

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
Факультет денної форми навчання

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Дипломна робота  
**МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВТРАТ  
ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ, ВИКОНАНИХ НА БАЗІ  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК ОКСИДУ ЦИНКУ**

Студент гр. ЕПс2-61к

О.О. Галушко

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

М. М. Іващенко

Конотоп 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження дипломної роботи є моделювання оптичних втрат сонячних перетворювачів на основі ZnO, ITO, CdS, CdTe.

Мета роботи полягає у знаходженні загального впливу оптичних втрат на ефективність фотоперетворення.

При виконанні роботи використовувався програмний пакет Microsoft Excel.

Отримані значення втрат на відбивання, пропускання та поглинання дозволили отримати процентне відношення цих втрат у коефіцієнт корисної дії модельованого сонячного елемента в залежності від його конструктивних особливостей (товщини віконного, поглинального та приконтактного шарів)

Робота викладена на 27 сторінках, у тому числі включає 9 рисунків, 1 таблицю, список цитованої літератури із 22 джерел.

**ZnO, ВАХ, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ, ВТРАТИ.**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
<b>РОЗДІЛ 1.ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА БАЗІ ОКСИДУ ЦИНКУ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Загальні відомості про напівпровідникові матеріали халькогенідної групи.....	6
1.2. Фізичні властивості плівок оксиду цинку.....	8
1.3. Механізми росту плівок оксиду цинку.....	12
<b>РОЗДІЛ 2.МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВТРАТ .....</b>	<b>14</b>
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВТРАТ .....</b>	<b>18</b>
3.1. Оптичні втрати на відбивання .....	18
3.2. Втрати на поглинання .....	21
3.3. Вплив оптичного поглинання в струмопровідних шарах перетворювачів на значення струму короткого замикання.....	22
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>24</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>25</b>

## ВСТУП

В даний час тонкоплівкові сонячні елементи (СЕ) на основі гетеропереходу (ГП) n-CdS / p-CdTe, при масовому виробництві розглядаються як альтернативні фотоперетворювачів, засновані на кремнійевих технологіях. Фактично це перша технологія яка дозволяє отримувати сонячну енергію за ціною нижній \$ 1 / Вт (\$ 0,85) [1]. За теоретичними оцінками ефективність плівкових СЕ з поглинаємим шаром CdTe становить 28-30% [2]. Реальний ККД таких фотоперетворювачів набагато нижче. Так для СЕ на основі ДП n-CdS / p-CdTe в наш час отримано ККД який становить 17,3% [3], ефективність сонячних модулів великої площі не перевищує 11,6% [3-4]. Різниця між теоретичними передбаченнями і реальними значеннями ефективності приладів пояснюється оптичними, електричними і рекомбінаційні втратами при перетворені сонячної енергії в ел-чеських. Подальше підвищення ефективності таких СЕ можливо як шляхом оптимізації їх конструкції так і поліпшення властивостей окремих шарів.

Оптимізації конструкції СЕ n-CdS / p-CdTe і зменшення втрат енергії в їх фотоактивних шарах присвячено багато робіт, проте в більшості з них розглядаються втрати пов'язані з рекомбінацією генеруються під дією світла електронно-доручених пар [5-7]. Однак останнім часом ряд авторів звернули увагу на необхідність врахування і мінімізації оптичних втрат світла в фотоперетворювачах пов'язаних з його відображенням і поглинанням в склі, віконних і допоміжних шарах. Авторами робіт [8] розглянуті втрати світла в СЕ скло / ITO (TCO) / CdS / CdTe / тильну металевий кон-такт. Прозорі провідні шари ITO ( $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{Te}_3$ ) і TCO ( $\text{SnO}_2: \text{F}$ ) є традиційним струмознімальних кон-тактом в конструкціях фотоелементів типу «superstrate» [9-13]. Разом з тим, останнім часом як фронтальні струмопровідні шари фотоперетворювачей почали використовувати плівки оксиду цинку легованого алюмінієм ( $\text{ZnO}: \text{Al}$ ) [3]. Цей матеріал є більш

дешевим ніж ІТО, ТСО і не містить рідкісних металів. Відповідні РЕ продемонстрували ККД 14% і підвищену стабільність в часі і відтворюваність характеристик.

У технології виробництва тонкопліткових СЕ надзвичайно важливу роль відіграє вибір віконного шару. В даний час в цій якості широко використовується CdS ( $E_g = 2,42$  eV). Альтернативою плівкам CdS можуть стати тонкі шари ZnS. Сульфід цинку має істотно більшу ніж сульфід кадмію ширину забороненої зони ( $E_g = 3,68$  eV), що дозволяє розширити діапазон фоточутливості відповідних РЕ і збільшити їх струми короткого замикання [12]. Він є нетоксичним завдяки відсутності в складі важких металів. Шар ZnO може грати роль антивідбивного покриття фотоперетворювача, що збільшує кількість фотонів поглинених фотоперетворювачів і відповідно його ККД [14]. Але вплив зміни матеріалу віконного і струмознімального шару на оптичні характеристики СЕ з поглинається-ним шаром CdTe на даний момент не досліджений.

Основною метою даної роботи є визначення і порівняння оптичних втрат на відбиття і поглинання в фотоперетворювачах на основі гетеропереходів n-ZnO / p-CdS і n-ІТО / p-CdS з фронтальним струмопровідним контактним шаром з ZnO.

## РОЗДІЛ 1

### ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА БАЗІ ОКСИДУ ЦИНКУ

#### 1.1 Загальні відомості про напівпровідникові матеріали халькогенідної групи

Не можна заперечувати, що напівпровідники змінили світ понад усе, що могли мати уявлявся перед ними. Ще в 1782 р. Спочатку був термін "напівпровідниковий" введений Алессандро Вольтою [1]. До 1833 р. Майкл Фарадей спостерігав за напівпровідником. Ефект від того, що стійкість сульфїду срібла зменшувалась із температурою, яка була різною ніж у металів [2]. З тих пір напівпровідникова промисловість поширилася на кожному куті в світ і розквіт у повсякденному житті людини.

Історія досліджень з піками, що виникають час від часу, задокументована окрім багатьох наукові публікації великої кількості оглядових робіт та книг. Як типова сполука II-VI напівпровідник, об'ємний кристал оксиду цинку (ZnO) був широко досліджений ще на початку 1950-х рр. Електричні та оптичні властивості ZnO були широко вивчені [3,4] як точна провідність n-типу, показуючи спектри поглинання, розпад електролюмінесценції параметри тощо. У середині 1960-х - перший період помітного зростання досліджень ZnO відбувся із серією високо цитованих теоретичних та характеристичних робіт. Laudise та ін [5] повідомили, що великі (10-20 г) макроскопічно звукові кристали ZnO, придатні для попереднього перегляду перетворювач та інші дослідження вирощували гідротермічно. Теми дослідження та почасти такі ж, як у 1970-80-ті роки, такі як зростання, допінг, лінійний та нелінійна оптика, включаючи аспекти стимульованої емісії. У 1970-х роках та характеристика більш простих

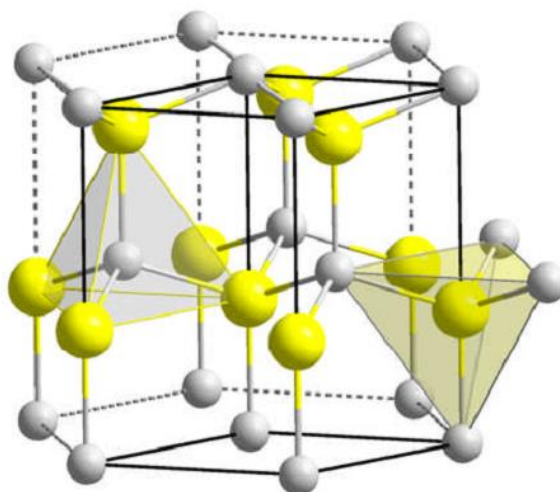
приладів ZnO були в основному сконцентровані [6,7]. У 1980-х рр багато процедур росту було досліджено в пошуках високоякісних тонких плівок ZnO [8], таких як осадження металоорганічних хімічних парів (MOCVD), розпилувальний піроліз, радіочастота (РФ), магнетронне розпилення. У 1990-х роках дослідники в основному працювали над виготовленням об'ємних пластин ZnO з високою чистотою і мали успіх у 1998 році при використанні методу парової фази.

З 2000-х років дослідники зосереджувались головним чином на механізмах та параметрах росту ZnO для подальшої програми пристроїв. Загальновідомо, що ZnO можна застосовувати в різних сферах, такі як медична та косметологічна, бетонна промисловість, виробництво гуми, кераміка та окуляри, електронні матеріали, фарби та пігменти, каталізатор тощо. Серед згаданих вище, Найбільш популярним є застосування електронних матеріалів, яке включає люмінофор [9-11], сонячний елемент [12-14], електропровідна плівка [15-18], світлодіодний дисплей (LED) [19-21] та тонкоплівкові транзистори (TFT) [22]. Крім того, ZnO є привабливим матеріалом для застосування в електроніці, фотоніка, акустика, зондування тощо. Що стосується оптичних випромінювачів, то його високе зв'язування екситону енергія (60 меВ) дає ZnO перевагу перед іншими напівпровідниками, такими як GaN, якщо відтворюється і було досягнуто надійного допінгу р-типу в ZnO, що наразі залишається головною перешкодою для реалізації біполярних пристроїв. Однак важливі значення мають епітаксійні шари та монокристали для розробки оптико-електронних, таких як випромінювачі та детектори синього та ультрафіолетового світла, п'єзоелектричні та спітронні пристрої та поєднують із GaN джерело світла. З іншого боку, ZnO має деякі потенційні переваги у прозорих тонкоплівкових транзисторах (TFT) завдяки цьому висока оптична прохідність, висока провідність і не деградація при впливі видимого світла внаслідок до широкого проміжку смуги ZnO. Інші перспективні сфери застосування для

ZnO є акустичними хвильові пристрої за рахунок великого електромеханічного зчеплення ZnO та пристроїв разом із наноструктури, такі як біосенсори, газові датчики та сонячні батареї, оскільки це відносно легко виробляють такі форми наноструктур ZnO, які мають хороші транспортні властивості носія заряду і висока кристалічна якість. Виходячи з його продуктивності та застосування, можна сказати, що ZnO є найважливіший матеріал і проник у всі аспекти життя.

## 1.2 Фізичні властивості плівок оксиду цинку

При температурі навколишнього середовища стабільна фаза ZnO має вирцитову структуру, як показано на рис. 1.1. Структуру ZnO можна розглядати як ряд площин двох типів, які взаємопроникають підрешітки  $Zn^{2+}$  і  $O^{2-}$ , так що кожен іон Zn оточений тетраедром іонів, і навпаки. Тип тетраедричної координації в ZnO породжує нецентральну симетричну структуру з полярною симетрією вздовж шестикутної осі. Ця полярність не тільки викликає характерну п'єзoeлектричність та спонтанну поляризацію, але також відіграє певну роль при зростанні кристалів, травлення та утворення дефектів.





### Рис. 1.1 – Кристалічна структура комірки оксиду цинку

Шестикутна решітка ZnO належить до просторової група  $R\bar{6}3mc$  з параметрами решітки  $a = 3,250$  і  $c = 5,207$  Å [5]. У таблиці 1 наведено перелік основних фізичних параметрів масивного ZnO.

Крім вюрцитової фази, кристалічні структури ZnO також поділяються кубічним цинком споруди суміші та кам'янистої солі (NaCl) [8]. Структуру цинкової суміші ZnO можна стабілізувати лише за рахунок росту на кубічних субстратах, тоді як структура скельної солі може бути отримана при відносно високому тиску при  $\sim 10$  ГПа. Теоретичні розрахунки показують, що четверта фаза - кубічний цезій хлорид, можливий при надзвичайно високих температурах, однак ця фаза ще має бути експериментально спостерігали [29]. Структура смуги напівпровідника є критично важливою для визначення його потенційної корисності. Крім того, точне розуміння структури смуги є дуже важливим для відповідного пристрою додатки. Поки що кілька теоретичних підходів різного ступеня складності, такі як Локальне наближення щільності (LDA) [3], першооснови (FP) [3] та включення атомних для обчислення результатів проведено самокоригування псевдопотенціалів, скорегованих самовзаємодією (SIC-PP) [3] смугова структура wurtzite ZnO. Розрив смуги ZnO (3,37 eV) визначається з вищезгадані методи.

Для комерційних застосувань напівпровідників на основі ZnO, особливо в оптоелектронних пристроїв, важливим питанням є реалізація інженерної смуги в широкому діапазоні. Можна модулювати смугу зазору ZnO, легуючи його напівпровідником (Mg, Cd, S, Se, Te і так далі) який має різний проміжок у зоні, утворюючи потрібне з'єднання [3-7]. Розрив енергетичної смуги може бути збільшується або зменшується за рахунок легування MgO та CdO відповідно. Механічні властивості матеріалів передбачають різні поняття, такі як твердість, жорсткість, і п'єзоелектричні константи, модулі Юнга та об'ємні модулі та врожайність. ZnO – відносно

м'який матеріал твердістю близько 5 ГПа при глибині проникнення пластику 300 нм [8]. Метод наноіндикації широко застосовується для зондування механічних властивостей ZnO над широкий діапазон розмірних шкал і температур, які вказують на інформацію про поведінку матеріал, що зазнав пошкодження, спричинений контактом. Вимірювання поглиблення з урахуванням глибини забезпечують повна інформація про твердість та індуковану тиском фазову трансформацію ZnO матеріал. П'єзоелектричність також є одним з найважливіших механічних властивостей. П'єзоелектричний тензор ZnO є вважається рівним або навіть більшим, ніж GaN та AlN, які вказують на те, що ZnO є потенційний кандидат для великих застосувань для електромеханічної зв'язку [9].

ZnO має безліч привабливих переваг в електричних властивостях, пов'язаних з великою смугою. До розриву відносяться більш високі напруги пробою, здатність підтримувати великі електричні поля, менший шум генерації та високотемпературної та потужної роботи. Концентрація носія ZnO варіюється дуже багато, але зазвичай знаходиться в межах  $10^{15}$ - $10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ . Найбільший зареєстрований допінг n-типу становить  $\sim 10^{20}$  електронів /  $\text{см}^3$  а найбільший допінг p-типу -  $\sim 10^{19}$  дірок /  $\text{см}^3$ . Однак високий рівень p-провідності сумнівний і експериментально не підтверджений. Енергія зв'язування екситону становить 60 меВ при кімнатній температурі, що є однією з причин ZnO оптоелектронні програми пристроїв. Рухливість електронного залу при кімнатній температурі низька

провідність n-типу становить  $\sim 200 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , а для низької p-типу провідність знаходиться в інтервалі  $5$ - $50 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  [4].

Добре відомо, що як внутрішні, так і зовнішні ефекти можуть сприяти оптичному

властивості напівпровідника. До цих пір оптичні властивості ZnO були вивчені різноманітність експериментальних методів, таких як

фотолюмінесценція (PL), катодолюмінесценція (CL), оптична передача, поглинання та відбиття та ін. Спектр PL має виявив різкий пік випромінювання ультрафіолету (УФ) та широкий пік випромінювання глибокого рівня (DLE) відповідно. На малюнку 1.2 наведена принципова схема енергетичного положення деяких глибоких рівнів, що випромінюється у видимій області [4]. УФ-випромінювання пов'язане з кристалічною якістю, що відповідає випромінюванню екситону від зони діапазону провідності до валентної зони [4].

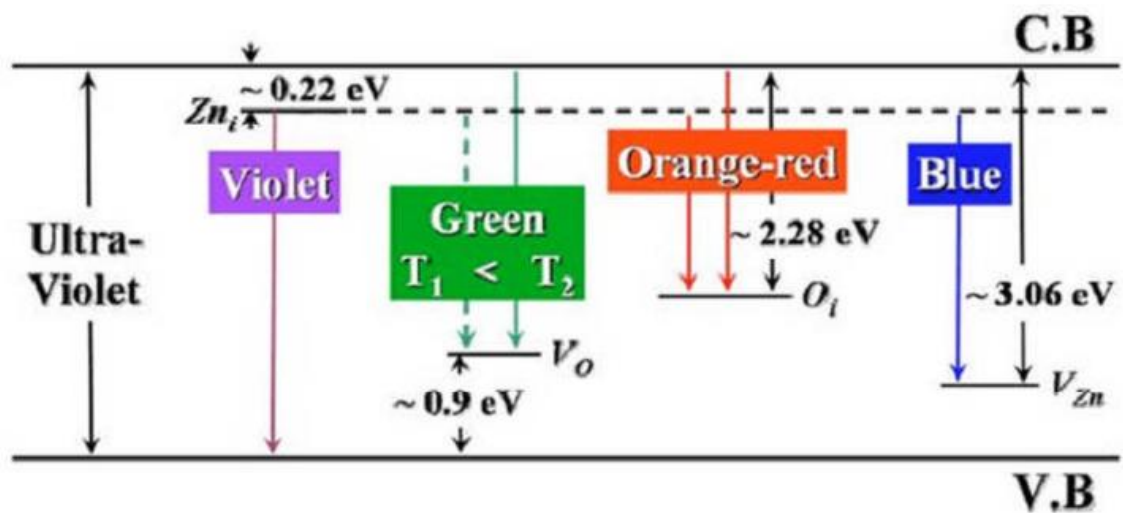


Рис. 1.2 – Схематична зонна діаграма рівнів оксиду цинку [4]

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості масивного оксиду цинку [4]

Фізичний параметр	Значення
Стабільна фаза при кімнатній температурі (300 K)	вюрцит
$a$ , нм	0,325
$c$ , нм	0,521
Густина, г/см <sup>3</sup>	5,7
Ефективна маса електрона (дірки)	0,318 (0,500)
Ширина забороненої зони при 300 K, eV	3,37
Внутрішня концентрація носіїв, см <sup>-3</sup>	10 <sup>20</sup> ( $n$ -тип), 10 <sup>17</sup> ( $p$ -тип)
Провідність, см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	>200

### 1.3 Механізми росту плівок оксиду цинку

Ріст кристалів наноструктур можна контролювати, залежно від поверхні енергії рідкладки ( $\gamma_s$ ) і зростання зародження ( $\gamma_n$ ), а також від інтерфейсу енергій між двома шарами ( $\gamma_i$ ). Загалом визнано три режими росту, які схематично показані на рисунку. 1.3

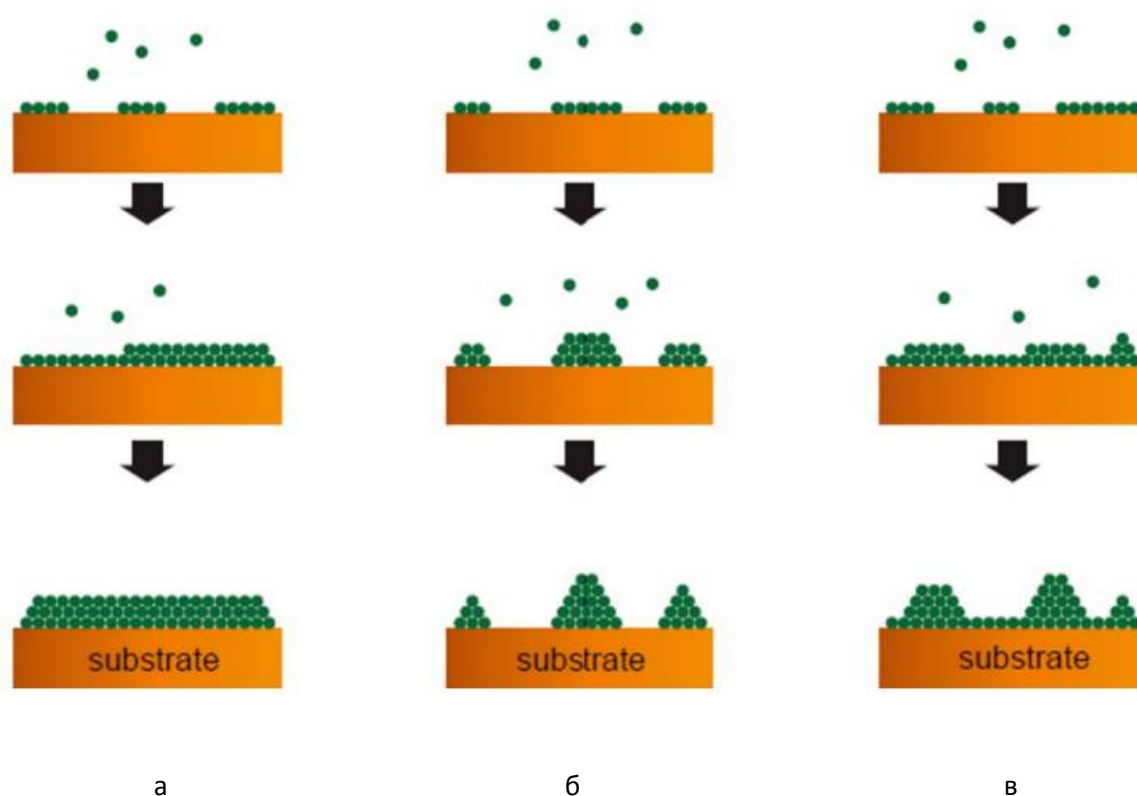


Рис. 1.3 – Механізми росту шарів оксиду цинку: а – за Франком-ванде Мерве, б – за Фольмером-Вебером, в – за Странським-Крастановим [10]

При зростанні шару сума поверхневих енергій поверхні та зростаючої поверхні ядра дорівнюють поверхневій енергії підкладки, тобто  $\gamma_s = \gamma_i + \gamma_n$ . Тому отриманий матеріал у цьому випадку повністю покриває або «змочує» поверхню підкладки, в результаті чого ріст пошаровий або ріст Франка-ван-дер-Мерве (рис. 1.3а).

Для росту островів осаджений матеріал не змочує підкладку:  $\gamma_s < \gamma_i + \gamma_n$ . Загальна енергія системи зменшується за рахунок накопичення осаджених видів і подальше зародження тривимірних островів, як схематично показано на рис. 1.3б. Це режим росту за Фольмером-Вебером.

При зростанні острівного шару острівне утворення починається один раз або кілька моношарів осаджений матеріал покриває поверхню підкладки (рис. 3.1в). Цей режим зростання є результатом наявності мікронапружень через невідповідність ґраток між підкладкою і вирощеним матеріалом і описується як механізм росту Странського-Крастанова. Поверхнева енергія підкладки в цьому режимі перевищує комбінацію обох поверхневих енергій інтерфейсу і зростання острівців, тобто  $\gamma_s > \gamma_i + \gamma_n$ .

## РОЗДІЛ 2.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВТРАТ

В наш час серед різних конструкцій тонко-плівкових СЕ на основі ГП найбільшу ефективність демонструють прилади типу «надпідкладка», оскільки вони мають ряд переваг порівняно з конструкцією «підкладка» [2]. Фотоперетворювачі такого типу представляють собою багатошарову структуру що містить підкладку (скло), фронтальний струмознімальний контакт (MgO), віконний (ZnO), поглинальний (CdTe) та тильний контактний (метал) шари. Типовий СЕ з поглинальним шаром CdTe має конструкцію скло/*p*-MgO/*p*-ZnO/*n*-CdTe/метал яка наведена на рис. 2.1. Зменшення ефективності такого фотоперетворювача можливе як внаслідок оптичних втрат енергії так і внаслідок рекомбінації сгенерованих світлом електронно-діркових пар. В роботі проводилася оптимізація конструкції СЕ скло/*p*-MgO/*p*-ZnO/*n*-CdTe/метал шляхом мінімізації оптичних втрат у приладі.

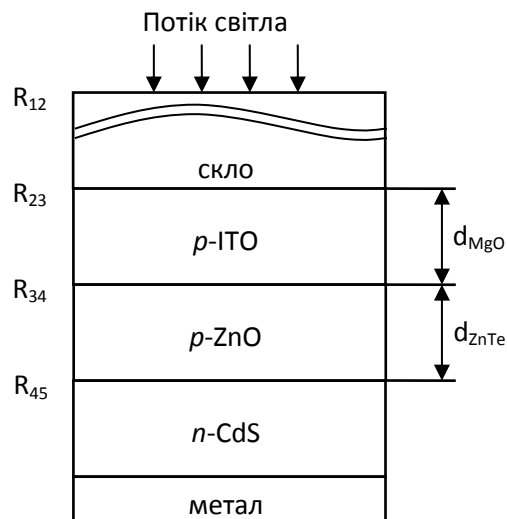


Рис. 2.1. Конструкція СЕ на основі ГП *p*-ZnO/*n*-CdS

Потік сонячного світла, перед тим, як потрапити до шару CdS, де

відбувається фотогенерація електронно-діркових пар проходить через шари скла, ІТО та ZnO. При цьому відбуваються оптичні втрати світла внаслідок його відбиття від границь: повітря-скло, скло-ІТО, ІТО-ZnO та ZnO-CdS та поглинання світлового потоку у допоміжних шарах.

Показник відбиття від границь контактуючих шарів може бути визначений за формулою Френеля:

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (2.1)$$

де  $n_1, n_2$  – показники заломлення першого та другого контактних матеріалів, відповідно.

У випадку використання електропровідних шарів коефіцієнт оптичного відбиття визначається з використанням більш складного співвідношення :

$$R = \frac{|n_1^* - n_2^*|}{|n_1^* + n_2^*|} = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2}, \quad (2.2)$$

де  $n_1^*, n_2^*$  – комплексні показники заломлення,  $k_1, k_2$  – коефіцієнти оптичного ослаблення (екстинкції) матеріалів.

Значення коефіцієнту ослаблення для скла було прийнято рівним нулю ( $k = 0$ ), у зв'язку з тим, що у фотоперетворювачах використовується спеціальне скло, яке має дуже малий коефіцієнт поглинання. Для розрахунку показника заломлення скла використовувалась формула Зелмеера:

$$n^2 = 1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}, \quad (2.3)$$

де сталі дорівнюють  $a_1=0,3840$ ,  $a_2=0,4435$ ,  $a_3=0,3877$ ,  $\lambda_1=87$  нм,  $\lambda_2=122$  нм,  $\lambda_3=9998$  нм.

Для побудови спектральних залежностей  $n$  та  $k$  були використані довідникові значення коефіцієнтів заломлення та ослаблення для ІТО, ZnO, CdS.

Коефіцієнт пропускання світла крізь допоміжні шари у випадку нехтування процесами поглинання в них визначається за виразом  $T = 1 - R$ .

При проходженні потоку світла до поглинаючого шару CdTe коефіцієнт пропускання може бути знайдений за формулою:

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45}), \quad (2.4)$$

де  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{34}$ ,  $R_{45}$  – коефіцієнти відбиття на границях: повітря-скло, скло-ІТО, ІТО-ZnO, ZnO-CdS.

Слід відзначити, що наведене співвідношення не враховує багаторазові відбиття у шарах скла, ІТО, ZnO, що цілком прийнятно при малих коефіцієнтах відбиття на межах поділу матеріалів. Малі коефіцієнти відбиття дозволяють також ігнорувати інтерференційні ефекти.

У загальному випадку крім відбиття потрібно враховувати втрати на поглинання світла у допоміжних шарах фотоперетворювача. Коефіцієнт пропускання з урахуванням втрат на відбиття та поглинання у віконному та струмопровідному шарах може бути розрахований з використанням виразу:

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45})(e^{-\alpha_1 d_1})(e^{-\alpha_2 d_2}), \quad (2.5)$$

де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коефіцієнти поглинання матеріалів провідного та віконного шарів;



$d_1, d_2$  – їх товщини.

З урахуванням оптичних втрат в допоміжних шарах приладу може бути визначене максимальне значення струму короткого замикання  $J_{SC}$  СЕ. При розрахунках вважалося, що освітлення фотоперетворювача відбувається в умовах АМ 1,5. Для моделювання сонячного спектра використовувався стандарт ISO 9845-1:1992.

Розрахунок  $J_{SC}$  проводився з використанням виразу:

$$J_{SC} = q \sum_i T(\lambda) \frac{\Phi_i(\lambda)}{h\nu_i} \Delta\lambda \quad (2.6)$$

де  $\Delta\lambda$  – інтервал довжин хвиль між сусідніми значеннями  $\lambda_i$ ;

$h\nu_i$  – енергія фотона визначеної довжини хвилі;

$\Phi_i$  – густина спектрального потоку випромінювання.

Моделювання проводилося в діапазоні зміни товщини віконного шару ZnO  $d = 50-300$  нм. Товщина струмознімального фронтального шару ІТО приймалася рівною  $d = 200$  нм. Ці значення є типовими для реальних СЕ [10].

## РОЗДІЛ 3.

### РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВТРАТ

#### 3.1 Оптичні втрати на відбивання

Для виявлення коефіцієнтів відбиття на інтерфейсах: скло – TCO, TCO – CdS і CdS – CdTe необхідно знати значення показник заломлення та коефіцієнт вимирання TCO, CdS та CdTe в спектральний діапазон 300–850 нм. У дискусії нижче ми розглянемо дві найпоширеніші структури сонячної батареї CdTe / CdS в якому оксид олова олії (ITO) і оксид олова оксиду оксиду F (SnO<sub>2</sub>: F) використовуються як TCO. На рис. 3.1 показані спектральні залежності  $n$  і  $k$  для ITO (як правило, 90% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% SnO<sub>2</sub>), узятих з посилань. [10,11] і для SnO<sub>2</sub>: F, взятої з джерела [12]. Також показані дані про CdS [13] та CdTe [14].

Зауважимо, що дані про оптичні константи матеріалів цитовані в різних джерелах дещо відрізняються, залежно від прийнятий метод вирощування кристала або плівки. Однак за винятками, ці відмінності проявляються слабо результати обчислення інтегральних характеристик багатошарового сонячного елемента, зі струмом короткого замикання  $J_{sc}$ . Для обчислення  $J_{sc}$  з використанням даних для  $n$  і  $k$ , отриманих за еліпсометрії для монокристала CdTe і плівок [14] призводить до майже однакових результатів.

Наголос робиться на отримання низького рівня коефіцієнти відбиття (менше 0,05–0,06). Пояснення для це порівняно невелика різниця між оптичними константами контактуючих матеріалів. Результати розрахунку, показані на рис.3.2 для відображення на інтерфейсах тих самих матеріалів (показано на рис. 3.2 (а)) з повітрям дають зазвичай спостережувані значення

R: 0,037–0,034 для інтерфейсу повітря / скло, 0,25–0,35 для повітря/CdTe інтерфейсу тощо.

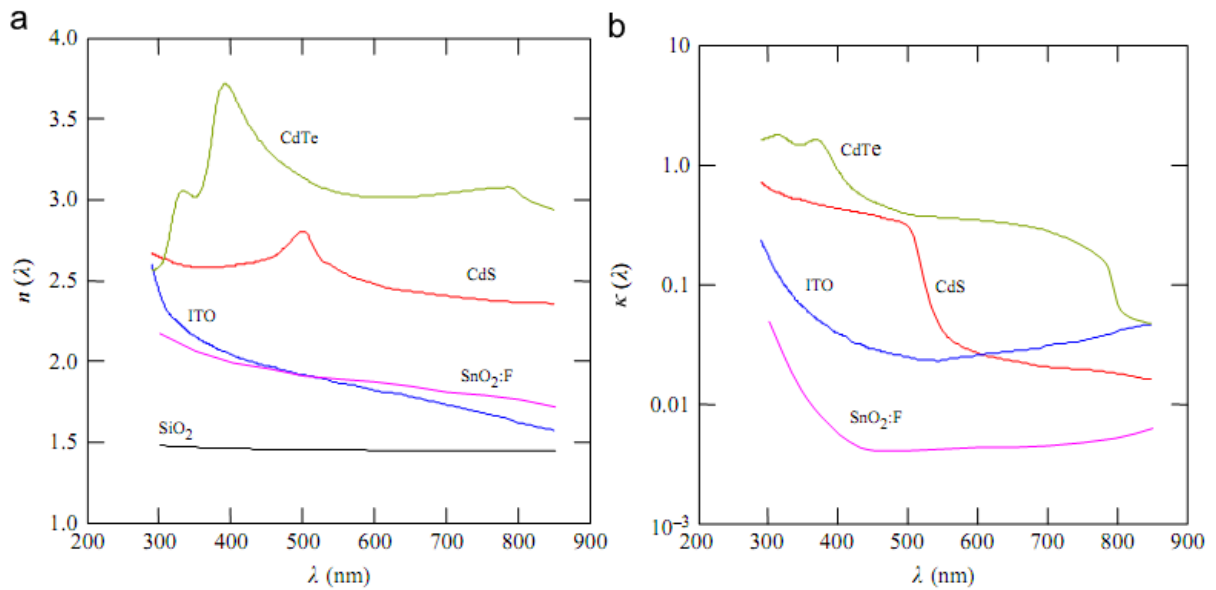


Рис. 3.1 – Показники заломлення (а) та оптичного ослаблення (б) фотоперетворювача

На рис. 3.2 приведені спектральні залежності коефіцієнтів відбивання на інтерфейсах, отримані в результаті подальшого використання коефіцієнтів Заломлення та екстинкції.

Як наслідок збереження енергії, передача-коефіцієнт коефіцієнта пропускання у кожному інтерфейсі задається  $T=1-R$ . Тому для втрат відбиття на всіх інтерфейсах раніше сонячне випромінювання досягає шару поглинача CdTe (рис. 3.3).

З рис. 3.3 випливає, що загальні втрати відбиття на інтерфейсах: повітря-скло, скло – ITO, ITO – CdS та CdS – CdTe в тонкому прошарку CdS / CdTe сонячного елемента становить близько 9% у всьому спектрі діапазону довжин хвиль 300–850 нм. Це означає, що втрати на відбиття у випадку тонкошарової структури CdS / CdTe не так важливе, як у випадку з кремнієвою сонячною батареєю.

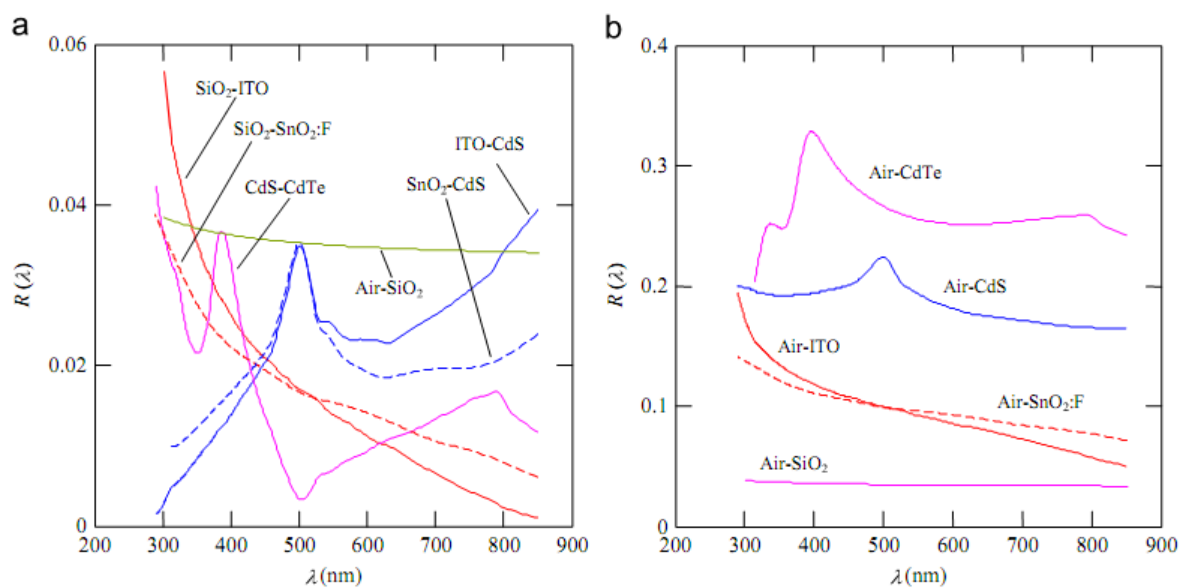


Рис. 3.2 – Значення коефіцієнтів відбивання на різних інтерфейсах, які базуються на скляній підкладці (а) та на повітрі (б)

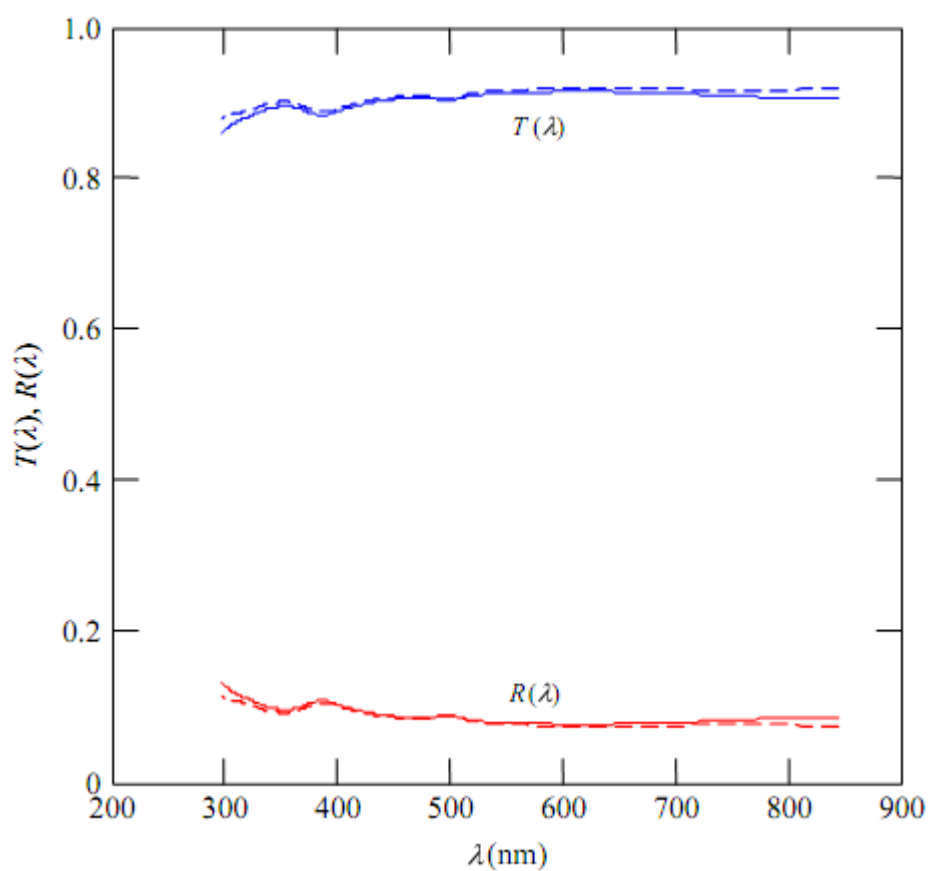


Рис. 3.3 – Розраховані значення спектральних залежностей коефіцієнтів відбивання та пропускання для фотоперетворювача

Фактично, коефіцієнт відбиття від дзеркальної поверхні кремнію складає приблизно 30%, в той час як в області довжин хвиль біля 400 нм вони навіть вище 50%. Рівняння (2.3) не враховує багатократних відбивань в об'ємі шарів ІТО та CdS, що є цілком прийнятним через малу різницю коефіцієнтів відбивання на інтерфейсах (Рис. 3.2а). Врахування декількох відбивань лише ускладнює вираз для коефіцієнта пропускання, але призводить до результатів, практично ідентичних наведеним на рис. 3.3. Врахування похибок, які є результатом ігнорування численних відбивань та пов'язані з ними подальші врахування в коефіцієнт корисної дії фотоперетворювача, пов'язані з впливом струму короткого замикання.

### 3.2 Втрати на поглинання

На рис. 3.3 приведені значення коефіцієнтів пропускання структур скло/ІТО/CdS (суцільні лінії) та скло/ZnO/CdS (пунктирні лінії) розрахованих у випадку різних товщин шарів, які можуть вносити суттєвий вклад у загальний коефіцієнт оптичного пропускання.

Як видно з рис. 3.4, спостерігаються загальні втрати на рівні 10-15 % у діапазоні довжин хвиль 500-550 нм, що можна пояснити поглинанням фотонів у проміжному шарі, та більші втрати (порядка 15-35 %) у випадку шару ІТО (як додавання до втрат на відбивання). Значно більше втрат спостерігається в області довжин хвиль 500–550 нм, що пояснюється поглинанням в CdS разом з ІТО або SnO<sub>2</sub>: F. У області довжин хвиль 500–550 нм при зменшенні товщини шару ІТО, можна зменшити оптичні втрати на 12–15%, однак ефект товщини SnO<sub>2</sub>: F є лише номінальним. Більший ефект може бути досягнутий в діапазоні 500–550 нм при зменшенні товщини шару CdS. Однак добре відомо, що отримання суцільних напівпровідникових плівок з товщинами менше 50 нм є дуже складною задачею.

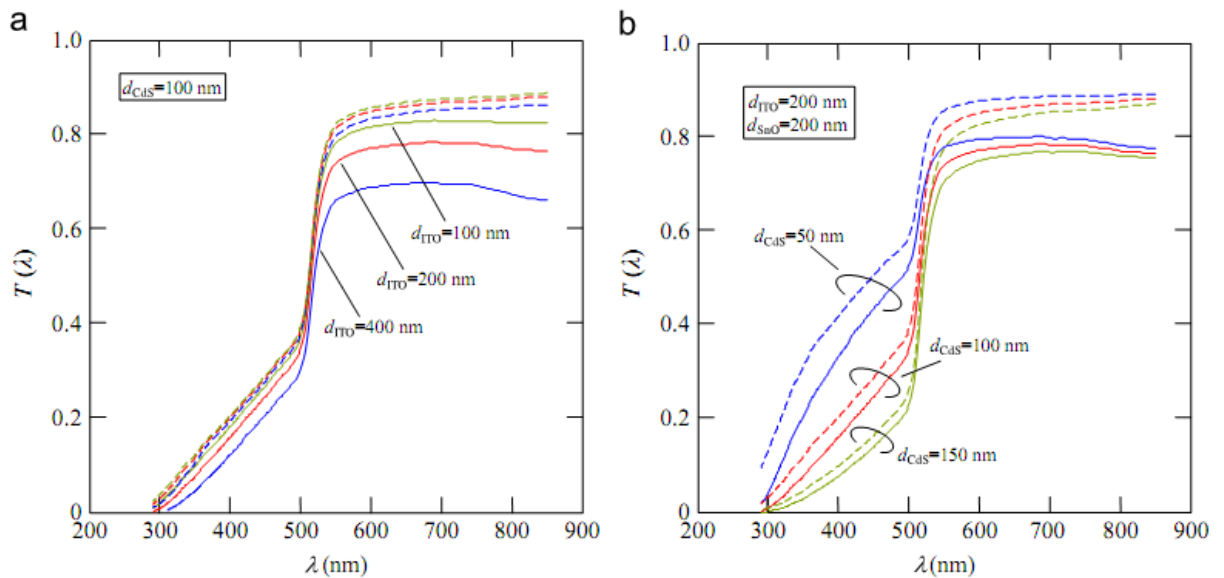


Рис. 3.4 – Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання змодельованих структур

### 3.3 Вплив оптичного поглинання в струмопровідних шарах перетворювачів на значення струму короткого замикання

На рис. 3.5а приведені залежності струму короткого замикання як функції від товщини струмопровідних шарів. Рис. 3.5 б презентує процентний опис загальних втрат у фотоперетворювачів як функцію від товщини шарів.

Як видно з рис. 3.5б, оптичні втрати, викликані шаром TCO з товщиною 200 нм становлять близько 20% і 10% для ITO і SnO<sub>2</sub>: F відповідно. Коли товщина шару TCO близька до 0, оптичні втрати викликаються лише відбиттям і дорівнюють 8,5% та 8,8% для шарів SnO<sub>2</sub>: F та ITO відповідно.

Товстіші шари ITO з товщиною 500–700 нм призводять до непринятно високого рівня оптичних втрат (40% при  $d_{CdS}=0$ ), при використанні SnO<sub>2</sub>: F

втрати становлять лише в межах 15% (при  $d_{\text{CdS}}=0$ ). В обох випадках наявність шару CdS, навіть коли його товщина 50 нм призводить до додаткового збільшення оптичних втрат приблизно на 10%, а коли товщина CdS становить 100 нм, ця додаткова втрата стає 12% та 17% відповідно для ІТО та SnO<sub>2</sub>. Слід мати на увазі, що товщина CdS, яка дорівнює 50–60 нм, є близькою до мінімально можливого значення при використанні поточної технології виробництва сонячних батарей на базі CdS/CdTe [16]. У випадку SnO<sub>2</sub>: F, наявність дуже тонких меж шару CdS густина струму короткого замикання  $J_{\text{sc}} = 23 \text{ mA/cm}^2$ , та досягнення цього значення в сонячній батареї ІТО/ZnO/CdTe фізично можливо тільки з ультратонким шаром ІТО.

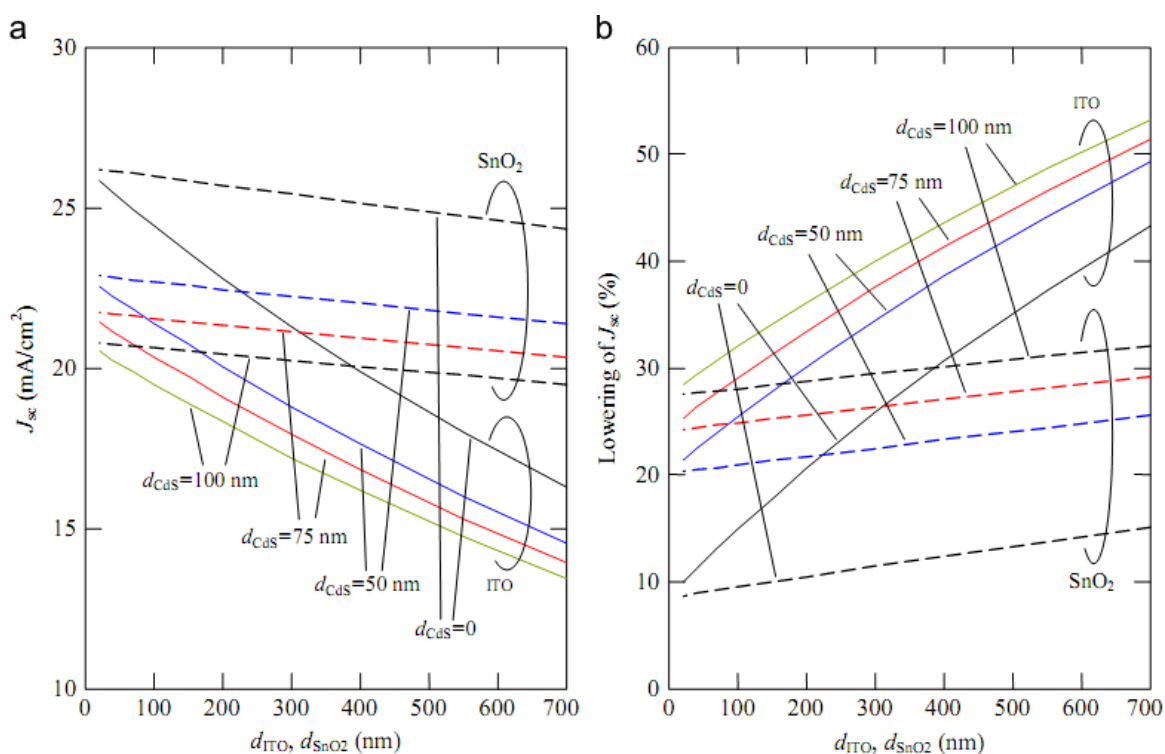


Рис. 3.5 – Залежності струму короткого замикання від товщини шарів (а) та загальних втрат (б)

## Висновки

Результати розрахунків, проведених у даній роботі, виявляють конкретні причини оптичних втрат у сонячній батареї на базі ZnO/CdS(CdTe) та можливості їх зменшення:

- втрати на відбивання становлять близько 8% у широкому спектральному діапазоні; лише в області 400 нм (довжини хвиль, при яких в земних умовах сонячна радіація має найбільший внесок) збільшуються до 10–11%. Втрати на відбиття можуть бути зменшені на 4% за допомогою використання антивідбивного покриття на лицьовій поверхні скла. Даний коефіцієнт визначається різницею між оптичними константами контактуючих матеріалів;

- шар ІТО поглинає випромінювання набагато більше, ніж шар SnO<sub>2</sub>:F. Завдяки поглинанню в шарі ІТО з товщиною 200 нм, струм короткого замикання зменшується на 12%, однак зменшення при товщині 500 нм може становити 25–26%. На відміну від попереднього шару, поглинання в шарі SnO<sub>2</sub>:F є значно меншим, що викликає лише зниження струму короткого замикання приблизно на 2% при товщині 200 нм і 4–5% при товщині 500 нм (поглинанням в шарі SnO<sub>2</sub>:F шаром можна знехтувати, коли його товщина становить 100 нм);

- Втрат на поглинання в шарі ZnO не можна уникнути за рахунок зменшення товщина, оскільки вона пов'язана з міждіапазонними оптичними переходами. Навіть при товщині 50 нм зменшення величини струму короткого замикання, викликаного поглинанням у шарі ZnO, становить приблизно 10%, а подальше збільшення на 5–6% відбувається при товщині шару 100 нм.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] //www.firstsolar.com/en/modules.php .
- [2] J. Britt, C. Ferekides, Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency, *Applied Physics Letters* 62 (1993) 2851–2853.
- [3] P.V. Meyers, S.P. Albright, Photovoltaic materials, history, status and outlook, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 8 (2000) 161–168.
- [4] D. Bonnet, CdTe thin-film PV modules, in: T. Makkvart, L. Castaner (Eds.), *Practical Handbook of Photovoltaic: Fundamentals and Applications*, Elsevier, Oxford, 2003, pp. 333–366.
- [5] R.A. Synowicki, Spectroscopic ellipsometry characterization of indium tin oxide film microstructure and optical constants, *Thin Solid Films* 313–314 (1998) 394–397.
- [6] D.H. Rose, F.S. Hasoon, R.G. Dhere, D.S. Albin, R.M. Ribelin, X.S. Li, Y. Mahathongdy, T.A. Gessert, P. Sheldon, Fabrication procedures and process sensitivities for CdS/CdTe solar cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 7 (1999) 331–340.
- [7] M.D. Archbold, D.P. Halliday. Novel tubular geometry CdTe/CdS devices, in: *Record of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008, ISSN: 0160-8371, 2009, pp. 1–4.*
- [8] T.S. Moss, G.J. Burrell, D. Ellis, *Semiconductor Opto-Electronics*, Butterworth Publishers, New York, 1973, pp. 12–17.

- [9] S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practice*, Prentice Hall, New Jersey, 2000, p. 45.
- [10] [//homepages.rpi.edu/~schubert/Educational-resources/Materials-Refractive-index-and-extinction-coefficient.pdf](http://homepages.rpi.edu/~schubert/Educational-resources/Materials-Refractive-index-and-extinction-coefficient.pdf) (E.F. Fred Schubert, Educational Resources. *Refractive index and Extinction Coefficient of Materials*, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA, 2004).
- [11] [//refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=ITO](http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=ITO) .
- [12] A. Compaan, R. Collins, V. Karpov, D. Giolando, *Fabrication and Physics of CdTe Devices by Sputtering*, Annual Technical Report, Contract no. RXL-5-44205-01, The University of Toledo, June 1, 2006–May 31, 2007, pp. 1–87.
- [13] S. Ninomiya, Sadao Adachi, *Optical properties of wurtzite CdS*, *Journal of Applied Physics* 78 (1995) 1183–1190.
- [14] P.D. Paulson, X. Mathew, *Spectroscopic ellipsometry investigation of optical and interface properties of CdTe films deposited on metal foils*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 82 (2004) 279–290.
- [15] *Reference Solar Spectral Irradiance at the Ground at Different Receiving Conditions*, Standard of International Organization for Standardization ISO 9845-1, 1992.
- [16] D. Bonnet, *Cadmium telluride solar cells*, in: M.D. Archer, R. Hill (Eds.), *Clean Electricity from Photovoltaics*, Imperial College Press, New York, 2001,

pp. 245–275.

[17] Xuanzhi Wu, High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells, *Solar Energy* 77 (2004) 803–814.

[18] C.S. Ferekides, U. Balasubramanian, R. Mamazza, V. Viswanathan, H. Zhao, D.L. Morel, CdTe thin film solar cells: device and technology issues, *Solar Energy* 77 (2004) 823–830.

[19] E.W. Jones, V. Barrioz, S.J.C. Irvine, D. Lamb, Towards ultra-thin CdTe solar cells using MOCVD, *Thin Solid Films* 517 (2009) 2226–2230.

[20] [//www.targray.com/solar/thin-film-materials/solar-glass.php](http://www.targray.com/solar/thin-film-materials/solar-glass.php) .

[21] J.I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, Prentice-Hall, New Jersey, 1971, pp. 105–106.

[22] M. Born, E. Wolf, A.B. Bhatia, *Principles of Optics*, 7th edition, Cambridge University Press, 1999 (p. 362).