

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Знаменщикова Ярослава Володимировича на тему: «Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок CdZnTe та приладові структури на їх основі», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Актуальність теми.

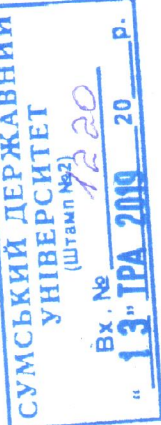
Напівпровідникові сполуки групи $A^{II}B^{VI}$ та тверді розчини заміщення на їх основі привертають увагу міжнародної наукової спільноти можливістю вирішення за їх допомогою широкого кола задач напівпровідникової електроніки, оптоелектроніки, дозиметрії та інших галузей прикладного матеріалознавства. Зокрема, ведуться інтенсивні дослідження властивостей твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з метою виготовлення неохолоджуючих детекторів іонізаційного випромінювання, дешевих сонячних елементів та приладів (фотоприймачів і генераторів) оптичного випромінювання.

Практичному впровадженню матеріалів групи $A^{II}B^{VI}$ перешкоджає недостатній рівень знань властивостей реальної поверхні та меж розділу (зокрема, метал-напівпровідник, гетероперехід тощо), які формуються в процесі виготовлення приладів на їх основі. Тому, актуальним є завдання розробки елементів технології створення найпростіших електронних приладів, використання їх для одержання первинної фізичної інформації про властивості нових матеріалів, меж розділу та оцінки перспектив їх практичного використання. Знання фізичних процесів, які зумовлюють властивості напівпровідникових матеріалів і параметри структури, є визначальним фактом подальшого розвитку технології електронних приладів на основі твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та можливості їх вдосконалення.

Незважаючи на значну кількість робіт присвячених дослідженню структури і фізичних властивостей монокристалів і плівок на основі $Cd_{1-x}Zn_xTe$, залишається багато невирішених завдань стосовно наноструктурованих та структурнодосконалих матеріалів. Тому, вибраний об'єкт досліджень, безумовно, є надзвичайно перспективним і актуальним як в плані експериментально-технологічних розробок, так і в прикладному аспекті.

Використання у дисертаційній роботі низки взаємодоповнюючих оптичних і електрофізичних методів дослідження дозволило автору дослідити особливості впливу елементного складу та фізико-технологічних умов одержання функціональних шарів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ на їх структурні, оптичні та електрофізичні властивості.

Дисертаційна робота Знаменщикова Я.В. являє собою завершений комплекс досліджень із вивчення особливостей процесів структуро- та фазоутворення у плівках $Cd_{1-x}Zn_xTe$, одержаних методом вакуумного термічного випаровування у квазізамкненому



об'ємі, а також рекомбінаційних процесів у детекторних структурах на їх основі. Одержані автором результати є науково обґрунтованими та достовірними, що підтверджується використанням добре апробованих сучасних експериментальних методик.

Дисертаційна робота Знаменщикова Я.В. «Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок CdZnTe та приладові структури на їх основі» є, без сумніву, актуальною та своєчасною. В дисертаційній роботі вирішується актуальна проблема одержання та дослідження детекторних структур на основі плівок твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 172 найменувань.

У вступі обговорюється актуальність теми, коротко описано зміст роботи, сформульовано мету та основні завдання дисертаційного дослідження, новизна, наукова і практична цінність задач, що розв'язані при виконанні дисертаційної роботи.

У першому розділі наведено основні фізичні властивості напівпровідникового матеріалу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та розглянуто області його приладового застосування. Вказується залежність структурних, оптичних та електрофізичних властивостей плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ від вмісту цинку в твердому розчині. В результаті аналізу, автор вказує на відсутність експериментальних досліджень практичного застосування $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з високим вмістом цинку ($x > 0.1$) для виготовлення детекторів радіаційного випромінювання.

У другому розділі приведено детальну інформацію про методи одержання плівок та дослідження їх основних властивостей, а саме: структурних, оптичних і електрофізичних. Також, наведено теоретичне підґрунтя методики моделювання процесів рекомбінації вільних носіїв заряду в детекторних структурах на основі плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Зокрема, автором обрані одні із найбільш інформаційних методів дослідження напівпровідників з використанням сучасного обладнання (мікро-раман, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, рентгенівська спектроскопія індукована протонами, фотолюмінесценція, вольт-амперометрія), фізичних властивостей плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$.

У третьому розділі приведено результати експериментальних досліджень морфології, структури, субструктурних та оптичних властивостей плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Аналізується якість плівок від компонентного вмісту цинку. На основі рентгенівської дифракції встановлено значення сталих ґратки та вказується, що одержані сполуки є однофазними. Виявлено переважаючий напрям росту плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та залежність середнього розміру стовпчастих зерен від вмісту цинку в плівці. Дослідження оптичної якості плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ проведене на основі результатів вимірювання спектрів фотолюмінесценції. За енергетичним положенням

екситонних ліній було розраховано залежність ширини забороненої зони матеріалу плівок від вмісту цинку та показано, що вона апроксимується лінійною залежністю.

У четвертому розділі досліджено особливості раманівських спектрів полікристалічних плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та наявність включень вторинних фаз на поверхні та в об'ємі плівок. Встановлено, що раманівські спектри плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ демонстрували характерну для твердих розчинів двомодову поведінку і включали моди поздовжніх (LO) та поперечних (TO) CdTe- та ZnTe- подібних коливань. На основі проведених досліджень розподілу компонент методом мікро-рамана встановлено, що на поверхні плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ відсутні включення вторинних фаз, таких як Te, CdTe чи ZnTe. Аналіз карт розподілу компонент, одержаних методом μ -РВП, дозволив автору встановити, що компоненти розподілені рівномірно за площею та включення Te, Cd, Zn відсутні. В результаті проведених досліджень встановлено, що було одержано однофазні плівки твердих розчинів, які не містять сторонніх фаз.

У п'ятому розділі наведені результати вивчення основних електрофізичних властивостей та фотовідклику прототипів детекторів жорсткого випромінювання, створених на основі плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Підтверджено припущення, що плівки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ є фоточутливими до світлового випромінювання видимого діапазону. Збільшення відношення густини струму при освітленні до густини темного струму дозволяє припустити, що фоточутливість плівок, зі збільшенням в них вмісту цинку від $x=0.09$ до $x=0.46$, зростає. Проведено дослідження відклику прототипів детекторів на радіаційне випромінювання. Вказується, що найвищою чутливістю володіє детектор на основі плівки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з вмістом цинкової компоненти $x=0.09$. На основі теоретично аналізу, автор вказує, що для вмісту цинку $x=0.09$ та 0.46 рекомбінаційні процеси визначаються глибокими центрами з відмінними параметрами.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність. Основні наукові результати дисертаційної роботи є обґрунтованими, що підтверджується використанням відтворюваних технологічних умов синтезу плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ методом вакуумного термічного випаровування у квазізамкненому об'ємі, і взаємодоповнюючих експериментальних методів досліджень. Їх достовірність забезпечується узгодженістю отриманих результатів з відомими літературними даними, а також публікаціями у фахових журналах.

Наукова новизна роботи

До наукової новизни дисертаційної роботи слід віднести такі найбільш важливі результати:

1. Комплексні дослідження морфології поверхні, структурних, субструктурних та оптичних характеристик плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, одержаних методом квазізамкненого об'єму, дозволили встановити характер їх залежності від елементного складу твердого розчину для значень $x > 0.1$.

2. На основі проведених досліджень раманівських спектрів було встановлено залежність частот мод поздовжніх та поперечних фононних коливань кристалічної ґратки твердого розчину $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ від його елементного складу.

3. Виготовлено прототипи детектора чутливого до радіаційного випромінювання на основі товстих плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

4. Експериментальними та теоретичними методиками проведено ряд комплексних досліджень якості одержаних сполук та залежності основних структурних особливостей полікристалічних плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Практична цінність дисертаційної роботи

Отримані результати впроваджені у Сумському державному університеті в рамках виконання держбюджетних науково-дослідних проектів: «Одержання та оптимізація властивостей наноструктур і плівок сполук A_2B_6 та їх твердих розчинів для пристроїв оптоелектроніки, спінтроніки та геліоенергетики» (2013-2015 рр.), «Структурні, оптичні та електричні характеристики тонких і товстих плівок твердих розчинів CdTe з ізовалентними домішками (Mn, Zn) для високоефективних детекторів іонізуючого випромінювання та сонячних елементів» (2015-2017 рр.), «Синтез, дослідження та оптимізація властивостей плівок халькогенідів кадмію та цинку легованих рідкісноземельними та ізовалентними домішками» (2016-2018 рр.), «Синтез та оптимізація властивостей напівпровідникових плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Ge})\text{SSe}_4$, одержаних безвакуумними методами, для сонячних перетворювачів третього покоління» (2017-2020 рр.).

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих працях.

Автором дисертації проведені цікаві і оригінальні теоретичні та експериментальні дослідження. Основні результати роботи достатньо повно висвітлені у 22 наукових працях у наукових фахових виданнях, у тому числі: 6 статтях у міжнародних та вітчизняних фахових наукових журналах, з яких 6 публікацій входять до наукометричної бази даних «Scopus» та 16 тезах доповідей на всеукраїнських та міжнародних конференціях. Опубліковані роботи в достатній мірі відображають основні положення дисертації. Автореферат в повній мірі відображує матеріал дисертаційної роботи.

Недоліки та зауваження по роботі

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертації, виникає ряд зауважень:

1. На сторінці 28 автор приводить концентраційну залежність ширини забороненої зони кристалічного матеріалу $Cd_{1-x}Zn_xTe$, яка описується квадратичною залежністю. Однак, не вказано зовнішні умови вимірювань (температура, тиск та інші) на основі яких було одержано дану залежність. В результаті приведених досліджень температурної поведінки спектрів фотолюмінесценції, автор, на сторінці 84, приводить концентраційну залежність ширини забороненої зони, яка описується лінійною залежністю. В роботі не вказується причини різних залежностей, що описують концентраційну залежність ширини забороненої зони. Також, доцільно було б приводити концентраційну залежність на основі вимірювань спектрів крайового поглинання, а не спектрів фотолюмінесценції.
2. На сторінці 76 наведено твердження, що присутність смуги фотолюмінесценції є підтвердженням *p*-типу провідності зразка CdTe. Можливість встановити тип провідності на основі спектрів фотолюмінесценції є некоректним та потребує підтвердження на основі прямих вимірювань (дослідження ефекту Холла чи вимірювань фотодифузійного струму).
3. В роботі не приведено точні значення товщини одержаних плівок, а тільки вказано їх значення ~ 30 мкм для плівок одержаних шляхом співвипаровування шихти CdTe та ZnTe з двох випарників та 70 мкм для плівок нанесених шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe. Дані параметри є важливими та необхідно їх провести на основі механічних вимірювань.
4. В роботі на сторінці 75-84 наведено температурну поведінку спектрів фотолюмінесценції. Автор встановлює приналежність смугам свічення відповідні процеси на основі літературних відомостей. Даний підхід є сумнівним та потребує підтвердження. Зокрема необхідно привести вимірювання спектрів збудження та кінетичні вимірювання для підтвердження висунутих припущень. Також, в роботі не приведено спектри свічення «чистої» підкладки, що є важливим в ідентифікації смуг випромінювання.
5. Аналіз раманівських спектрів також проводиться на основі літературних відомостей без вказання типу підкладок використаних іншими авторами. Також, не приводяться раманівські спектри «чистої» підкладки. Для підсилення висновків дослідження коливних спектрів доцільним є проведення теоретико-групового аналізу та встановлення правил відбору для досліджуваних сполук.
6. В розділі 5 на сторінках 109-121 приведено електрофізичні дослідження приладової структури на основі $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Проте не встановлено вплив зовнішніх факторів на чутливість, стабільність і точність вимірювань розробленого макету. Окрім того, не

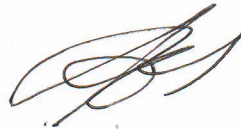
проведено порівняння технічних характеристик із уже відомими аналогами та не вказано його переваги та недоліки. Також, не вказано про можливість технічного впровадження одержаної приладової структури в масове виробництво та наявності об'єкту права власності.

7. В роботі допущено ряд граматичних описок. Четвертий розділ роботи є підпунктом третього, оскільки стосується і структурних, і оптичних властивостей. Тому, не доцільно проводити розділення роботи на дані розділи.

Дисертаційна робота оформлена у відповідності до вимог Міністерства освіти і науки України. Основні висновки дисертаційної роботи та її автореферату ідентичні за кількістю, змістом та відображають основні досягнення дисертації, які виносяться на захист її автором.

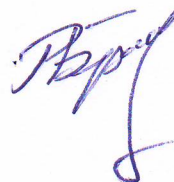
Дисертація Знаменщиков Я.В. «Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок CdZnTe та приладові структури на їх основі», має важливе наукове та прикладне значення, і за науковим рівнем, новизною та достовірністю результатів повністю відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою № 567 Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. щодо кандидатських робіт, а її автор Знаменщиков Ярослав Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальність 01.04.01 - фізика приладів, елементів і систем.

Офіційний опонент -
професор кафедри загальної фізики
Національного університету
“Львівська політехніка”,
доктор фізико-математичних наук, професор



Г.А. Ільчук

Підпис професора Г.А. Ільчука засвідчує
Вчений секретар Національного університету
“Львівська політехніка”

Р.Б. Брилинський