

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Литвиненко Вікторії Ярославівни "Оптичні та рекомбінаційні втрати в 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

### **I. Актуальність теми дисертації.**

Найдоступнішим і безпечним джерелом енергії є сонячна енергія, для перетворення якої використовуються сонячні елементи. Одним із основних завдань в сонячній енергетиці є отримання низько вартісних з високим ККД сонячних елементів. Серед способів зниження вартості сонячних модулів і збільшення обсягів їх виробництва є перехід до тонкоплівкових технологій з використанням прямозонних напівпровідників, нанесених на підкладку великої площі (скло, металева фольга, пластик). Тонкоплівкові технології, що вийшли на рівень масового виробництва, базуються на CdTe і CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> сонячних елементах – представниках фотовольтаїки другого покоління. Ефективність фотоелектричного перетворення в модулях на їх основі приблизно вдвічі менша теоретичної межі 28-30%. Ураховуючи масштаби виробництва, підвищення ефективності навіть на кілька відсотків дає значний економічний ефект. Звідси, дисертаційна робота Литвиненко В. І., в якій досліджуються можливості підвищення ефективності фотоелектричного перетворення сонячних елементів, належить до числа актуальних і своєчасних. Сформований алгоритм розрахунків оптичних втрат у сонячних елементах дозволяє передбачити отримання сонячних елементів із підвищеною ефективністю.

### **II. Ступінь обґрунтованості основних наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.**

Дисертаційна робота В.Я. Литвиненко є складовою частиною науково-дослідних робіт кафедри оптоелектроніки Чернівецького національного університету імені Ю.Федьковича в рамках Координаційних планів НДР Міністерства освіти і науки України у 2004-2014 рр. за темою «Фізичні основи технології напівпровідникових структур, їх електронні властивості та прилади на їх основі» (номер державної реєстрації 0102U004996), а також українсько-

російського проекту «Дослідження фотоелектричних процесів, оптимізація структури і параметрів тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe з метою підвищення ефективності перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну», фінансованого Державним фондом фундаментальних досліджень України (№ державної реєстрації 0107U008166), що є підтвердженням важливості та актуальності цієї роботи.

Проведений комплекс досліджень включив в себе дослідження процесів відбивання оптичного випромінювання на межах поділу матеріалів і поглинання у склі, в шарах  $\text{SnO}_2\text{:F}$ , ZnO, CdS, CdTe,  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  сонячних елементів, квантової ефективності фотоелектричного перетворення в сонячних елементах із урахуванням дрейфової та дифузійної компонент, рекомбінації на поверхнях поглиначів і в області просторового заряду, кількісної характеристики усіх видів рекомбінаційних втрат.

Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертаційної роботи Литвиненко В.Я. визначається застосуванням відомих модельних уявлень і надійних теоретичних і числових методів розрахунків із використанням оптичних констант матеріалів, а також підтверджується узгодженням розрахованих і експериментально отриманих спектрів квантової ефективності фотоелектричного перетворення сонячних елементів CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Основні висновки, положення та рекомендації, сформульовані в дисертації, логічно витікають із отриманих результатів. Роботу вирізняє чіткість викладення матеріалу та доказовість.

### **III. Наукова новизна і практичне значення.**

У результаті проведених досліджень отримані результати вносять значний внесок у розуміння ефективності фотоелектричного перетворення сонячних елементів CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> і наукова новизна яких не викликає сумніву. Пріоритетним результатом, на нашу думку, є встановлення параметрів, які впливають на ефективність сонячних елементів, зокрема для сонячних елементів CdS/CdTe розраховано сумарні втрати при відбиванні сонячного випромінювання AM1.5 від інтерфейсів в усьому спектральному діапазоні. З'ясовано, що поглинання в шарах ITO і CdS зменшує густину струму

короткого замикання  $J_{sc}$  значно сильніше, ніж у шарі  $\text{SnO}_2:\text{F}$ . Доведено, що в сонячних елементах  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  при реальних часах життя носіїв заряду в  $\text{CdTe}$  ( $0.1-2 \times 10^{-9}$  с) максимальна густина струму короткого замикання досягається при ширині області просторового заряду (ОПЗ) 0.4-0.8 мкм. Показано, що у застосовуваному в сонячних елементах шарі  $\text{CdTe}$  товщиною 2-3 мкм, втрати, спричинені рекомбінацією в нейтральній частині шару  $\text{CdTe}$  (поза ОПЗ) і на його тильній поверхні, майже не зменшують струм короткого замикання  $J_{sc}$  при потовщенні шару  $\text{CdTe}$ , але значно підвищують його при потоншенні до 0.5-1 мкм.

Для сонячних елементів  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) встановлено, що загальні втрати при відбиванні випромінювання від інтерфейсів за типових параметрів становлять лише кілька відсотків. Сумарні оптичні втрати при наявності антивідбиваючого покриття в CIGS сонячних елементах наближаються до 20%.

Показано, що сумарні рекомбінаційні втрати становлять 6-7%. При цьому рекомбінаційні втрати на фронтальній поверхні поглинача (інтерфейсі  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ ), в ОПЗ і на його тильній поверхні в досліджуваних сонячних елементах є незначними. Значно більші рекомбінаційні втрати спостерігалися поза ОПЗ у нейтральній частині поглинача.

Доведено, що періодичні зміни у спектрах оптичного пропускання сонячних елементів  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  і  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  зумовлені інтерференцією при багаторазовому відбиванні в тонких шарах матеріалів, а їх відсутність у спектрах квантової ефективності пояснюється значною різницею оптичних констант на контакті повітря/напівпровідник у порівнянні з оптичним контактом двох напівпровідників.

Практична цінність роботи полягає в тому, що проведені дослідження дозволили з'ясувати можливості зменшення оптичних і рекомбінаційних втрат у сонячних елементах  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  і  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  шляхом варіювання параметрів матеріалів і гетероструктур. Отримані результати дозволили обґрунтувати рекомендації стосовно збільшення ефективності  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  і  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  сонячних елементів, що застосовуються у широкомасштабному виробництві модулів для сонячних електростанцій.

#### **IV. Апробація результатів дисертації, повнота викладу основних положень, висновків і рекомендацій.**

Сформульовані в дисертації наукові положення, висновки і рекомендації доповідались на 8 конференціях, а також викладені в 13 наукових працях: 5 статей у фахових наукових журналах (із них 4 у наукометричній базі даних Scopus), та 8 праць у збірниках тез доповідей на українських і міжнародних конференціях за профілем проведених досліджень. Публікації і автореферат об'єктивно і в повній мірі відображають зміст дисертації.

#### **V. Зауваження щодо дисертаційної роботи:**

1. У другому розділі розрахунки спектрів проводилися в спектральному діапазоні 300-850 нм, при наближенні, що скло з низьким вмістом заліза не поглинає в даній області. Одночасно підкреслюється, що це припущення вірне для  $\lambda > 400$  нм, що узгоджується також з рис.2.7. Можливо розрахунки необхідно було проводити в межах 400-850 нм?

2. Встановлений вплив антивідбиваючого покриття на коефіцієнт відбивання на інтерфейсі антивідбиваюче покриття-ZnO. Чому при підрахунку загальних оптичних втрат в сонячних елементах втрати на цьому інтерфейсі не враховані? (стор.105)

3. На стор.105 зазначено існування розбіжностей між розрахованими втратами при відбиванні в сонячному елементі, при поглинанні в плівці CdS з літературним даними, але відсутнє пояснення, що спричинили такі розбіжності.

4. Рис.4.18 (стор.130) – незрозуміла ілюстрація спектрального розподілу втрат.

5. Є деякі зауваження стилістичного і технічного характеру (наприклад, на стор. 60 – „слабкіше”, на стор. 128 – верхній індекс „см<sup>2</sup>”, на стор. 129 – „вбудована напруга” )

Однак, зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи Литвиненко В.Я.

**VI. Висновок щодо відповідності дисертації вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань».**

Враховуючи актуальність теми дисертації, значний обсяг проведених досліджень, наукову і практичну цінність отриманих результатів, об'єм дисертації вважаю, що дисертаційна робота "Оптичні та рекомбінаційні втрати в тонкоплівкових сонячних елементах CdS/CdTe і CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>" відповідає вимогам МОН України, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. „Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор, Литвиненко Вікторія Ярославівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент – в.о.завідувача кафедри  
біологічної фізики та медінформатики  
ВДНЗ України «Буковинський державний  
медичний університет», доктор фіз.-мат. наук, доцент



В.І. Федів

