

## **В І Д Г У К**

офіційного опонента про дисертаційну роботу

**Литвиненко Вікторії Ярославівни**

“Оптичні та рекомбінаційні втрати у тонкоплівкових сонячних елементах  
CdS/CdTe і CdS/Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

### **Актуальність теми**

На сьогодні єдиним достовірним фактом вважають те, що протягом минулого століття середня температура земної поверхні зросла приблизно на 1°C, причому половина цього підвищення припала на півтора останні десятиліття. Ймовірна причина екологічних змін – це енергетичні перевитрати людства, в основному за рахунок теплової енергетики, яка базується на спалюванні запасів органічних речовин (вугілля, нафта, природний газ). Це сприяє насиченню в атмосфері вуглекислоти, сірководню та інших шкідливих викидів і в кінцевому спричиняє парниковий ефект. За прогнозами вчених ключову роль у розв’язанні енергетичної проблеми мають відіграти галузі, які розвивають альтернативні джерела енергії, зокрема, сонячну енергетику. Існують декілька шляхів підвищення ефективності напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії на електричну. За складністю їх поділяють на 3 групи: 1) конструктивні вдосконалення наявних перетворювачів (рельєфні поверхні напівпровідникових сонячних батарей, що збільшують робочу площу на одиниці поверхні, зайнятої батареєю, батареї з двосторонніми колекторами, антивідбивні пасивувальні і зміцнювальні покриття, оптичні концентратори сонячних потоків, каскадні сонячні батареї); 2) технологічні вдосконалення (формування тонких плівок, багат шарові структури напівпровідників з градієнтом ширини забороненої зони у бік від «оптичного вікна» до значень, характерних для вузькощілинних матеріалів); 3) сонячні батареї на основі квантових наноструктур.

Серед радикальних способів зниження вартості є перехід до тонкоплівкових технологій, використання прямозонних напівпровідників

замість непрямозонного кремнію. Найпоширенішим напрямком вирішення проблем сонячної енергетики на основі фотовольтаїки є використання тонкоплівкових матеріалів CdTe, Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>. Як показують теоретичні оцінки, ефективність фотоелектричного перетворення даними матеріалами може досягати 28-30%. На практиці цей показник є значно меншим. Тому дисертаційне дослідження впливу оптичних втрат, зумовлених відбиванням і поглинанням сонячного випромінювання з урахуванням його спектрального розподілу і всіх видів рекомбінаційних втрат у тонкоплівкових сонячних елементах на основі CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, а також встановлення критеріїв підвищення ефективності фотоелектричного перетворення є **актуальною** задачею для створення сонячних батарей з високою ефективністю фотоелектричного перетворення.

Про **актуальність** тематики дисертаційного дослідження свідчить її зв'язок з державними науковими програмами:

“Фізичні основи технології напівпровідникових структур, їх електронні властивості та прилади на їх основі” (0102U004996);

“Дослідження фотоелектричних процесів, оптимізація структури і параметрів тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe з метою підвищення ефективності перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну” (0107U008166).

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 124 найменувань та списку публікацій по темі дисертаційного дослідження із 13 найменувань. Робота викладена на 150 сторінках та містить 46 рисунків і 5 таблиць.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Вперше на підставі виконаних наукових досліджень отримано такі основні результати:

- показано, що в сонячних елементах на основі CdS/CdTe з товщиною шару CdTe (2-3) мкм рекомбінаційні втрати поза областю просторового заряду (ОПЗ) і на його тильній поверхні практично не впливають на значення струму короткого замикання, тоді як при товщинах CdTe

- (0,5-1) *мкм* рекомбінаційні втрати значно зростають та зменшують величину струму короткого замикання на 15%;
- встановлено, що в сонячних елементах на основі CdS/CdTe максимальна густина струму короткого замикання досягається при ширинах ОПЗ (0,4-0,8) *мкм* і часах життя носіїв заряду в CdTe не менше  $10^{-9}$  с;
  - показано, що сумарні втрати при відбиванні сонячного випромінювання AM1,5 в спектральному діапазоні (300 *нм* -840 *нм*) від інтерфейсів в сонячних елементах CdS/CdTe з прозорими електродами  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$  (ITO) і  $\text{SnO}_2:\text{F}$  незначно відрізняються і становлять 8,8% і 8,5%, відповідно; встановлено, що поглинання в ITO та CdS зменшує густина струму короткого замикання значно сильніше (на 12%), ніж у шарі  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (на 2%) за однакових товщин;
  - встановлено, що загальні оптичні втрати при відбиванні випромінювання від інтерфейсів для типових параметрів сонячних елементів CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) становлять порядку 4% без врахування оптичних втрат від електродної металевої сітки на поверхні ZnO, тоді як сумарні рекомбінаційні втрати в сонячних елементах CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> становлять 6-7%;
  - встановлено, щоб збільшити ефективність збирання заряду в ОПЗ для сонячних елементів  $\text{CuIn}_{0,76}\text{Ga}_{0,24}\text{Se}_2$  до 98,7% необхідно проводити пасивацію некомпенсованих акцепторів, тоді як для сонячних елементів  $\text{CuIn}_{0,39}\text{Ga}_{0,61}\text{Se}_2$  цього досягти неможливо через значно менший час життя носіїв заряду.

**Перший розділ** є оглядовим. У цьому розділі аналізується стан експериментальних і теоретичних досліджень та розробок тонкоплівкових CdTe та Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> сонячних елементів і модулів та шляхи підвищення (конструктивний, технологічний з використанням наноматеріалів) ефективності фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію, яка наразі значно поступається теоретичній оцінці. Завершується розділ аналізом фізичних проблем, які потребують вирішення,

а також формулюванням задач, на розв'язок яких спрямовані дослідження, висвітлені в наступних розділах роботи.

**У другому розділі** приведено результати дослідження оптичних втрат (поглинання, відбивання) в сонячних елементах CdS/CdTe з використанням оптичних констант матеріалів, тобто показників заломлення і коефіцієнтів екстинкції. Розглянуто дві найбільш поширені структури CdS/CdTe сонячних елементів, в яких в якості TCO (прозорого провідного оксиду) використовуються оксид індію та олова (ІТО) або оксид олова, легований фтором ( $\text{SnO}_2\text{:F}$ ). З врахуванням впливу оптичних втрат в усьому спектральному діапазоні повного сонячного випромінювання AM1.5 розраховано коефіцієнти пропускання, відбивання та густину струму короткого замикання. На основі аналізу отриманих результатів розкрито механізми впливу оптичних втрат на струм короткого замикання та запропоновано спосіб підвищення ефективності сонячних елементів CdS/CdTe за рахунок зменшення оптичних втрат.

**У третьому розділі** описані результати досліджень щодо рекомбінаційних втрат в сонячних елементах CdS/CdTe. Для розрахунків використовувалися вирази для спектрального розподілу квантової ефективності сонячного елемента CdS/CdTe, які є результатом розв'язку рівняння неперервності з урахуванням рекомбінації на фронтальній і тильній поверхнях шару CdTe. Квантовий вихід розраховувався з врахуванням дрейфової та дифузійної компонент, зумовлених фотогенерацією електронно-діркових пар в ОПЗ і в нейтральній області діодної структури. Приведено розрахунок залежності густини струму короткого замикання від ширини ОПЗ, розрахованого при різних часах життя електронів і швидкості рекомбінації на фронтальній поверхні. Показано, що відносне зменшення густини струму короткого замикання через недостатню товщину шару CdTe, враховуючи всі види втрат (втрат, спричинених фотоелектричними процесами в нейтральній частині шару CdTe, рекомбінацією на його тильній поверхні та недостатнім поглинанням в шарі CdTe) при товщині шару CdTe  $d = (2-3)$  мкм, становить біля 5%. Зазначено,

що зменшення товщини поглинаючого шару до 0.5 мкм знижує споживання матеріалу (CdTe), але в цьому випадку втрати зростають до ~ 20%.

У четвертому розділі досліджено оптичні та рекомбінаційні втрати в сонячних елементах на основі  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) для двох різних ширин забороненої зони поглинаючого шару:  $E_g=1.14-1.16$  eV ( $\text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga}) \approx 0.3$ ) та  $E_g = 1.36-1.38$  eV ( $\text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga}) \approx 0.6-0.7$ ). Проведені розрахунки густини струму короткого замикання для повного сонячного випромінювання AM1.5, пропускання, яке враховує відбивання від інтерфейсів повітря-ZnO), ZnO-CdS і CdS-CIGS ( $R_{34}$ ), а також поглинання в шарах ZnO і CdS і коефіцієнта відбивання матеріалу з антивідбиваючим покриттям показують, що втрати при відбиванні від інтерфейсу повітря/ZnO сягають 9.2-9.3% за відсутності антивідбиваючого покриття, а з покриттям зменшуються до 1.4-1.9% для  $\text{CuIn}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{Se}_2$  і  $\text{CuIn}_{0.69}\text{Ga}_{0.31}\text{Se}_2$ , відповідно.

**Наукове та практичне значення отриманих результатів** полягає у тому, що проведені дослідження дозволили встановити критерії вибору структурних, оптичних та геометричних параметрів матеріалів, при яких зменшуються оптичні та рекомбінаційні втрати в сонячних елементах CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, що в кінцевому збільшує коефіцієнт корисної дії фотоелектричного перетворення, як у вентиляльному, так і у фотодіодному режимах.

**Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Достовірність отриманих результатів та зроблених висновків забезпечується використанням сучасних добре апробованих експериментальних та теоретичних методів із використанням достовірних даних (зокрема, оптичних констант матеріалів). Отримані теоретичні результати не викликають сумніву, оскільки проведені розрахунки спектрів квантової ефективності фотоелектричного перетворення сонячних елементів CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> та струму короткого замикання добре узгоджуються з експериментальними даними.

## **Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату**

Загалом робота виконана на високому науковому рівні, проте слід вказати на ряд її недоліків:

1. При розрахунку рекомбінаційних втрат у сонячних елементах CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> було враховано ефект пропускання структур скло/TCO/CdS, ZnO/CdS (рис. 4.15, 4.16). З тексту дисертації незрозуміло, для якої товщини шарів матеріалів це було зроблено.
2. Для найкращого співпадіння розрахунків спектрів квантової ефективності сонячних елементів CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> з експериментальними даними, підбиралися параметри, отримані з наукових літературних джерел (рис. 3.3, 4.11). Наскільки достовірним є результат, отриманий при варіюванні декількох параметрів?
3. З тексту дисертації незрозуміло, для якого максимального значення густини струму короткого замикання розраховані рекомбінаційні втрати у сонячних елементах CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (табл. 4.2).

Зазначені зауваження не є принциповими і не знижують наукову та практичну цінність результатів та висновків дисертаційної роботи.

### **Висновки про відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Литвиненко В.Я. є завершеним науковим дослідженням, яке підтверджує високу кваліфікацію дисертанта.

Висновки дисертаційної роботи **повністю відображають** основні положення, які виносяться на захист.

Вважаю, що дисертант виконала поставлені завдання у повній мірі. Робота має перспективу подальшого розвитку в напрямку підвищення коефіцієнта корисної дії фотоелектричного перетворення сонячних елементів.

Основні результати дисертаційної роботи представлені у провідних фахових вітчизняних і зарубіжних виданнях та збірниках матеріалів наукових конференцій. Автореферат і опубліковані роботи **повністю відображають** зміст дисертації.

Вважаю, що за актуальністю теми, обсягом, науковою новизною, практичною цінністю отриманих результатів і висновків дисертаційна робота Литвиненко В.Я. “Оптичні та рекомбінаційні втрати у тонкоплівкових сонячних елементах CdS/CdTe і CdS/Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>” задовольняє всім вимогам, які ставляться Вищою атестаційною комісією Міністерства освіти і науки України до кандидатських дисертацій, а її автор, Литвиненко Вікторія Ярославівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри загальної фізики  
Дрогобицького державного  
педагогічного університету  
імені Івана Франка

Р.М.Пелешак

**Підпис Пелешака Р.М. засвідчую:**

Проректор з наукової роботи  
Дрогобицького державного  
педагогічного університету  
імені Івана Франка, професор



М.П.Пантюк