел, було встановлено що дана тема є актуальною, але напрацювання в дослідженні електрофізичних властивостей гетеро переходів на основі напівпровідникових плівок з'єднань типу А2В6 є мало дослідженими.

В результаті моделювання фізичних процесів, які відбуваються при освітленні СЕ встановлено, що максимальна ефективність фотоперетворювачів на основі ГП  $p\text{-PbSe}/n\text{-CdTe}$  з оптимальною конструкцією (товщина поглинаючого шару  $d_{\text{CdTe}} = 3,5$  мкм, товщина віконного шару  $d_{\text{PbSe}} = 0,025$  мкм,  $T = 280$  К) може сягати значень  $\eta = 17,17$  % ( $U_{oc}=1,524$  В,  $J_{sc}=24,699$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF=74,894$  %). Відповідні прилади мають широку область фоточутливості, яка лежить в інтервалі  $\lambda = (516 - 790)$  нм. Дані, отримані в результаті числового моделюванні, обумовлені великою кількістю поверхневих станів на гетеромежі, внаслідок невідповідності періодів ґраток контактуючих матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Buch F. Photovoltaic properties of five II-VI semiconductors / F. Buch, A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube // Journal of Applied Physics. – 1977. – V. 48. – P. 1596 – 1602.
2. Bube R.H. Photovoltaic energy conversion with n-CdS –p-CdTe heterojunctions and other II-VI junctions / R.H. Bube, F. Buch, A.L. Fahrenbruch [et al.] // IEEE Transactions in Electronic Devices. – 1977. – V. 24(4). – P. 487 - 492.
3. Георгобиани А.Н. Широкозонные полупроводники  $A_2B_6$  и перспективы их применения / А.Н. Георгобиани // УФН.–1974.–Т. 113, №1.– С.129-155.
4. Морозова Н.К. Селенид цинка. Получение и оптические свойства / Н.К. Морозова, В.А. Кузнецов, В.Д. Рыжиков [и др.]. – М.: Наука, 1992. – 96 с.
5. Kandiarov B. Photovoltaic effect in CdS-CdSe heterojunctions / B. Kandiarov, R. Andreitchin // Phys. Stat. Sol. – 1965. – V. 8, № 3. – P. 897 – 901.
6. Колесник М.М. Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок ZnTe та гетеропереходів ZnTe/CdTe: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Колесник Максим Миколайович. – Суми, 2010. – 168 с.
7. Kasap S. The Springer handbook of electronic and photonic materials / S. Kasap, P. Capper. – Berlin: Springer, 2007. – 1406 p.
8. Fujinaka M. II-VI-heterojunctions / M. Fujinaka // Trans. Instr. Electron. Comm. Eng. Japan. – 1971. – V. 54, № 1. – P. 26 – 35.
9. Кот М.В. Исследование механизма токопрохождения в гетеропереходах ZnTe-CdSe и ZnTe-PbSe / М.В. Кот, Л.М. Панасюк, А.В. Симашкевич [и др.] // ФТП. – 1965. – Т. 7, № 4. – С. 1244 – 1245.
10. Іващенко М.М. Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CdSe та PbSe і гетеропереходів на їх основі: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.01 / Іващенко Максим Миколайович. – Суми, 2014. – 163 с.

11. Кот М.В. Полупроводниковые соединения и их твердые растворы / М.В. Кот, А.В. Симашкевич, П.А. Гашин [и др.]. – Кишинев: РИО АН МССР, 1970. – 89 с.
12. Калинин И.П. Эпитаксиальные пленки соединений  $A_2B_6$  / И.П. Калинин, В.Б. Алесковский. – Л: Изд-во ЛГУ, 1978. – 311 с.
13. Potlog T. The performance of thin film solar cells employing photovoltaic PbSe/CdTe, CdS/CdTe and ZnTe/CdTe heterojunctions / T. Potlog, N. Spalatu, V. Fedorov [et al.] // IEEE transactions in Electronic Devices. – 2011. – V. 218. – P. 48 – 64.
14. Опанасюк А.С. Моделивання робочих характеристик сонячного елемента зі структурою p-CuO/p-ZnTe/n-CdSe/n-MoSe<sub>2</sub>/Mo / А.С. Опанасюк, М.М. Іващенко, І.П. Бурик [та ін.] / ЖНЕФ. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 02037(5).
15. Ali L.S. Computer simulation of the effect of band gap grading of the CIGS absorber layer on the performance of CdTe/CIGS thin film solar cell / L.S. Ali, A.K. Abdullah // Al-Rafidain Engineering. – 2012. – V. 20, № 3. – P. 44 – 55.
16. Burgelman M. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells / M. Burgelman, P. Nollet, S. Degraeve // Thin Solid Films. – 2000. – V. 361 – 362. – P. 527 – 532.
17. Olopade M.A. Investigation of some materials as buffer layer in copper zinc tin sulphide ( $Cu_2ZnSnS_4$ ) solar cells by SCAPS-1D / M.A. Olopade, O.O. Oyebola, B.S. Adeleke // Pelagia Research Library: Advances in Applied Science Research. – 2012. – V. 3, № 6. – P. 3396 – 3400.