

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



Знаменщиков Ярослав Володимирович

УДК 539.216.2:539.219.1:621.382 (043.3)

**Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок CdZnTe
та приладові структури на їх основі**

Спеціальність 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук
Косяк Володимир Володимирович,
докторант кафедри електроніки, загальної
та прикладної фізики Сумського державного
університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Льчук Григорій Архипович,
професор кафедри загальної фізики Інституту
прикладної математики та фундаментальних наук
Національного університету «Львівська
політехніка»;

доктор технічних наук, професор
Хрипунов Геннадій Семенович,
проректор з науково-педагогічної діяльності
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут».

Захист відбудеться « 31 » травня 2019 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БІЦ, ауд. 307.
E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/111-55-051-02.html>

Автореферат розісланий « 24 » квітня 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю. О. Шкурдода

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Напівпровідникові плівки трикомпонентного твердого розчину $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (CZT) є перспективним матеріалом для створення детекторів радіаційного випромінювання, що працюють за кімнатної температури, фотодетекторів, фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії тощо.

Досить довгий час як базовий матеріал для виготовлення детекторів жорсткого радіаційного випромінювання використовували монокристали високоомного телуриду кадмію легovanого хлором CdTe (Cl). Проте останнім часом відбулася заміна CdTe (Cl) твердими трикомпонентними розчинами цієї сполуки, насамперед CZT. Це пояснюється низкою істотних переваг цих твердих розчинів перед двокомпонентною сполукою, а саме: високим питомим опором матеріалу, можливістю регулювання ширини забороненої зони за рахунок зміни елементного складу та ін. Проте одержати монокристали CZT високої якості з рівномірним розподілом компонент сполуки за об'ємом матеріалу досить складно, що призводить до збільшення собівартості приладів на їх основі. Особливо гостро ця проблема постає при виготовленні панельних детекторів жорсткого випромінювання з великою площею робочої поверхні.

Вище описана проблема може бути вирішена за рахунок використання більш дешевих плівкових технологій, що дозволяють отримувати однорідні за складом шари твердих розчинів великої площі. Саме тому замість об'ємних монокристалів CZT останнім часом усе частіше використовують полікристалічні плівки цього матеріалу високої кристалічної якості з товщиною, більшою ніж 30 мкм.

Результати дослідження структурних властивостей плівок CZT свідчать про значний вплив вмісту металів на їх кристалічну якість, що, у свою чергу, визначає оптичні та електрофізичні характеристики, а отже експлуатаційні властивості приладів на їх основі. Проте комплексних досліджень щодо впливу елементного складу, перед усім за великих значень x ($x > 0,1$), на властивості плівок CZT на цей час практично не проводили.

Відомо, що для виготовлення високоефективних напівпровідникових приладів, які використовують явище внутрішнього фотоефекту, необхідний матеріал високої кристалічної якості та гомогенності з великим, порівняно з дифузійною довжиною вільного пробігу згенерованих носіїв заряду, розміром стовпчастих зерен та областей когерентного розсіювання (ОКР), низьким рівнем мікрореформацій, низькою концентрацією дислокацій та рекомбінаційних центрів. Тому принципово важливими є вибір оптимального методу та фізико-технологічних умов нанесення плівок твердих розчинів CZT для забезпечення контрольованості їх властивостей.

Таким чином, питання, пов'язані з вивченням впливу вмісту ізовалентної домішки Zn на структурні, субструктурні, оптичні та електрофізичні характеристики, спектр рекомбінаційних центрів товстих полікристалічних плівок CZT, є актуальними для створення високоякісних приладів сенсорики, оптоелектроніки та геліоенергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в науково-дослідній лабораторії «Оптоелектроніки та геліоенергетики» кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету. Результати роботи одержані під час виконання держбюджетних тем № 0113U000131 (2013 – 2015 рр.) «Одержання та оптимізація властивостей наноструктур і плівок сполук A_2B_6 та їх твердих розчинів для пристроїв оптоелектроніки, спінтроники та геліоенергетики», (виконавець), № 0115U000665с (2015 – 2017 рр.) «Структурні, оптичні та електричні характеристики тонких і товстих плівок твердих розчинів $CdTe$ з ізовалентними домішками (Mn, Zn) для високоєфективних детекторів іонізуючого випромінювання та сонячних елементів» (виконавець), № 0116U002619 (2016 – 2018 рр.) «Синтез, дослідження та оптимізація властивостей плівок халькогенідів кадмію та цинку легованих рідкісноземельними та ізовалентними домішками» (виконавець), № 0117U003929 (2017 – 2020 рр.) «Синтез та оптимізація властивостей напівпровідникових плівок $Cu_2ZnSn(Ge)SSe_4$, одержаних безвакуумними методами, для сонячних перетворювачів третього покоління» (виконавець).

Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягає в дослідженні впливу елементного складу та фізико-технологічних умов одержання функціональних шарів CZT на їх структурні, оптичні й електрофізичні властивості; розробленні методики вирощування товстих плівок твердого розчину з визначеним елементним складом у квазізамкненому об'ємі (КЗО); створенні прототипів детекторних структур на основі товстих полікристалічних плівок CZT з оптимізованими властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі науково-прикладні **завдання**:

- розробити методику одержання в КЗО гомогенних за площею та об'ємом товстих плівок CZT із різним елементним складом;
- провести дослідження впливу елементного складу плівок на їх структурні (морфологія поверхні, структурно-фазовий стан, період ґратки), субструктурні (розмір ОКР, рівень мікрореформацій), оптичні (спектри фотолюмінесценції та раманівські, ширина забороненої зони, її залежність від x) та електрофізичні (питома провідність) властивості;
- визначити оптимальні умови (температуру підкладки T_s та випарника T_e) одержання шарів із контрольованими властивостями, придатних для приладового використання;
- визначити основні характеристики (глибину залягання E_r та переріз захоплення вільних носіїв S_p) рекомбінаційних центрів у плівках, що визначають час життя згенерованих жорстким випромінюванням носіїв;
- створити прототипи детекторів жорсткого випромінювання на основі товстих полікристалічних шарів CZT;
- провести моделювання фізичних процесів рекомбінації фотогенерованих носіїв у детекторних структурах, визначити основні робочі характеристики приладів та порівняти їх з експериментальними результатами.

Об'єкт дослідження – процеси структуро- і фазоутворення в плівках CZT, рекомбінаційні процеси в детекторних структурах на основі товстих полікристалічних плівок та їх вплив на електрофізичні характеристики приладів.

Предмет досліджень – структурні та оптичні властивості, елементний склад товстих плівок CZT, одержаних методом вакуумного термічного випаровування в КЗО, і електрофізичні характеристики детекторних структур на їх основі.

Відповідно до поставлених завдань використовувались такі **методи одержання та дослідження** зразків: нанесення плівок методом вакуумного термічного випаровування в КЗО, сканувальна електронна мікроскопія (СЕМ), фрактографія, рентгеноструктурний аналіз (РСА), рентгенівський мікроаналіз (РМА), метод рентгенівського випромінювання, індукованого опроміненням протонами (РВП), низькотемпературна фотолюмінесценція (ФЛ), дослідження раманівського розсіювання світла в плівках, вимірювання електричних характеристик матеріалу, моделювання процесів рекомбінації вільних носіїв заряду після опромінення пульсуючим світловим випромінюванням.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше на основі комплексного дослідження морфології поверхні, структурних (розміру зерен, кристалічної фази, параметрів кристалічної ґратки), субструктурних (розміру ОКР, рівня мікрореформацій) та оптичних (спектрів низькотемпературної фотолюмінесценції та раманівських спектрів) характеристик плівок CZT, нанесених методом КЗО, встановлено характер їх залежності від елементного складу твердого розчину для значень умісту цинку $x > 0,1$.

2. Уперше для полікристалічних плівок CZT за результатами раманівських досліджень одержано залежність частот мод поздовжніх та поперечних фононних коливань кристалічної ґратки твердого розчину від елементного складу. Встановлено, що під впливом мікронапружень кристалічної ґратки полікристалічних плівок частота мод фононних коливань змінюється порівняно з даними, характерними для монокристалічного матеріалу.

3. Уперше на основі товстих полікристалічних плівок CZT із високим вмістом цинку ($0,1 < x < 0,8$) виготовлено прототипи чутливих до радіаційного випромінювання детекторів та показано, що їх фоточутливість зростає зі збільшенням x .

4. Розроблено та апробовано методику оцінювання детекторних властивостей полікристалічних плівок CZT із використанням збуджувального світлового випромінювання видимого діапазону з метою подальшого їх використання як детекторів радіації.

5. Уперше проведено моделювання фізичних процесів рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в детекторних структурах на основі плівок CZT та визначено параметри рекомбінаційних центрів, що визначають електрофізичні характеристики детекторних структур і час життя згенерованих випромінюванням носіїв.

Практичне значення одержаних результатів

Одержані в дисертаційній роботі результати мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Установлені взаємозв'язки між елементним складом плівок CZT та їх структурними, субструктурними, оптичними й електрофізичними властивостями можуть бути використані в подальшому для виготовлення дешевих детекторних структур великої площі та поглинальних шарів тандемних сонячних перетворювачів. Одержані результати сприяють подальшому розвитку основ матеріалознавства твердих розчинів на основі бінарних сполук групи A_2B_6 .

Розроблений метод, що дозволяє одержувати гомогенні за площею та об'ємом товсті плівки CZT із контрольованим умістом ізовалентної домішки цинку, може бути використаний для створення реальних детекторів жорсткого випромінювання, які працюють за кімнатних температур.

Створена лабораторна установка для вимірювання фотовідклику детекторних структур на основі напівпровідникових плівок та результати моделювання фізичних процесів рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в матеріалі можуть бути використані для оптимізації характеристик детекторних структур на основі плівок CZT.

Особистий внесок дисертанта полягає в проведенні самостійного пошуку та аналізі літературних джерел за темою дисертації. Постановлення мети і завдань дослідження, вибір експериментальних та теоретичних методик, обговорення одержаних результатів проводилося разом із науковим керівником В. В. Косяком. Автор особисто одержував полікристалічні плівки CZT для проведення структурних, оптичних та електрофізичних досліджень, вимірював вольт-амперні характеристики (ВАХ), фоточутливість та відклик детекторних структур на радіаційне випромінювання, а також оброблював одержані результати. Дисертант провів моделювання процесів рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в детекторних структурах на основі плівок CZT після вимкнення збуджувального випромінювання. Вимірювання та дослідження раманівських спектрів зразків проводилися спільно з науковим керівником В. В. Косяком у Ризькому технічному університеті (м. Рига, Латвія). Вимірювання спектрів низькотемпературної люмінесценції проводилися за участі співробітника Центру фізичних наук та технології Аурімаसा Чяршкусас (м. Вільнюс, Литва), аналіз спектрів здійснювався спільно зі співробітником ІФ НАН України професором Ю. П. Гнатенко. Дослідження структурних характеристик плівок рентгенівським методом проводилися за участі співробітника ІПФ НАНУ В. М. Кузнецова. Дослідження просторового розподілу елементів методом аналізу рентгенівського характеристичного випромінювання, індукованого протонним пучком, здійснювали за участі та консультації співробітника ІПФ НАНУ А. О. Пономарьова. Обговорення результатів дослідження структурних та субструктурних властивостей плівок CZT проведені разом із доктором фізико-математичних наук, професором А. С. Опанасюком (Сумський державний університет, м. Суми, Україна). Особисто автором підготовлені статті [2, 4 – 6] і тези доповідей [7 – 22]. Статті [1, 3] написані в співавторстві. Основна частина наукових результатів представлена на конференціях та семінарах автором

особисто. Усі наукові положення і висновки, винесені на захист, належать авторові дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати роботи доповідалися і представлялися на таких конференціях: конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання» (Київ, 2015, 2016, 2017, 2018 pp.); Міжнародній конференції «Nanomaterials: Applications and Properties» (Львів, 2014, 2015 pp., Одеса, 2017 p.); Сьомій міжнародній конференції молодих вчених «Low Temperature Physics» (Харків, 2016 p.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-7, СЕМСТ-8)» (Одеса, 2016, 2018 pp.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи» (Луцьк, 2016 p.); науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ)» (Суми, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 pp.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 22 наукових працях, серед яких 6 статей у наукових журналах, 3 статті у матеріалах конференцій, 13 тез доповідей. Сім праць надруковані в журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science Core Collection.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Дисертація викладена на 150 сторінках друкованого тексту, з яких 105 сторінок основного тексту, та містить 36 рисунків і 10 таблиць. Список використаних джерел складається із 172 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми роботи, сформульовані мета та завдання досліджень, визначені її об'єкт і предмет, розкриті наукова новизна й практичне значення одержаних результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію результатів і структуру дисертації.

У першому розділі «Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ та приладові структури на їх основі» наведено основні фізичні властивості напівпровідникового матеріалу та розглянуто області його приладового застосування. А саме зазначено, що трикомпонентний матеріал $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ – це твердий розчин телуриду кадмію (CdTe) і телуриду цинку (ZnTe). CZT – прямозонний напівпровідник p -типу провідності, ширина забороненої зони якого змінюється з 1,46 eV (CdTe) до 2,26 eV (ZnTe) залежно від умісту цинку.

CZT традиційно використовують для виготовлення напівпровідникових детекторів рентгенівського та гамма-випромінювання, що працюють за кімнатних температур. Також цей твердий розчин розглядають як перспективний матеріал для створення верхнього поглинального шару в тандемних фотоелектричних перетворювачах на основі плівок $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ та базового шару детекторів ультрафіолетового випромінювання. Значна зацікавленість до використання сполуки CZT зумовлена такими її властивостями: високим

питомим опором, великим атомним номером, можливістю зміни ширини забороненої зони та періоду ґратки матеріалу в широких межах тощо.

До структурних, оптичних та електрофізичних властивостей плівок CZT, що можуть бути використані в приладових структурах, висувається ряд жорстких вимог. Вони повинні мати рівномірний розподіл елементів за об'ємом плівки та якісну кристалічну однофазну структуру з великим розміром зерна та ОКР, низькою концентрацією рекомбінаційних центрів, дислокацій, низьким рівнем мікрODEФОРМАЦІЙ. Як свідчить аналіз літературних джерел, структурно досконалі напівпровідникові сполуки дозволяє отримувати метод вакуумного термічного випаровування в КЗО, що зумовлено можливістю проводити процес нанесення плівок в умовах, близьких до термодинамічно рівноважних. Проте аналіз літератури засвідчує, що структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CZT, одержаних цим методом, вивчені недостатньо.

Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CZT істотно залежать від умісту цинку у твердому розчині. Проте комплексного дослідження такої залежності, зокрема для плівок, одержаних методом КЗО, не проводилося. Водночас теоретичні розрахунки свідчать про переваги застосування CZT із високим вмістом цинку ($x > 0,1$) для виготовлення детекторів радіаційного випромінювання, проте праці, в яких експериментально досліджується можливість приладового використання такого матеріалу, відсутні.

У другому розділі «Методика проведення експериментальних досліджень» наведено інформацію про методи одержання плівок і дослідження їх структурних, оптичних та електрофізичних властивостей, методіку моделювання процесів рекомбінації вільних носіїв заряду в детекторних структурах на основі плівок CZT.

Відповідно до мети дисертаційної роботи для нанесення плівок твердих розчинів був використаний метод вакуумного термічного випаровування у КЗО. Цей метод був успішно застосований у попередніх працях наукової групи для одержання двокомпонентних сполук CdTe та ZnTe, оскільки він забезпечує високу кристалічну якість нанесених плівок, їх хімічну чистоту і склад, близький до стехіометричного.

Для дослідження структурних, оптичних та електрофізичних властивостей плівок використовувались такі методи:

- сканувальна електронна мікроскопія (визначення морфології поверхні, механізмів росту, середнього розміру кристалітів і товщини плівок);
- рентгенівський мікроаналіз (вивчення стехіометрії та елементного складу плівок);
- рентгеноструктурний аналіз (дослідження структурно-фазового стану плівок, розрахунок розміру ОКР та рівня мікрODEФОРМАЦІЙ);
- низькотемпературна фотолумінесценція (визначення характеру та положення енергетичних рівнів власних точкових дефектів і залишкових домішок);
- раманівська спектроскопія (вивчення фазового складу плівок);
- спектроскопія рентгенівського випромінювання, індукованого

опроміненням протонами (дослідження елементного складу та просторового розподілу хімічних елементів у плівках);

- вимірювання електричних характеристик матеріалу (визначення питомого опору матеріалу, fotocутливості, рухливості носіїв заряду).

Структурні, субструктурні властивості та фазовий склад плівок CZT вивчалися методом рентгеноструктурного аналізу.

Прецизійне визначення сталих кристалічної ґратки матеріалів проводилося як за положенням піку (111) на дифрактограмах, так і за допомогою екстраполяційного методу Нельсона – Рілі, з використанням співвідношення

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}. \quad (1)$$

Рентгенографічний метод також був використаний для визначення середнього розміру ОКР L та рівня мікродеформацій ε у плівках досліджених матеріалів за фізичною півшириною дифракційних ліній. Для плівок з кубічною структурою розрахунок параметрів субструктури проводився за уширенням дифракційного піку (111) кубічної фази. Середній розмір ОКР L та рівень мікродеформацій ε визначалися за такими співвідношеннями:

$$L = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \cdot \operatorname{tg} \theta}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від форми зерна ($k = 0,9$); β – фізичне уширення відповідних рентгенівських ліній.

Для вивчення елементного складу, стехіометрії плівок із різною концентрацією цинку використовувались енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія та аналіз рентгенівського характеристичного випромінювання, індукованого протонним пучком.

Елементний склад плівок визначався з використанням мікроаналітичного прискорювального комплексу на основі компактного електростатичного прискорювача «Сокіл» з енергією пучка протонів до 2 МеВ (ІПФ НАН України, м.Суми). Для аналізу плівок використовувалося рентгенівське характеристичне випромінювання, індуковане протонним пучком. Знімалися сумарні спектри РВП від декількох областей поверхні зразків та проводилося поточкове сканування ділянки півки розміром 200×200 мкм за допомогою мікропучка (мікро-РВП). При цьому поперечний розмір зонда становив 4×4 мкм², заряд $Q = 4 \times 10^{-10}$ Кл/піксель, растр – 50×50 пікселів, крок сканування – 4 мкм, енергія протонів $E_p = 1,5$ МеВ. У результаті одержано карти розподілу елементів (Zn, Cd, Te) за поверхнею зразків і визначено елементний склад конденсатів у декількох областях.

Оптичні властивості плівок CZT вивчалися методами раманівської спектроскопії та низькотемпературної ФЛ. Дослідження раманівських спектрів твердих розчинів проводились за допомогою спектрометра Renishaw InVia 90V727 за кімнатної температури (297 К). Як джерела збуджувального

випромінювання використовувалося декілька лазерів із різною довжиною хвилі, а саме аргонний ($\lambda = 514,5$ нм), гелій-неоновий ($\lambda = 633$ нм) та напівпровідниковий ($\lambda = 785$ нм). Вимірювання спектрів ФЛ були виконані з використанням стандартної установки з повністю автоматизованим монохроматором. Збудження забезпечувалося твердотільним лазером із довжиною хвилі 457 нм (2,71 еВ) та накачкою з використанням СВ діода. Спектри ФЛ були одержані за допомогою високоефективного фотопомножувача з термоелектричним охолодженням, що працював у режимі підрахунку фотонів. Температура зразка варіювалася з 300 К до 3,6 К із використанням гелієвого кріостата.

Вивчення електричних властивостей проводилося шляхом аналізу темнових та світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ). Вимірювання світлових ВАХ та часових характеристик фотовідклику проводилося під дією збуджувального випромінювання білого світлодіода. Вимірювання чутливості детекторів на основі плівок CZT p -типу провідності до жорсткої радіації проводилося під дією опромінення з енергією 59,32 кеВ.

Дослідження параметрів рекомбінаційних центрів проводилося шляхом моделювання фізичних процесів рекомбінації нерівноважних носіїв струму в плівках CZT після їх імпульсного збудження. Модель часової залежності концентрації вільних носіїв заряду після вимкнення збуджувального випромінювання у разі, якщо рекомбінація вільних дірок відбувається за участі двох різних типів центрів, має вигляд

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = \frac{p_{i0(1)}}{1 + \frac{vS_p(1)}{qI_L} \left(p_{i(1)} + p_{0(1)} + N_v \exp\left(\frac{-E_r(1)}{kT}\right) \right)} \exp\left(-tvS_p(1) \left(p_{i(1)} + p_{0(1)} + N_v \exp\left(\frac{-E_r(1)}{kT}\right) \right)\right) + \frac{p_{i0(2)}}{1 + \frac{vS_p(2)}{qI_L} \left(p_{i(2)} + p_{0(2)} + N_v \exp\left(\frac{-E_r(2)}{kT}\right) \right)} \exp\left(-tvS_p(2) \left(p_{i(2)} + p_{0(2)} + N_v \exp\left(\frac{-E_r(2)}{kT}\right) \right)\right), \quad (4)$$

де p – концентрація дірок; t – час; p_{i0} – рівноважна концентрація захоплених пастками дірок; v – теплова швидкість дірки; S_p – переріз захоплення дірки; q – переріз захоплення фотона; I_L – інтенсивність збуджувального світлового потоку; p_i – концентрація пасток; p_0 – стаціонарна концентрація нерівноважних носіїв заряду; N_v – густина станів у валентній зоні матеріалу; E_r – енергія залягання пастки; k – стала Больцмана; T – температура.

Третій розділ «Структурні та оптичні властивості плівок CZT, одержаних методом вакуумного термічного випаровування у КЗО» присвячено вивченню морфологічних, структурних, субструктурних та оптичних властивостей плівок CZT.

Шляхом термодинамічних розрахунків тиску парів компонент сполуки визначено температури випаровування CdTe та ZnTe, що забезпечують оптимальні умови для одержання гомогенних плівок CZT методом КЗО. Були встановлені оптимальні температурні режими для одержання плівок твердих

розчинів шляхом співвипаровування шихти CdTe та ZnTe з двох незалежних джерел і суміші шихти CdTe та ZnTe.

Установлено, що одержані конденсати були полікристалічними (рис. 1 а, б), росли за стовпчастим механізмом росту (рис. 1 в), мали добру адгезію до підкладки. Показано, що морфологія поверхні шарів залежала від умісту ізовалентної домішки цинку. При збільшенні концентрації цинку до $x \sim 0,5$ відбувалося зниження якості плівок, про що свідчили зменшення розміру зерен та утворення кристалітів неоднорідної форми; при подальшому підвищенні x до значення 0,8 спостерігалось деяке поліпшення якості досліджуваних шарів.

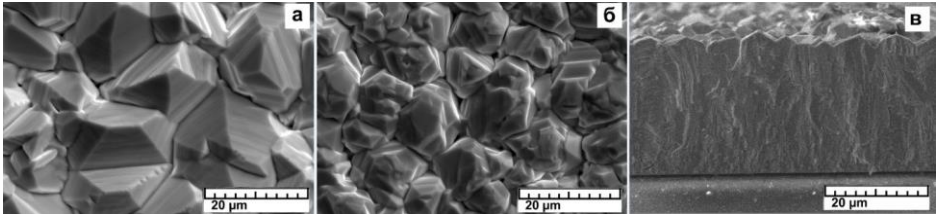


Рисунок 1 – Електронно-мікроскопічні знімки поверхні плівок CZT, одержаних шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe, з $x = 0,10$ (а); $x = 0,48$ (б), та знімок відколу плівки CZT

Аналіз дифрактограм (рис. 2 а) засвідчив, що плівки CZT були однофазними та мали кубічну структуру. За положенням дифракційних піків розраховано період кристалічної ґратки твердого розчину a з різним умістом Zn, що змінювався в інтервалі $a = 0,64483 - 0,61845$ нм. Уточнені значення цього параметра в подальшому були використані для визначення значення x у матеріалі за законом Вегарда. Установлено, що значення x знаходилися в інтервалі 0,09 – 0,77.

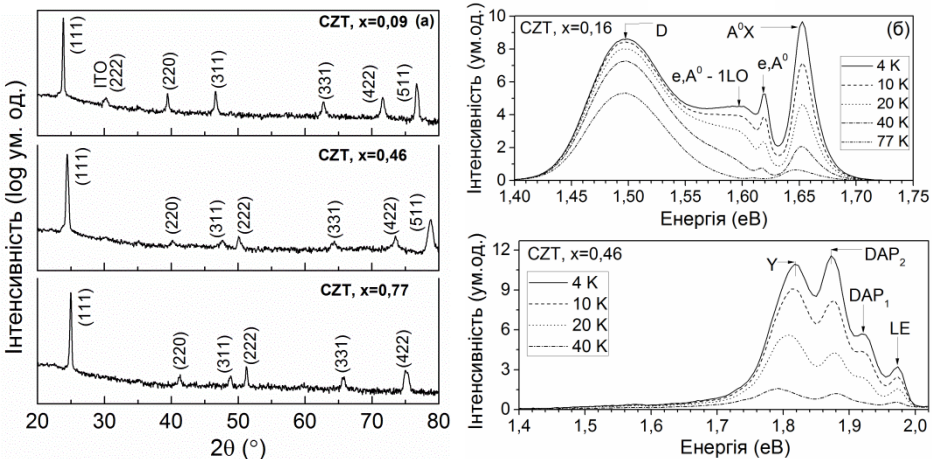


Рисунок 2 – Дифрактограми від плівок CZT, одержаних шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe (а), та спектри ФЛ від плівок CZT, зняті за різної температури (б)

Показано, що значення x , одержані методом РМА та розраховані за параметром кристалічної ґратки матеріалу, дещо відрізняються. Це може бути спричинене деякою неоднорідністю розподілу металів за товщиною плівки, оскільки метод РСА дає інтегральну інформацію про концентрацію Zn в плівці CZT, у той час як метод РМА обмежується глибиною проникнення пучка електронів, що зазвичай становить кілька мікронів.

За значенням півширини дифракційного піку (111) були визначені розмір ОКР та рівень мікродеформацій у плівках CZT.

Установлено, що при збільшенні значення x розмір ОКР у напрямі, перпендикулярному до площини (111) у плівках, змінюється нелінійно, спочатку зменшується з 65 до 41 нм, а потім зростає до 54 нм. Найнижчого значення розмір ОКР досягає за $x \sim 0,5$, що зумовлено максимальним рівнем деформації кристалічної ґратки матеріалу. Рівень мікродеформацій при цьому спочатку зростає від $2,8 \times 10^{-3}$ до $4,4 \times 10^{-3}$, а потім зменшується до $3,2 \times 10^{-3}$. Експериментально визначені значення добре узгоджуються з даними, одержаними для монокристалів та плівок твердих розчинів іншими авторами.

Плівки CZT, нанесені шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe, мали в середньому в 1,4 раза меншу півширину дифракційного піку (111) порівняно з плівками, одержаними шляхом співвипаровування шихти CdTe та ZnTe з двох різних випарників. Це свідчить про кращу кристалічну якість шарів, одержаних шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe.

Аналіз спектрів низькотемпературної ФЛ дозволив установити, що на спектрах зразків з малим значенням x наявні інтенсивні екситонні лінії (рис. 2 б). Це засвідчує високу кристалічну якість матеріалу. Зокрема, в спектрі від плівки CZT з $x = 0,16$ наявна інтенсивна лінія зв'язаного на акцепторі екситона A^0X -лінії, що є характерним для монокристалів A_2B_6 , також у спектрі наявні лінії, обумовлені переходами донорно-акцепторних пар (ДАП) за участі таких залишкових домішок, як Na, Li, P і Ag, та широкі смуги ФЛ, що відповідають D- і Y-смукам, спричиненим точковими і протяжними дефектами (дислокаціями), а також мікронапруженнями в плівках. У спектрі плівки з $x = 0,4$ в області екситонного випромінювання домінуючою є лінія локалізованих екситонів (LE).

Водночас за значень $x > 0,4$ спостерігається зниження оптичної якості твердого розчину: екситонні лінії в спектрах мають низьку інтенсивність, домінуючими за інтенсивністю стають смуги, що відповідають випромінюванню ДАП і Y, пов'язані з наявністю у плівках дислокацій. Зокрема, для шару CZT з $x = 0,67$ має місце сильно неоднорідна структура спектра ФЛ. У цьому разі спектр містить як випромінювання, характерне для майже чистого кристала CdTe, так і інтенсивну D-зону, обумовлену неоднорідним розподілом Zn поблизу поверхні плівки.

У результаті аналізу спектрів ФЛ установлений зв'язок між уширенням екситонних ліній і наявністю мікронапружень в плівках. Із використанням енергетичних положень екситонних ліній побудована концентраційна залежність ширини забороненої зони твердих розчинів CZT. Установлено, що залежність $E_g - x$ апроксимується таким рівнянням:

$$E_g(x) = 1,606 + 0,79 \cdot x \text{ (eV)}. \quad (5)$$

У четвертому розділі «Вивчення фазового складу та розподілу компонент у плівках CZT» досліджено особливості раманівських спектрів полікристалічних плівок CZT та наявність включень вторинних фаз на поверхні та в об'ємі плівок. У цьому розділі наведені результати раманівських досліджень плівок CdTe, ZnTe та CZT. Установлено, що для спектрів від плівок CZT (рис. 3 а), аналогічно до праць інших авторів, була характерною наявність двох основних мод фононних коливань. Найбільшу інтенсивність мав пік моди $LO_2(\text{ZnTe})$, частота якої збільшувалася зі збільшенням x з 177 cm^{-1} за $x = 0,06$ до 197 cm^{-1} за $x = 0,68$. Також на спектрах виявлено пік моди $TO_1(\text{CdTe})$, частота якої також слабо залежала від x .

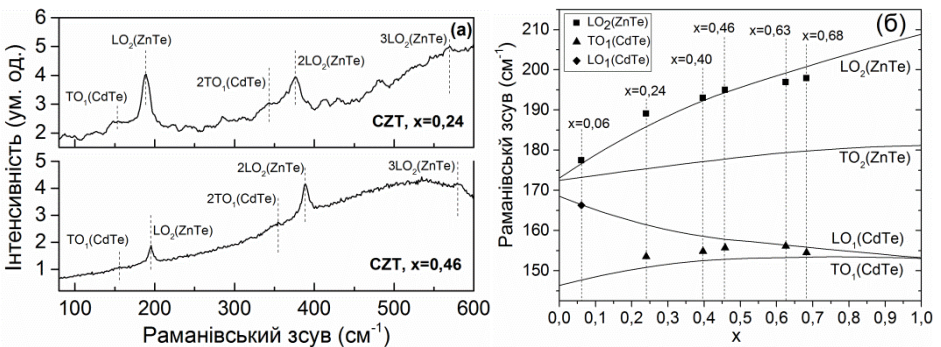


Рисунок 3 – Раманівські спектри плівок CZT, одержані при збудженні лазерним випромінюванням із довжиною хвилі 633 нм (а); залежності частот CdTe- і ZnTe-подібних мод від умісту в значення x . Суцільні лінії – довідкові дані, точки – експериментальні результати для полікристалічних плівок CZT (б)

На спектрі плівки CZT з $x = 0,06$ виявлено також пік на частоті 166 cm^{-1} , що відповідає моді $LO_1(\text{CdTe})$. Водночас у спектрах від досліджуваних шарів спостерігалася деяка невідповідність між частотами мод, що виявлялися, і довідниковими даними, одержаними для монокристалів твердого розчину. Так, одержані значення частоти моди $TO_1(\text{CdTe})$ та $LO_2(\text{ZnTe})$ були приблизно на 3 cm^{-1} більшими від довідникових. Ці відхилення можуть бути спричинені впливом мікронапружень, наявних у кристалічній ґратці матеріалів. Також на раманівських спектрах спостерігалися резонансні повторення мод фононних коливань. А саме на спектрі зразка з $x = 0,06$ були наявні піки мод другого порядку $2LO_1(\text{CdTe})$ і $2LO_2(\text{ZnTe})$, спектри інших зразків містили піки $2TO_1(\text{CdTe})$ та $2LO_2(\text{ZnTe})$. При цьому частота моди $2TO_1(\text{CdTe})$ слабо змінювалася, а частота моди $2LO_2(\text{ZnTe})$ зростала зі збільшенням концентрації цинку аналогічно модам першого порядку $TO_1(\text{CdTe})$ та $LO_2(\text{ZnTe})$. Наявність резонансних повторень на спектрах полікристалічних плівок CZT свідчить про високу якість їх кристалічної структури, що збігається з даними рентгеноструктурного аналізу та ФЛ.

Установлено, що застосування лазера високої потужності для збудження раманівського випромінювання може призвести до збагачення поверхні телуrom та відповідно – до неправильної інтерпретації результатів фазового аналізу плівок. Також показано, що зміна положення мод CdTe та ZnTe на раманівських спектрах досить добре корелює із загальноприйнятою теорією оптичних фононів у твердих розчинах CZT.

За результатами раманівських досліджень для полікристалічних плівок CZT була одержана залежність частот мод фононних коливань від умісту у твердому розчині цинку. Одержана залежність добре корелює з теорією оптичних фононних коливань у CZT, проте виявлені деякі відмінності в значеннях частот мод порівняно з монокристалами, що може бути спричинено впливом мікронапружень кристалічної ґратки, які виникають у полікристалічних плівках твердих розчинів (рис. 3 б).

Вивчення розподілу компонент за поверхнею зразків методом мікро-Рамана дозволило встановити, що плівки є гомогенними за площею, а на їх поверхні відсутні включення вторинних фаз, таких як Te, CdTe чи ZnTe.

Ці результати підтверджені методом мікро-РВІП (рис. 4 а). У результаті аналізу карт розподілу компонент, одержаних цим методом, установлено, що компоненти твердого розчину розподілені рівномірно за площею, крім того, з точнісю методу, не виявлено включень Te, Cd, Zn в об'ємі зразків. Ураховуючи високу просторову роздільну здатність методу мікро-РВІП, що становить 5 мкм, та його високу чутливість, можна зробити висновок про відсутність мікротвочень вторинних фаз.

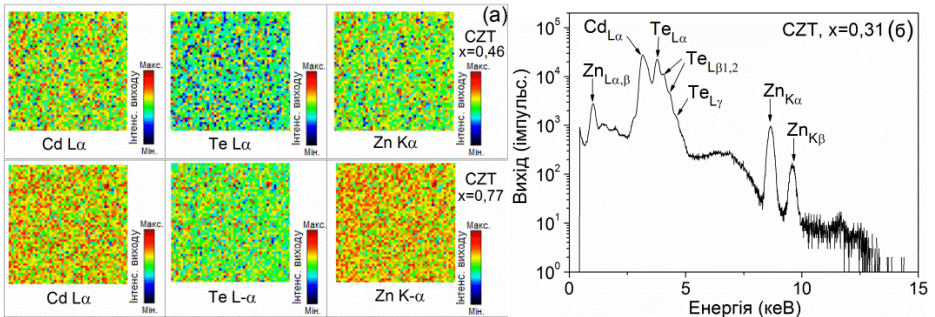


Рисунок 4 – Карти розподілу хімічних елементів у зразках CZT з $x = 0,46$ та $x = 0,77$, одержані методом мікро-РВІП із площі сканування 250×250 мкм 2 та глибини шару близько 11 мкм (а), типовий спектр РВІП від півки CZT (б)

На спектрах рентгенівського випромінювання, індукованого протонами, одержаних з довільних ділянок поверхні півок CZT виявлено лише піки, що відповідають компонентам твердого розчину (рис. 4 б). Значення атомних концентрацій компонент, одержані за даними РВІП, добре корелюють з результатами, одержаними методами РСА та РМА (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Результати визначення елементного складу плівок CZT методами РМА, РСА та РВП

Номер зразка	РМА				РСА				РВП			
	Концентрація, ат.%			x	Концентрація, ат.%			x	Концентрація, ат.%			x
	Cd	Zn	Te		Cd	Zn	Te		Cd	Zn	Te	
1	33,8	21,3	44,9	0,39	34,5	15,5	50	0,31	31,3	18	50,7	0,37
2	28,3	26,2	45,5	0,48	27	23	50	0,46	26,9	22,7	50,4	0,46
3	19,3	34,4	46,3	0,64	17,5	32,5	50	0,65	15,9	33,8	50,3	0,68
4	12,0	42,7	45,3	0,78	11,5	38,5	50	0,77	9,9	39,8	50,3	0,80

Таким чином, у результаті комплексного дослідження структурних та оптичних характеристик полікристалічних плівок CZT установлено, що одержані плівки є однофазними, містять у своєму складі лише компоненти твердого розчину і мають високу структурну та оптичну якість. При цьому плівки CZT, нанесені шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe, були більш структурно досконалими, ніж шари, одержані шляхом співвипаровування шихти CdTe та ZnTe із двох різних випарників.

У п'ятому розділі «Електрофізичні властивості плівок CZT» наведено результати вивчення основних електрофізичних властивостей та фотовідклику прототипів детекторів жорсткого випромінювання, створених на основі плівок CZT. Проведено вимірювання темнових та світлових вольт-амперних характеристик сандвіч-структур ІТО/CZT/Au (рис. 5). Визначено, що питомий опір шарів CZT зростає зі збільшенням вмісту цинку в матеріалі з $x = 0,09$ до $x = 0,46$, змінюючись при цьому від $2,0 \times 10^8$ до $6,5 \times 10^9$ Ом·см відповідно.

Установлено, що приладові структури на основі плівок CZT є фоточутливими до світлового випромінювання видимого діапазону. При цьому відношення густини струму при освітленні до темної густини струму зростало зі збільшенням вмісту цинку в плівках, що свідчить про підвищення їх фоточутливості.

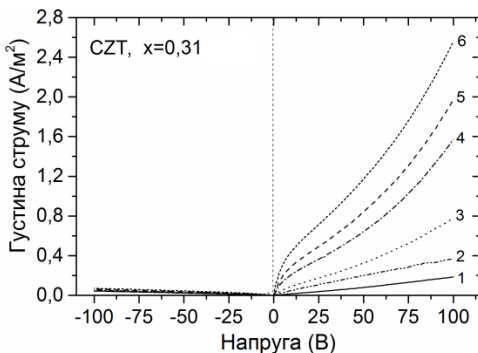


Рисунок 5 – Типові характеристики «напруга – густина струму» детекторів на основі сандвіч-структур ІТО/CZT/Au у темноті та при освітленні білим світлом з різною потужністю P_L : темнові умови (1), $3,5 \text{ мВ/см}^2$ (2), $5,7 \text{ мВ/см}^2$ (3), $29,9 \text{ мВ/см}^2$ (4), $53,7 \text{ мВ/см}^2$ (5), $91,9 \text{ мВ/см}^2$ (6)

Оцінка фоточутливості детекторів на основі плівок CZT, проводилася за значенням R_J , що відповідає відношенню світлової J_{light} до темної J_{dark} густини струму ($R_J = J_{light}/J_{dark}$). Значення R_J , розраховані для ряду значень напруги зміщення та потужності світлового випромінювання, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Фоточутливість детекторів на основі плівок CZT

CZT, $x = 0,09$					
Параметр	R_J				
Напруга зміщення, В	$P_L = 3,5$ мВ/см ²	$P_L = 5,7$ мВ/см ²	$P_L = 29,9$ мВ/см ²	$P_L = 53,7$ мВ/см ²	$P_L = 91,9$ мВ/см ²
25	1,7	2,6	6,1	8,2	10,2
50	1,6	2,5	6,0	8,1	10,0
75	1,6	2,4	6,0	8,1	10,2
100	1,6	2,3	5,6	7,6	9,7
CZT, $x = 0,31$					
25	2,9	4,7	9,8	13,2	19,1
50	2,6	4,1	8,2	10,7	15,0
75	2,2	4,0	7,8	10,0	13,5
100	2,0	4,2	8,5	10,7	13,9
CZT, $x = 0,46$					
25	2,4	3,1	5,2	6,9	8,1
50	2,8	4,1	7,3	9,4	11,7
75	3,2	5,0	10,5	13,4	17,0
100	3,5	5,7	14,4	18,4	23,4

У подальшому на основі товстих полікристалічних плівок CZT із різним вмістом цинку виготовлено прототипи рентгенівських детекторів (рис. 6 а) та проведено дослідження їх відклику на радіаційне випромінювання. Установлено, що створені детектори є чутливими до жорсткої радіації. Найвищу чутливість показала детекторна структура на основі плівки CZT з $x = 0,09$ (рис. 6 в), сила струму детектора під час дії радіаційного випромінювання з енергією 59,32 кеВ становила $I_{expos} = 2,83 \times 10^{-6}$ А, за відсутності випромінювання $I_{dark} = 2,48 \times 10^{-6}$ А.

З метою визначення параметрів рекомбінаційних центрів, що впливають на робочі характеристики детектора, проведено вивчення часових характеристик фотовідклику детекторів, одержаних при опроміненні зразків пульсуючим випромінюванням білого світлодіода (рис. 7 а). З аналізу часових діаграм фотовідклику, розраховано рухливість дірок у напівпровідниковому матеріалі. Установлено, що вона зменшувалася зі збільшенням вмісту цинку в плівках із $\mu_h = 0,0231$ см²/В×с ($x = 0,09$) до $\mu_h = 0,0061$ см²/В×с ($x = 0,46$).

Запропоновано модель, що описує процеси спаду фотоструму та базується на припущенні про існування в матеріалі одного та двох видів рекомбінаційних центрів із різними параметрами (рис. 7 б). Подальший аналіз засвідчив, що більш точно описує експериментальні дані модель, яка передбачає наявність у матеріалі двох рекомбінаційних центрів.

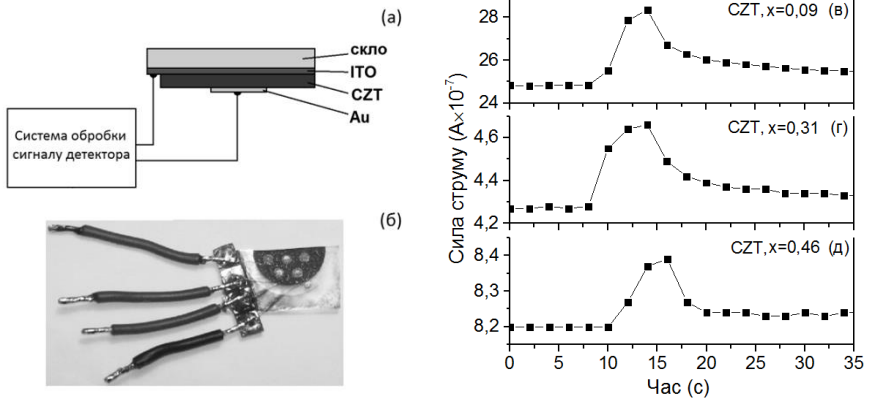


Рисунок 6 – Конструкція детектора жорсткого випромінювання на основі товстих плівок CZT (а), зовнішній вигляд виготовленого прототипу детектора (б), часові діаграми відклику на радіаційне випромінювання для детекторів на основі товстих полікристалічних плівок CZT (в – д)

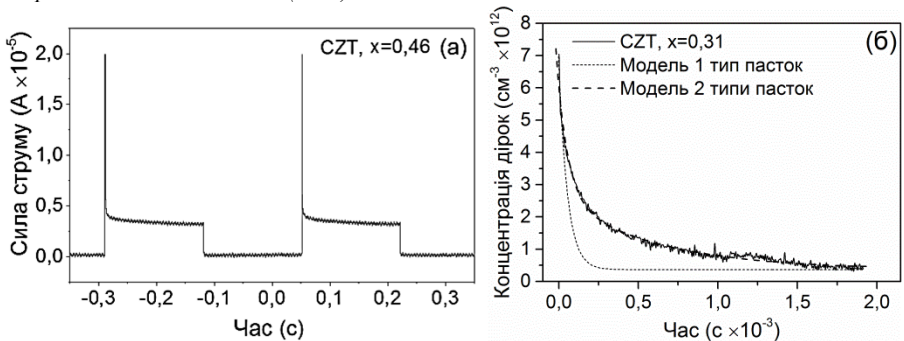


Рисунок 7 – Часова діаграма фотовідклику детектора на основі зразка CZT з $x = 0,46$ (а), та модель часової залежності концентрації вільних дірок після вимкнення збуджувального випромінювання у разі рекомбінації носіїв заряду на пастках одного типу (коротка пунктирна лінія), на пастках двох типів (довга пунктирна лінія). Суцільна лінія – експериментальні дані для зразка CZT (б)

Шляхом моделювання фізичних процесів проходження струму в напівпровіднику визначені основні характеристики глибоких центрів, що обумовлюють рекомбінацію нерівноважних дірок. Установлено, що в зразку з низьким умістом цинку ($x = 0,09$) час життя нерівноважних носіїв заряду визначається наявністю рекомбінаційних центрів із такими параметрами: $E_{r1} = 0,45$ еВ, $S_{p1} = 1,30 \times 10^{-18}$ см², $E_{r2} = 0,18$ еВ, $S_{p2} = 5,48 \times 10^{-19}$ см². У зразку з вищим умістом цинку ($x = 0,46$) рекомбінаційні процеси визначаються глибокими центрами з параметрами: $E_{r1} = 0,44$ еВ, $S_{p1} = 5,43 \times 10^{-18}$ см², $E_{r2} = 0,27$ еВ, $S_{p2} = 2,08 \times 10^{-18}$ см². Згідно з літературними даними, мілкі та глибокі центри можуть бути пов'язані з вакансіями в підґратці металів та міжвузловими атомами телуру відповідно.

ВИСНОВКИ

Проведені в дисертації дослідження дали можливість сформулювати такі узагальнювальні висновки.

1. Установлено, що плівки, нанесені шляхом випаровування суміші шихти CdTe та ZnTe з одного випарника, є більш структурно досконалішими, ніж шари, одержані шляхом співвипаровування шихти CdTe та ZnTe з двох різних випарників. Показано, що формування зерен шарів CZT відбувалося за стовпчастим механізмом росту. Вивчення морфології поверхні зразків показало, що середній розмір зерен залежав від вмісту цинку в матеріалі. Для плівок з $x < 0,4$ він становив близько $D = 20$ мкм, при збільшенні вмісту цинку до $x \sim 0,8$ розмір зерна зменшувався до значення $D = 3,5$ мкм. При вмісті цинку у твердому розчині в діапазоні $x \sim 0,5 - 0,6$ спостерігалася деградація структури плівок, при цьому зерна набували неоднорідної форми та розміру.

2. У результаті дослідження плівок методом рентгенодифракційного аналізу було встановлено, що:

– в усьому діапазоні вмісту цинку x плівки CZT мають кубічну структуру з періодом кристалічної ґратки, що змінювався в інтервалі з 0,64483 нм ($x = 0,09$) до 0,61845 нм ($x = 0,77$);

– встановлено, що залежність розміру ОКР від значення x має форму параболи з мінімумом при $x = 0,5$. Зі збільшенням умісту цинку в плівках розмір ОКР зменшується з 65 нм ($x = 0,09$) до 41 нм ($x = 0,46$), а потім зростає до 54 нм ($x = 0,77$). Рівень мікрдеформацій при цьому спочатку зростає з $2,8 \times 10^{-3}$ ($x = 0,09$) до $4,4 \times 10^{-3}$ ($x = 0,46$), а потім зменшується до $3,2 \times 10^{-3}$ ($x = 0,77$), що відповідає параболічній залежності якості кристалічної структури від значення x , відомій із літератури.

3. Методом низькотемпературної фотолюмінесценції було встановлено, що плівки CZT мають високу хімічну чистоту. Наявність інтенсивних екситонних ліній на спектрах плівок із низьким умістом цинку ($x < 0,4$) свідчить про високу оптичну якість цих плівок. На спектрах плівок з умістом цинку $x > 0,4$ були наявні широкі смуги, спричинені впливом мікрдеформацій та структурних дефектів, що свідчить про погіршення оптичної якості плівок. У результаті дослідження спектрів ФЛ також одержано залежність ширини забороненої зони твердого розчину від умісту цинку в конденсатах.

4. Дослідження методом раманівської спектроскопії засвідчили, що на спектрах плівок із різною концентрацією цинку виявляються лише піки, які відповідають CdTe- та ZnTe-подібним LO- та TO-модам, та їх фононні повторення. Наявність на спектрах фононних повторень LO- та TO-мод підтверджує висновок структурних досліджень та ФЛ про високу кристалічну якість плівок. Одержано залежність частот мод фононних коливань у полікристалічних плівках CZT від значення вмісту цинку x . Виявлено вплив мікронапружень у шарах на зміщення положення мод порівняно з їх положенням для монокристалічного матеріалу; методами мікро-Рамана та мікро-РВІП встановлено, що на поверхні в об'ємі плівок CZT розподіл компонент твердого розчину є рівномірним, а включення вторинних фаз, таких як Te, Cd, Zn, CdTe,

ZnTe, відсутні. Цей результат якісно узгоджується з даними, одержаними методом РСА.

5. На основі товстих плівок CZT створено прототипи детекторів жорсткого випромінювання зі структурою ІТО/CZT/Au та проведено дослідження їх електрофізичних властивостей, при цьому:

- встановлено, що на межі поділу шарів CZT та Au формується омичний контакт, однак ВАХ структури ІТО/CZT/Au має нелінійний характер, що спричинено виникненням бар'єра на межі розділення шарів CZT та ІТО;

- визначено, що питомий опір плівок зростає зі збільшенням значення x і становить $\rho = 2,0 \times 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($x = 0,09$), $\rho = 4,0 \times 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($x = 0,31$), $\rho = 6,5 \times 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($x = 0,46$); вимірювання світлових ВАХ багат шарових структур засвідчило, що плівки CZT є чутливими до світлового випромінювання видимого діапазону;

- встановлено, що фоточутливість плівок зі збільшенням у них вмісту цинку від $x = 0,09$ до $x = 0,46$ зростала, про що свідчить збільшення відношення густини струму при освітленні до густини темного струму від 9,7 до 23,4 раза;

- вивчено часові характеристики фотовідклику детекторів на основі плівок CZT, розраховано рухливість дірок, що зменшувалася зі збільшенням вмісту цинку в плівках із $\mu_h = 0,0231 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ($x = 0,09$) до $\mu_h = 0,0061 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ($x = 0,46$); у результаті чисельного моделювання часової залежності концентрації вільних носіїв заряду після вимкнення збуджувального світлового випромінювання встановлено, що процеси рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в детекторах визначаються наявністю глибоких центрів із такими параметрами: $E_{r1} = 0,45 \text{ еВ}$, $S_{p1} = 1,30 \times 10^{-18} \text{ см}^2$, $E_{r2} = 0,18 \text{ еВ}$, $S_{p2} = 5,48 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ – у плівці з вмістом цинку $x = 0,09$; $E_{r1} = 0,44 \text{ еВ}$, $S_{p1} = 5,43 \times 10^{-18} \text{ см}^2$, $E_{r2} = 0,27 \text{ еВ}$, $S_{p2} = 2,08 \times 10^{-18}$ – у плівках з вмістом цинку $x = 0,31$ та $x = 0,46$.

6. У результаті комплексного дослідження структурних, оптичних та електрофізичних властивостей полікристалічних плівок CZT встановлено, що метод вакуумного термічного випаровування в КЗО дозволяє одержати плівки твердих розчинів із високою кристалічною якістю, контрольованим елементним складом, рівномірним розподілом компонентів в об'ємі та на поверхні плівок. На основі таких шарів з вмістом цинку до $x \sim 0,5$ створено та досліджено детекторні структури, встановлено, що вони є чутливими до радіаційного випромінювання. Показано, що дослідження фоточутливості плівок CZT може бути використане для оцінювання придатності їх використання як матеріалу для виготовлення детекторів радіаційного випромінювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Photoluminescence of CdZnTe thick films obtained by close-spaced vacuum sublimation / V. Kosyak, **Y. Znamenshchykov**, A. Čerškus et al. // Journal of Luminescence. – 2016. – Vol. 171. – P. 176–182.

2. Structural and microstructural properties of Cd_{1-x}Zn_xTe films deposited by close spaced vacuum sublimation / **Y. V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A.S. Opanasyuk et al. // Functional Materials. – 2016. – Vol. 23, No. 1. – P. 32 – 39.

3. Composition dependence of structural and optical properties of Cd_{1-x}Zn_xTe thick films obtained by the close-spaced sublimation / V. Kosyak, **Y. Znamenshchykov**, A. Čerškus et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 682. – P. 543–551.

4. The surface morphology, structural properties and chemical composition of Cd_{1-x}Zn_xTe polycrystalline thick films deposited by close spaced vacuum sublimation / **Y. V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A. S. Opanasyuk et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2017. – Vol. 63. – P. 64–71.

5. Raman characterisation of Cd_{1-x}Zn_xTe thick polycrystalline films obtained by the close-spaced sublimation / **Y. V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A.S. Opanasyuk et al. // Acta Physica Polonica A. – 2017. – Vol. 132, No. 4. – P. 1430–1435.

6. Electrical, structural and optical properties of Cd_{1-x}Zn_xTe thick polycrystalline films / **Y.V. Znamenshchykov**, V.V. Kosyak, O.K. Kononov et al. // Vacuum. – 2018. – Vol. 149. – P. 270–278.

2. Наукові праці апробаційного характеру

7. Знаменщиков Я. В. Одержання плівок CdZnTe зі змінною концентрацією цинку / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2014) (Суми, 21–26 квітня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 135.

8. Знаменщиков Я. В. Склад плівок Cd_xZn_{1-x}Te одержаних методом співвипаровування компонентів / **Я. Знаменщиков**, В. Косяк, А. Опанасюк // Матеріали Міжнародної конференції студентів та молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики «Єврика-2014» (Львів, 15-17 травня 2014 р.). – Львів, 2014. – С. 89.

9. Effect of substrate temperature on the structural properties of Cd_xZn_{1-x}Te films grown by close-spaced sublimation method / **Y. V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A. S. Opanasyuk et al. // Proceedings of the 4th International Conferences «Nanomaterials: Applications and Properties» (Lviv, 21–27 September 2014). – Sumy, 2014. – Vol. 3, № 1. – P. 01NTF24 (4 pp).

10. Структурні та субструктурні характеристики плівок Cd_{1-x}Zn_xTe зі змінною концентрацією цинку / Я. І. Шергін, **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк та ін. // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2015) (Суми, 20–25 квітня 2015 р.). – Суми, 2015. – С. 167.

11. Energy dispersive X-ray analysis of the graded band gap CdZnTe films / L. Grase, **Ya. Znamenshchykov**, V. Kosyak et al. // Abstracts of The 14th

International Conference on Global Research and Education (Hamamatsu, Japan, 28–30 September, 2015). – Hamamatsu, Japan, 2015. – P. 156–157.

12. Структурні, субструктурні та електрофізичні властивості плівок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ зі змінною концентрацією цинку / **Знаменщиков Я.В.**, Косяк В.В., Опанасюк А.С., Фочук П.М. // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2015» (Київ, 1–3 квітня 2015 р.). – Київ, 2015. – С. 83.

13. Effect of laser annealing on the properties of the surface of polycrystalline CdZnTe thick film / **Y. V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A. S. Opanasyuk, P. M. Fochuk // Proceedings of the 5th International Conferences «Nanomaterials: Applications and Properties» (Lviv, 21–27 September 2015). – Sumy, 2015. – Vol. 4, № 1. – P. 01NTF16 (4 pp).

14. Znamenshchykov Y.V. Influence of zinc concentration on structural and optical properties of polycrystalline CZT thick films obtained by the close spaced sublimation / **Y.V. Znamenshchykov**, V. V. Kosyak, A. S. Opanasyuk // Conference Program & Book of Abstracts of the VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics» (Kharkiv, 6–10 June 2016). – Kharkiv, 2016. – P. 93.

15. Знаменщиков Я. В. Дослідження фотодетекторних властивостей полікристалічних плівок CZT / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, А. С. Опанасюк // Тези доповідей 7-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-7) (Одеса, 30 травня – 3 червня 2016 р.). – Одеса, 2016. – С. 81.

16. Електрофізичні та детекторні властивості плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, А. С. Опанасюк, О. К. Кононов // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2016» (Київ, 6–8 квітня 2016 р.). – Київ, 2016. – С. 93.

17. Дослідження раманівських спектрів полікристалічних плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, А. С. Опанасюк, М. М. Колесник // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів на тему «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи» (Луцьк, 28–29 жовтня 2016 р.). – Луцьк, 2016. – С. 26–28.

18. Structural and optical properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ thick films with high Zn concentrations / **Y.V. Znamenshchykov**, V.V. Kosyak, A.S. Opanasyuk et al. // Proceeding of the 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017), (Zatoka, Ukraine, 10–15 September 2017). – Sumy, 2017. – P. 02MAN05-1–02MAN05-4.

19. Знаменщиков Я. В. Дослідження фазового складу поверхні полікристалічних плівок $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ методом мікро-раман / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, А. С. Опанасюк // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2017» (Київ, 5–7 квітня 2017 р.). – Київ, 2017. – С. 60–61.

20. Знаменщиков Я. В. Фоточутливі плівки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ для детекторів жорсткого випромінювання / **Я. В. Знаменщиков**, Б. Ю. Курінський, А. С. Опанасюк // Матеріали та програма науково-технічної конференції

«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2018) (Суми, 5–9 лютого 2018 р.). – Суми, 2018. – С. 98.

21. Фотодетекторні структури на базі товстих полікристалічних плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, Я. І. Шергін, А. С. Опанасюк // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2018» (Київ, 4–6 квітня 2018 р.). – Київ, 2018. – С. 24.

22. Фоточутливі структури на базі товстих полікристалічних плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ / **Я. В. Знаменщиков**, В. В. Косяк, Я. І. Шергін, А. С. Опанасюк // Тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-8) (Одеса, 28 травня – 1 червня 2018 р.). – Одеса, 2018. – С. 133.

АНОТАЦІЯ

Знаменщиков Я. В. Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та приладові структури на їх основі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2019.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню структурних, електрофізичних та оптичних властивостей полікристалічних плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (CZT) для використання в детекторах радіаційного випромінювання, встановленню впливу елементного складу на фізичні властивості плівок, визначенню параметрів основних пасткових центрів, що впливають на проходження струму в матеріалі.

Установлені взаємозв'язки між елементним складом плівок CZT та їх структурними, субструктурними, оптичними, електричними властивостями можуть бути використані для подальшого створення детекторів радіаційного випромінювання та інших приладів оптоелектроніки.

Створено прототипи чутливих до радіаційного випромінювання детекторів на основі товстих плівок CZT. Показано, що вимірювання фоточутливості може бути використане для оцінювання детекторних властивостей полікристалічних плівок CZT з метою подальшого їх використання як детекторів радіації.

Уперше проведено моделювання процесу рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в детекторних структурах на основі плівок твердих розчинів. У результаті моделювання визначено параметри основних пасткових центрів, що впливають на проходження електричного струму в матеріалі.

Ключові слова: детектори радіаційного випромінювання, напівпровідники, плівки, структура, $Cd_{1-x}Zn_xTe$, оптичні властивості, електрофізичні властивості, елементний склад.

АННОТАЦИЯ

Знаменщиков Я. В. Структурные, электрофизические и оптические свойства пленок CdZnTe и приборные структуры на их основе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2019.

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию структурных, электрофизических и оптических свойств поликристаллических пленок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (CZT) для использования в детекторах радиационного излучения, изучению влияния элементного состава на физические свойства пленок, определению параметров основных ловушечных центров, влияющих на протекание тока в материале.

Установленные взаимосвязи между элементным составом пленок CZT и их структурными, субструктурными, оптическими, электрическими свойствами могут быть использованы для дальнейшего создания детекторов радиационного излучения и других приборов оптоэлектроники.

Изготовлены прототипы чувствительных к радиационному излучению детекторов на основе толстых пленок CZT. Показано, что возбуждающее световое излучение видимого диапазона может быть использовано для оценки детекторных свойств поликристаллических пленок CZT с целью дальнейшего их использования в качестве детекторов радиации.

Впервые проведено моделирование процесса рекомбинации неравновесных носителей заряда в детекторных структурах на основе пленок CZT. В результате моделирования были определены параметры доминирующих ловушечных центров, влияющих на протекание электрического тока в материале.

Ключевые слова: детекторы радиационного излучения, полупроводники, пленки, структура, $Cd_{1-x}Zn_xTe$, оптические свойства, электрофизические свойства, элементный состав.

SUMMARY

Znamenshchykov Ya. V. Structural, electrophysical and optical properties of CdZnTe films and device structures based on them. – Manuscript.

PhD thesis submitted for the degree of a candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2019.

The PhD thesis is devoted to the complex study of structural, electrophysical and optical properties of polycrystalline $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (CZT) films for application in radiation detectors, determination of the chemical composition effect on physical properties of the films, determination of the parameters of free-carriers trap centers influencing the current flow in the material.

The established relationships between the chemical elemental composition of CZT films and their structural, microstructural, optical, and electrical properties can be

used for the further development of radiation detectors and other optoelectronic devices.

The prototypes of radiation detectors based on thick CZT polycrystalline films have been manufactured. The modeling of the recombination process of nonequilibrium charge carriers in detector structures based on CZT films was carried out for the first time. As a result of modeling, the parameters of the main trap centers, which influence the flow of electric current in the material, have been determined.

Key words: radiation detectors, semiconductors, films, structure, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, optical properties, electrophysical properties, elementary composition.

Підписано до друку 23.04.2019.

Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 346

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.