

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ОЛІЙНИК Сергій Володимирович



УДК 537.226 : 621.315.592

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ А^{IV}В^{VI}
І ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ЛЬВІВ – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ЧУГАЙ Олег Миколайович,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» МОН України,
професор кафедри фізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, с.н.с.
ЛИТВИНЕНКО Володимир Вікторович,
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,
директор;

доктор технічних наук, професор
ХРИПУНОВ Геннадій Семенович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» МОН України,
проректор з науково-педагогічної роботи;

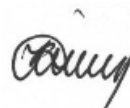
доктор фізико-математичних наук, професор
МАЛИНИЧ Сергій Захарович,
Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного МО України,
професор кафедри електромеханіки та електроніки.

Захист відбудеться **«30» листопада 2023 р. о 16⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, аудиторія 226.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Реферат розісланий **«27»** жовтня 2023 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.13
доктор технічних наук, професор



Г.І. Клим

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Впродовж останніх десятиліть спостерігаються два головних напрямки використання кристалів $A^{II}B^{VI}$. Перший напрямок пов'язаний з одержанням *однорідних* за складом кристалів з якомога меншою концентрацією дефектів та домішок без залишкових механічних напружень. Зазначимо для прикладу, що найкращою енергетичною роздільною здатністю володіють спектрометри гама-випромінювання, виготовлені з кристалів з найнижчою концентрацією власних дефектів та домішок. Другий напрямок використання кристалів навпаки передбачає створення на їхній основі систем, *неоднорідних* за складом, які володіють специфічним набором дефектів структури. Головна привабливість таких систем полягає в унікальності фізичних властивостей, зокрема електрофізичних та фотоелектричних. І перший і другий напрямки потребує *розробки фізико-технічних основ формування електрофізичних та фотоелектричних властивостей* кристалів $A^{II}B^{VI}$, що, в першу чергу, обумовлено складністю їх дефектної структури.

Численні дослідження свідчать про те, що в кристалах $A^{II}B^{VI}$ містяться різноманітні дефекти структури, починаючи з точкових і завершуючи об'ємними. Суттєво, що дефекти структури породжують електричне та пружне поля. Проблема впливу дефектів структури на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів $A^{II}B^{VI}$ ускладнюється не лише існуванням численних механізмів впливу, але і тим, що тип домінуючих дефектів визначається не тільки складом кристала та фонових домішок, а ще й умовами вирощування кристала та його передісторією. Крім того, важливо, що дефекти різних типів взаємодіють між собою та зазвичай *неоднорідно розподілені* в об'ємі кристала.

Більша кількість компонентів в складі твердих розчинів $A^{II}B^{VI}$ має своїм наслідком збільшення різноманіття точкових дефектів їхньої будови та виникнення неоднорідностей складу, що чинять свій вплив на електричні та фотоелектричні властивості. До того ж для твердих розчинів типове утворення нових фаз, наприклад включень телуру в кристалах телуриду кадмію-цинку.

Таким чином, є підстави вважати *кристали $A^{II}B^{VI}$ своєрідними неоднорідними системами*, які мають значний потенціал для широкого спектра практичних застосувань у електронній техніці. Все зазначене зумовлює актуальність проблеми формування електрофізичних та фотоелектричних властивостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ як в процесі їх роста, так і шляхом різноманітних обробок після кристалізації.

Подібно кристалам $A^{II}B^{VI}$, покриття WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Nf, що знаходять практичне застосування для підвищення зносостійкості деталей та інструментів в машинобудуванні, *створюються у суттєво нерівноважних умовах* іонно-плазмовим та вакуумно-дуговим методом, відповідно. Такі процеси пов'язані з неконтрольованим впливом фонових домішок та потоку іонів поблизу підкладки, що призводить до неоднорідності параметрів структури, морфології, механічних властивостей

створюваного покриття. Крім того, електричні властивості покриттів WC і Ti-V-Zr-Nb-Hf, які, очевидно, корелюють з їх механічними властивостями, мало досліджені. З цього випливає, що проблема *формування електричних властивостей покриттів WC і Ti-V-Zr-Nb-Hf* зазначеними методами є актуальною.

Таким чином, дана робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми фізики твердого тіла а саме розробленню фізичних основ формування електричних та фотоелектричних властивостей високоомних кристалів $A^{II}B^{VI}$, а також електричних властивостей покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у ході виконання держбюджетних НДР: «Фізичні властивості кристалів типу CdZnTe з просторово впорядкованими змінами складу» (номер держреєстрації 0110U008144, 2011 – 2013); «Отримання та комплексне дослідження текстурованих композиційних матеріалів на основі мікрокристалічних fotocутливих та сцинтиляційних халькогенідів цинку» (номер держреєстрації 0115U004883, 2013 – 2015); «Фізико-технічні основи формування багатокомпонентних, наноструктурованих функціональних покриттів» (номер держреєстрації 0118U003840, 2018 – 2020); «Дефектно-домішкові стани кристалів $A^{II}B^{VI}$: вплив термообробки і легування на електрофізичні та фотоелектричні властивості» (номер держреєстрації 0117U005435, 2018 – 2020); «Розроблення методів синтезу багатокомпонентних покриттів на основі високоентропійних сплавів шляхом розпорошення множини окремих компонентів» (номер держреєстрації 0121U112197, 2021 – 2022).

У зазначених НДР автор був виконавцем, займався постановкою завдань досліджень, розробкою методики їх вирішень, а також обговоренням отриманих результатів та написанням звітів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є *розроблення фізичних основ формування електричних та фотоелектричних властивостей* високоомних кристалів $A^{II}B^{VI}$, а також електричних властивостей покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf. Для досягнення цієї мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- 1) розробити комплекс *нових методів дослідження* призначених для розроблення технологій приготування високоомних кристалів $A^{II}B^{VI}$, що забезпечують визначення питомого електроопору з урахуванням діелектричної дисперсії та встановлення розширеного спектру енергій локалізованих станів,
- 2) визначити *закономірності розподілу* електричних і фотодіелектричних властивостей в кристалічних злитках ZnSe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$, а також встановити *експлуатаційні критерії стабільності* характеристик сенсорів іонізуючого випромінювання, виготовлених з зазначених зливків,

3) виявити *глибокі локалізовані стани* та визначити положення їх рівнів в забороненій зоні кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, використовуючи модифікацію метода скануючої фотодіелектричної спектроскопії,

4) встановити *закономірності впливу легуючих атомів* на діелектричні властивості кристалів з огляду покращення їх електрофізичних властивостей для застосування в якості сенсорів електромагнітного випромінювання: Cr концентрацією $(1,5 \dots 3,2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ на властивості ZnSe та Bi концентрацією $10^{-3} \text{ мас.}\%$ на властивості CdWO_4 ,

5) встановити *закономірності впливу високотемпературного відпалу* у атмосфері водню на діелектричні властивості кристалів CdWO_4 ,

6) встановити вплив на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів ZnSe і $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ *механічної обробки* поліруванням, шліфуванням та зосередженим деформуванням,

7) встановити *закономірності впливу* на електричні та фотоелектричні властивості кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, ZnSe, а також композитів на їхній основі наступних чинників: *білого світла* інтенсивністю 10 – 100 мВт/см², *рентгенівського випромінювання* $\text{CuK}_{\alpha 1}$ потужністю дози 200 мР/год, *НВЧ випромінювання* частоти 2,45 ГГц та середньої потужності 100 Вт, *гамма випромінювання* ізотопу ⁶⁰Co з ультрамалою (0 – 60 Р) експозиційною дозою,

8) визначити *розподіл електроопору* вздовж зразків плівок WC, одержаних іонно-плазмовим методом, та високоентропійних сплавів Ti-V-Zr-Nb-Hf, одержаних вакуумно-дуговим методом і *встановити кореляцію* даного розподілу з особливостями структури, морфології поверхні, складу таких плівок.

Об'єкт досліджень: процеси поляризації і електропровідності в змінному електричному полі кристалів $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, а також багатокомпонентних карбідних і нітридних покриттів.

Предмет досліджень: закономірності процесів поляризації і електропровідності в змінному електричному полі, що обумовлюють електричні та фотоелектричні властивості високоомних кристалів $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, а також покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf.

Методи дослідження: оптико-поляризаційної і електронної мікроскопії для дослідження дефектної структури; скануючої електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом, енергодисперсійний метод, атомно-абсорбційної спектроскопії для визначення складу матеріалу; діелектричної спектроскопії, скануючої фотодіелектричної спектроскопії, безконтактного вимірювання питомого електроопору з урахуванням впливу діелектричної дисперсії, термостимульованих струмів, термостимульованої люмінесценції, фотопровідності, математичного моделювання, вейвлет-аналізу для дослідження електрофізичних і фотоелектричних властивостей.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації розроблено фізичні основи формування електричних та фотоелектричних властивостей високоомних кристалів $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, а також електричних властивостей покриттів WC

і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf. Наукова новизна результатів, одержаних при виконанні дисертаційних досліджень полягає у наступному:

1. Розроблено новий метод вимірювання в змінному електричному полі питомого електроопору високоомних матеріалів з урахуванням дисперсії комплексної діелектричної проникності та модифікацію метода скануючої фотодіелектричної спектроскопії, що забезпечує визначення енергетичного положення локалізованих станів носіїв заряду в розширеному на 0,1 eV інтервалі енергій.

2. Вперше встановлено та надано пояснення закономірним змінам дійсної та уявної частин низькочастотної діелектричної проникності в межах усього об'єму кристалічних зливків $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$. Аномально великі значення діелектричної проникності свідчать щодо нерівноважного стану системи електрично активних точкових дефектів таких кристалів. Останнє обумовлює необоротні зміни електрофізичних властивостей кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$ під дією зовнішніх чинників. Дану закономірність запропоновано використовувати для визначення експлуатаційної стабільності характеристик сенсорів іонізуючого випромінювання, виготовлених із зливків $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$.

3. Вперше встановлено, що введення в кристали $ZnSe$ легуючих атомів Cr з концентрацією 10^{18} см^{-3} суттєво покращує діелектричні характеристики цих матеріалів, зокрема покращує просторову однорідність складових низькочастотної діелектричної проникності при одночасному зниженню рівня дисипації енергії поля на $\approx (80 - 90)\%$.

4. Вперше встановлено, що легування кристалів $CdWO_4$ атомами Vi ($10^{-3} \text{ мас.}\%$) так само як і високотемпературний відпал в водневій атмосфері зумовлює збільшення їх діелектричної проникності в 15 разів і коефіцієнта діелектричних втрат в (40 – 500) разів в низькочастотній області.

5. Вперше показано, що збільшення концентрації приповерхневих локалізованих станів носіїв заряду шляхом створення композитів на основі кристалітів $A^{II}B^{VI}$ та діелектричної матриці забезпечує керовану зміну як частотних, так і спектральних характеристик фотодіелектричного ефекту в матеріалах при дії світла або рентгенівського випромінювання. Керування концентрацією приповерхневих локалізованих станів носіїв заряду забезпечується зміною розмірів або електропровідності кристалітів $A^{II}B^{VI}$.

6. Вперше встановлено, що дія ультрамалих експозиційних доз гама-випромінювання (10 – 40 Р) забезпечує стабілізацію дійсної та уявної частин діелектричної проникності кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ в низькочастотній області.

7. Вперше експериментально показано, що створення суттєво нерівноважного стану власних дефектів структури внаслідок відхилення складу від стехіометричного зумовлює чутливість комплексної діелектричної проникності кристалів типу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ до гама-випромінювання з малою експозиційною потужністю дози 700 мкР/годину.

8. Вперше експериментально встановлено, що макроскопічна неоднорідність електрофізичних властивостей нітридних покриттів на основі

високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf, отриманих вакуумно – дуговим методом, визначається включеннями, які виникли при формуванні покриттів і різняться між собою складом та характерним розміром. Тож, для формування однорідних за електричними властивостями нітридних покриттів на основі високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf необхідне виключення фізико-технологічних факторів, які обумовлюють утворення таких включень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено комплекс нових методів дослідження, що охоплюють різні складові розроблення технологій приготування високоомних кристалів, а саме: метод вимірювання питомого електроопору з урахуванням діелектричної дисперсії (патент України №90037 і патент України на корисну модель №76300), енергетичного спектра локалізованих станів носіїв заряду для окремих зразків (патент України на корисну модель №78882) та методи визначення розподілу електрофізичних параметрів в межах усього кристалічного зливку (патенти України №92595 і №123325).

2. Отримані дані щодо зв'язку закономірних змін електрофізичних параметрів з відхиленням складу кристалів $ZnSe$ та $Cd_{1-x}Zn_xTe$ від стехіометричного можуть використовуватись для пошуку умов покращення показників фізичних властивостей об'єму зазначених кристалів шляхом вдосконалення технології їх вирощування.

3. Послаблення неоднорідності розподілу діелектричних характеристик та зниження рівня дисипації енергії змінного електричного поля внаслідок легування атомами Cr в концентрації 10^{18} см^{-3} кристалів $ZnSe$ можна використовувати для покращення електрофізичних властивостей цих кристалів.

4. Легування домішкою Bi у концентрації $10^{-3} \text{ мас.}\%$, а також відпал кристалів $CdWO_4$ у парах водню протягом 1,5 годин за температури 500°C забезпечують створення на основі цих матеріалів високочутливих сенсорів електромагнітного випромінювання ємнісного типу.

5. Встановлений при дослідженні композитів визначальний вплив приповерхневих локалізованих станів носіїв заряду на частотні та спектральні характеристики фотодіелектричного ефекта можна використовувати для створення нових матеріалів оптоелектроніки.

6. Встановлений зв'язок чутливості до гама-випромінювання з експозиційною потужністю дози 700 мкР/годину з суттєво нерівноважним станом системи власних дефектів в кристалах типу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ можна використовувати для створення нових прогресивних матеріалів для сенсорів іонізуючого випромінювання.

7. Дія ультрамалих ($10 - 40 \text{ Р}$) експозиційних доз гама-випромінювання може використовуватись для стабілізації електричних властивостей кристалів типу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при їхньому використанні в детекторах іонізуючого випромінювання.

8. Кореляційний зв'язок мікротвердості зі сталою кристалічної решітки та областю когерентного розсіювання рентгенівських промінів багатокомпонентних покриттів на основі WC можна використовувати для

цілеспрямованого покращення механічних властивостей і, ймовірно, керованої зміни електричних властивостей зазначених покриттів шляхом оптимізації їхнього складу та умов формування.

9. Запропонований підхід до стабілізації експлуатаційних характеристик електронних приладів на основі високоомних кристалічних матеріалів під дією ультрамалих експозиційних доз електромагнітного випромінювання буде використаний в державному науково-дослідному підприємстві ДП НДТІП.

10. Отримані результати досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямками 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та 176 «Мікро- та наносистемна техніка».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати одержані дисертантом особисто. В роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належать результати і висновки, які наведені в дисертації й авторефераті. Здобувач обговорював зі співавторами робіт план проведення всіх досліджень та одержані результати.

В роботах [5 – 9, 11 – 13, 16] здобувач виконав вимірювання та запропонував пояснення частотних залежностей складових комплексної діелектричної проникності зразків. В роботі [2] він запропонував пояснення зв'язку діелектричної проникності з енергетичною роздільною детекторів гама-випромінювання, виготовлених з кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$. В роботах [17, 19] здобувач запропонував враховувати вплив співвідношення коефіцієнтів розпорошення компонентів підкладки на морфологію покриттів WC. В роботах [14, 18] здобувач виконав експериментальне дослідження системи електроживлення інверсної магнетронної розпорошувальної установки. В роботі [4] він виконав дослідження морфології поверхні покриттів WC методом електронної мікроскопії. В роботі [1] ним запропоновано використовувати новий параметр - спектральну густину ділянок діаграми фотодіелектричного ефекту. В роботах [3, 15, 20, 27] здобувач дослідив крупномасштабну неоднорідність електрофізичних властивостей зразків кристалів та покриттів. В роботі [10] ним виконано математичне моделювання потоків плазми в магнетронній установці. В роботах [21 – 26] здобувач виконав експериментальне дослідження електрофізичних властивостей зразків, а в роботах [29 – 31] він виготовив та випробував стенд для дослідження електрофізичних властивостей кристалів. В роботах [27 - 28] здобувач виконав дослідження будови зразків методом оптичної мікроскопії.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати роботи доповідалися на наступних вітчизняних та міжнародних конференціях і семінарах:

International Conference "Functional Materials" ICFM 2009, 2009, Partenit, Crimea, Ukraine; Int. Conf. on Crystal Growth (ICCG-16) in conjunction with The

14th International Conference on Vapor Growth and Epitaxy (ICVGE-14), August 8-13 2010, Beijing, China; International Conference "Functional Materials" ICFM 2011, October 3 – 8 2011, Partenit, Crimea, Ukraine; Міжнародна науково-практична конференція “Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering” ICTM-2019 («Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ-2019), 2019, Харків, Україна; Міжнародна науково-практична конференція “Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering” ICTM-2020, 2020, Харків, Україна.

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 31 роботу. З них 1 монографія, 19 статей у спеціалізованих наукових журналах і збірниках (13 – в реферованих журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus; 6 у фахових виданнях України), 5 тез доповідей на конференціях, 6 патентів України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаної літератури із 264 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 321 сторінку, із них 253 сторінки основного тексту, 97 рисунків та 26 таблиць, а також списку літератури на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації і описана проблема, якій вона присвячена, сформульована мета і завдання роботи, визначені об'єкти, предмет та методи дослідження, охарактеризовано наукову новизну й практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про зв'язок проведених досліджень з науковими програмами, які виконуються в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

У першому розділі «Дефектна структура, електричні та фотоелектричні властивості неоднорідних кристалічних систем. Огляд літератури» розглянуто сучасний стан проблеми впливу неоднорідностей різного масштабного рівня та природи на електрофізичні та фотоелектричні властивості об'ємних кристалічних систем. Особлива увага приділена впливу на зазначені властивості дефектної структури, що утворилася природнім шляхом, іонізуючого випромінювання та електромагнітного випромінювання надвисокої частоти. Наводиться огляд експериментальних даних щодо електричних властивостей композитних негомогенних кристалічних систем, отриманих різними способами.

На початку літературного огляду на прикладі кристалів GaAs, Cd(Zn)Te, PbTe дається опис особливостей складу та дефектної структури кристалів як об'ємних неоднорідних, а в окремих випадках і негомогенних систем, що були вирощені різними методами. Зазначено, що кристали з лінійним розміром десятків міліметрів неодмінно характеризуються неоднорідним розподілом складу та дефектів на різних масштабних рівнях. На прикладі кристалів різного складу (Si, GaAs, PbTe, PbI₂, CuInSe₂-ZnIn₂Se₄, Cd_{1-x}Mn_xTe, Cd_xHg_{1-x}Te,

CdS<Ag>, CdZnTe, ZnSe, ZnSe:Cr, та $\text{AgCd}_{2-x}\text{Mn}_x\text{GaSe}_4$) розглянуто характерні особливості електрофізичних, фотоелектричних та механічних властивостей об'ємних неоднорідних кристалічних систем. Зазначається, що вирощування таких кристалів здійснюється в суттєво нерівноважних умовах, що призводить до утворення структурних дефектів різноманітних типів і неконтрольованої зміни характеристик дефектної структури в напрямку росту. При цьому важливу роль відіграють викривлення фронту кристалізації та відхилення складу від стехіометричного. Зазначені зміни дефектної структури визначають електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалічних систем.

Оскільки механічні властивості кристалів чутливі до дефектів їхньої будови, що нерідко є електрично активними, то ці властивості негетерогенних кристалічних матеріалів пов'язані з властивостями електрофізичними та фотоелектричними. Встановлено, що при легуванні кристалів ZnSe домішкою Cr у концентрації $3.0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та більше в їхній структурі вже не спостерігаються дефекти упаковки, а мікротвердість збільшується порівняно з нелегованими зразками. Отже легування Cr спричиняє зміну не лише точкових, а й двомірних дефектів, що впливає на механічні властивості кристалів. Зростання мікротвердості після шліфування поверхні, що одержана сколюванням, спостерігалось на кристалах PbI_2 . Крім того, шліфування зазначеної поверхні чинило помітний вплив на ВАХ кристалів PbI_2 . Дані результати, вочевидь, можуть бути пояснені тим, що внаслідок механічного шліфування поверхні кристалів утворюються різні типи дефектів, які суттєво впливають як на механічні, так і на електрофізичні властивості цих матеріалів.

Загальновідомо, що іонізуючі випромінювання можуть чинити суттєвий вплив на дефектну структуру кристалів. Тому в огляді наведено дані щодо впливу іонізуючого випромінювання на дефектну структуру, електрофізичні та фотоелектричні властивості широкого класу негетерогенних кристалічних систем та електронних пристроїв на їх основі. Дослідження впливу іонізуючого випромінювання експозиційної дози до 10^6 Р на кристалічні матеріали різного складу: Si, мезопористий кремній SiMP, Ge, AlP, AlAs, AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Cu, W, сплав ВК8 (суміш карбіда вольфрама та кобальта), $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ свідчать про те, що існують два механізми реакції матеріалу на збудження. Перший механізм полягає в тому, що за експозиційної дози іонізуючого випромінювання ($10^4 - 10^5$) Р, як правило, спостерігається ефект «малих доз» – покращення електричних та фотоелектричних властивостей негетерогенних кристалічних матеріалів, що пояснюється радіаційним відпалом початкових дефектів їх структури. При цьому відбувається структурне впорядкування та перехід матеріалу у більш рівноважний стан, а також анігіляція структурних дефектів або ефект «заліковування» електрично активних дефектів. Другий механізм реакції кристалічного матеріалу на вплив іонізуючого випромінювання полягає у тому, що за експозиційної дози 10^6 Р та більше відбувається погіршення структурної досконалості й деградація електричних та фотоелектричних властивостей даних матеріалів і параметрів електронних пристроїв на їх основі, що визначається піннінгом рівня Фермі під

дією даного впливу. В низці робіт показано, що результат впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти на кристалічні негомгенні системи подібний до того, що спостерігається при дії на системи іонізуючого випромінювання.

Завершальна частина першого розділу присвячена властивостям композитних матеріалів, які зазвичай складаються з діелектричної матриці та масиву частинок кристалічних матеріалів розміром від нанометрів до мікрометрів. Наведено результати досліджень морфології, структури та електрофізичних властивостей композитних матеріалів складу поліетилен високої щільності – напівпровідник TiInS_2 ; полімер – нанокристали CdS , CdSe , ZnS , Tl_2S , Se ; структури $a\text{-SiO}_x / \text{SiO}_2$, наностержні ZnO – наночастинки CuO та наностержні ZnO – наночастинки Ag ; та ін. Зроблено висновок, що зміна складу забезпечує управління в широких межах електричними та фотоелектричними властивостями зазначених матеріалів, особливо на основі полімеру та наночастинок кристалічних матеріалів. Це має не лише наукове, але й прикладне значення з погляду на гостру потребу в нових матеріалах для широкого кола практичних використань.

Другий розділ «Методи дослідження електричних та фотоелектричних властивостей неоднорідних кристалічних матеріалів» присвячено новим методам вимірювання електрофізичних та фотоелектричних величин кристалічних матеріалів, а також оптимізації технологічних параметрів інверсної магнетронної розпоршувальної системи для формування багатокомпонентних покриттів.

Вимірювання питомого електроопору високоомних кристалічних матеріалів в сталому електричному полі потребує створення омичних контактів до зразка, що становить окрему задачу і суттєво впливає на точність вимірювань. Щоб уникнути створення омичних контактів нами було розроблено метод вимірювання питомого електроопору високоомних матеріалів з використанням змінного електричного поля. Цей метод полягає у використанні плоского конденсатора, між обкладинками якого міститься кристалічний зразок, на приконтактних площинах якого створені тонкі діелектричні шари однакової товщини. Здійснивши вимірювання в низькочастотній області частотних залежностей тангенса кута діелектричних втрат та ємності зазначеного конденсатора, використовують одержані дані для розрахунку за відповідними формулами питомого електроопору зразка сталому струму.

Недоліком описаного безконтактного методу вимірювання питомого електроопору високоомних кристалічних матеріалів сталому струму ρ_c є те, що цю величину визначають, використовуючи заздалегідь визначену залежність

$\frac{\rho_c}{\rho_a} = f(\varepsilon')$, де ρ_a – питомий електроопір матеріалу змінному струму, ε' –

відносна діелектрична проникність матеріалу. Проте для різних зразків кристалічного матеріалу зазначена залежність може суттєво відрізнятись внаслідок впливу різних дефектів та неоднорідностей. Тож знайдення

залежності $\frac{\rho_c}{\rho_a} = f(\varepsilon')$ для певного конкретного кристалічного зразка може бути здійснене лише експериментально, що надасть найбільшу точність визначення ρ_c .

Для подолання вказаного недоліку запропоновано інший спосіб вимірювань, який реалізується за допомогою того ж обладнання, але відрізняється тим, що не використовують заздалегідь визначену залежність відношення питомого електроопору для сталого поля до електроопору у змінному струмі як функцію відносної діелектричної проникності зразка. Замість цього вимірювання тангенса кута діелектричних втрат та електроємності вимірювального конденсатора зі зразком виконують для декількох частот поля, а питомий електроопір зразка в сталому електричному полі визначають при досягненні мінімуму функції

$$F(\rho_c) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2\pi f_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'_{si} \cdot \rho_{si}} - \frac{1}{2\pi f_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'_{si} \cdot \rho_c} \right)^2$$

(f_i – частота поля; ε'_{si} – виміряна діелектрична проникність; ε_0 – електрична стала; ρ_{si} – питомий електроопір зразка в сталому електричному полі). Значення цієї функції обчислюють для відомого з літературних джерел інтервалу величин питомого електроопору зразка постійному струму ρ_c .

Для дослідження просторового розподілу неоднорідностей електрофізичних параметрів в високоомних кристалічних матеріалах розроблено наступні методи, що забезпечують визначення структурних дефектів та відхилень складу від стехіометричного в зразках у формі пластини або циліндра. Зокрема для дослідження зазначеного розподілу в зразках в формі пластини використовується система з плоского і сферичного електродів. Суттєво, що така система забезпечує високу локальність вимірювань електрофізичних параметрів зразка.

При реалізації методу, що використовується для дослідження зразків в формі пластини, спершу, використовуючи еталонний зразок в формі пластини з рівномірним розподілом діелектричної проникності ε' та коефіцієнта діелектричних втрат ε'' , значення яких відомі заздалегідь, а товщина d така ж, як у досліджуваного зразка, для довільного положення сферичного електроду вимірюють електроємність C та тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$ системи електроди - еталонний зразок. Забравши цей зразок і встановивши відстань між електродами d , вимірюють електроємність C_0 та тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_0$ системи електрод в формі кулі – плоский електрод. Це дає можливість розраховувати коефіцієнти S_{ef} та K_{ef} згідно формул

$$S_{ef} = \frac{(C - C_0)d}{\varepsilon_0(\varepsilon' - 1)},$$

$$K_{ef} = \frac{\varepsilon''(C - C_0)}{\varepsilon'(C \operatorname{tg} \delta - C_0 \operatorname{tg} \delta_0)}.$$

(ε_0 - електрична стала). Остаточню, розмістивши досліджуваний зразок між електродами, для кожного i -го положення сферичного електрода вимірюють електроємність C_i та тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta_i$ системи електроди – досліджуваний зразок і визначають локальні значення діелектричної проникності та коефіцієнта діелектричних втрат згідно формул

$$\varepsilon'_i = \frac{(C_i - C_0)d}{\varepsilon_0 S_{ef}} + 1 \quad i$$

$$\varepsilon''_i = \varepsilon'_i \cdot K_{ef} \cdot \frac{(C_i \cdot \operatorname{tg} \delta_i - C_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_0)}{(C_i - C_0)}.$$

В іншому методі, що забезпечує дослідження просторового розподілу електрофізичних неоднорідностей в зразках у формі циліндра, також використовується система з двох електродів. Але при цьому обидва електроди мають форму циліндра. Циліндри однакові за розміром і орієнтовані паралельно один одному. У свою чергу електроди орієнтовано своїми осями перпендикулярно осі еталонного або досліджуваного зразка, торкаючись його поверхні у діаметрально протилежних точках. Під час дослідження зразок переміщують відносно електродів. Використовують дві перпендикулярні одна одній орієнтації силових ліній електричного поля, що додатково забезпечує дослідження анізотропії електрофізичних параметрів в різних областях зразка.

Важливою складовою дослідження локалізованих станів носіїв зарядів в кристалах та створених на їхній основі структурах є вимірювання енергетичного спектра локалізованих станів носіїв заряду. Один з методів таких досліджень – метод скануючої фотодіелектричної спектроскопії локалізованих станів. Цей метод заснований на вимірюванні приростів ефективних значень діелектричної проникності $\Delta \varepsilon'_{ef}$ і коефіцієнта діелектричних втрат $\Delta \varepsilon''_{ef}$ зразка, що проведені з високою чутливістю при плавній зміні довжини хвилі світла λ . Використовуючи одержані дані, будують в комплексній площині залежність $\Delta \varepsilon'_{ef}(\lambda) - \Delta \varepsilon''_{ef}(\lambda)$ і визначають з неї граничні довжини хвиль λ_i , які відповідають фотозбудженню різних центрів акцепторного типу та, нарешті, розраховують глибину залягання відповідних енергетичних рівнів відносно стелі валентної зони за формулою $E_i = E_g - \frac{h}{c\lambda_i}$. Проте дослідження кристалів CdZnTe показали, що зазначений метод не забезпечує виявлення станів носіїв, енергетичні рівні яких знаходяться поблизу середини або вище забороненої зони.

Для подолання цього недоліку метода запропоновано виконувати вимірювання величин $\Delta\varepsilon'_{ef}$ і $\Delta\varepsilon''_{ef}$ при дії додаткового білого світла. Апробація такої модифікації метода скануючої фотодіелектричної спектроскопії локалізованих станів носіїв дала позитивні результати.

Розроблено метод вимірювання потужності експозиційної дози електромагнітного випромінювання, перевага якого над відомими методами полягає в використанні змінного електричного поля, що забезпечує відсутність поляризації кристалічного детектора. Метод заснований на вимірюванні електроємності C і тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$ кристалу прямокутної форми. В області низьких частот вимірюють залежності $C(f)$ і $tg\delta(f)$ кристала без впливу на нього електромагнітного випромінювання і при дії випромінювання, одержуючи в результаті частотні залежності $C_\gamma(f)$ і $tg\delta_\gamma(f)$. Після цього згідно формули

$$\Delta_\gamma = (C_\gamma(f) - C(f)) \times (tg\delta_\gamma(f) - tg\delta(f))$$

визначають частотну залежність діелектричного відгуку на електромагнітний вплив.

З цієї залежності визначають частоту f_m , для якої Δ_γ має максимальне значення. Використовуючи залежності $C(f)$ і $tg\delta(f)$, розраховують значення електроємності $C(f_m)$ і тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta(f_m)$ кристала для частоти f_m . Піддаючи кристал дії електромагнітного випромінювання з різною заздалегідь визначеною потужністю дози P_d , вимірюють C_γ і $tg\delta_\gamma$ як функцію P_d при частоті f_m , визначають залежність Δ_γ від потужності експозиційної дози, одержуючи при цьому характеристичну (робочу) залежність зазначеної величини від P_d . Піддаючи кристал дії випромінювання з невідомою потужністю експозиційної дози, вимірюють C_γ і $tg\delta_\gamma$ кристала, потім визначають Δ_γ . Використовуючи цю величину і характеристичну залежність для неї, визначають невідому P_d .

Для одержання кристалічних покриттів різного складу використовують магнетронні розпорошувальні системи. Різновидом таких систем є інверсна система з множиною катодів-мішеней. Така система забезпечує формування покриттів з різною кількістю компонентів. Але з іншого боку через наявність численних катодів-мішеней ускладнено управління процесом їхнього розпорошення. Розроблено та обґрунтовано підхід до побудови системи електроживлення зазначеної системи. Показана необхідність створення електричних потенціалів не лише на кожному з катодів-мішеней, але й на елементах технологічного відсіку, що забезпечує гнучкість та стабільність управління електроживлення генератора магнетронної системи. Крім того, керування процесом напилювання здійснюється зміною зазначених потенціалів. Найбільш гнучкою з погляду осадження покриттів різного складу є система електроживлення генератора інверсної магнетронної системи, в якій усі елементи генератора живляться від одного джерела через ланцюжки резисторів

з регульованим опором. Визначено оптимальний спосіб побудови резистивних ланцюжків і номінальне значення опору його складових.

У третьому розділі «Електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів ZnSe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$ » наведено результати дослідження фотодіелектричних і оптичних властивостей кристалів ZnSe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$ у зв'язку з впливом на зазначені властивості кристалів відхилень складу від стехіометричного та дефектів структури.

Загальновідомо, що при вирощуванні з розплаву в кристалах ZnSe виникають дефекти структури різних масштабних рівнів. У зв'язку з цим при комплексному дослідженні неоднорідності електрофізичних або фотоелектричних властивостей цих кристалів необхідні різні методи.

В роботі при дослідженні впливу на оптичні та фотоелектричні властивості зазначених кристалів крупномасштабних дефектів структури та неоднорідностей використовували оригінальну вимірювальну установку, основу якої складав пристрій для переміщення зразка циліндричної форми з кроком від 0,05 мм в напрямку його осі. Забезпечувалось вимірювання

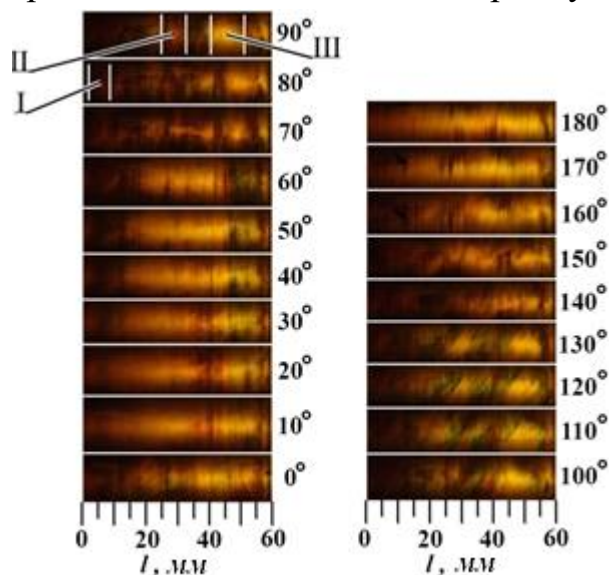


Рис. 1 – Зображення в паралельному пучку поляризованого світла зразка ZnSe, орієнтованого своєю віссю перпендикулярно пучку при різних кутах повороту зразка відносно осі.

електроємності C і тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$ системи зразок-електроди як у відсутності, так і при дії на зразок білого світла при одночасній реєстрації інтенсивності розсіяного світла. Крім того, вперше явище подвійного променезаломлення досліджувалось в межах усього зразка циліндричної форми, орієнтованого своєю віссю перпендикулярно світловому потоку при різних кутах повороту зразка відносно своєї осі. Одержані таким чином при схрещених поляризаторі та аналізаторі картини подвійного променезаломлення в одному зі зразків ZnSe показані на рис. 1. На рисунку видно просторові області, що якісно різняться між собою подвійним променезаломленням. Особливий інтерес становить область (позначена цифрою III), в якій спостерігаються суттєві зміни картини променезаломлення в залежності від кута повороту зразка. Оскільки для досліджених кристалів типове утворення двомірних дефектів структури (двійників, меж блочності тощо) можна припустити, що саме такі дефекти зумовили подвійне променезаломлення в зазначеній області кристала. З метою підтвердження цього припущення досліджено координатний розподіл інтенсивності світла, розсіяного перпендикулярно до осі кристала при переміщенні приймача вздовж цієї осі (рис. 2). Встановлено різкі зміни інтенсивності розсіяного світла при

переміщенні приймача та повороті зразка саме в області III, що підтверджує зроблене припущення.

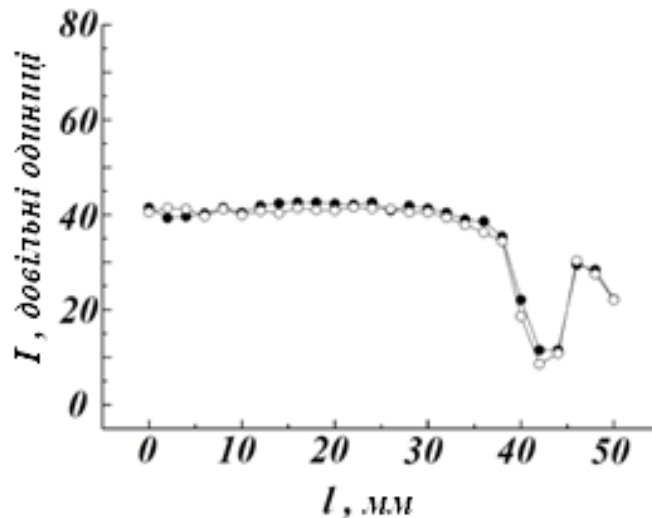


Рис. 2 – Залежність інтенсивності розсіяного світла від переміщення приймача світла в напрямку осі зразка.

Для одержання додаткової інформації про природу дефектів, що визначають зазначені особливості оптичних властивостей області III було досліджено координатну залежність електроємності і тангенса кута діелектричних втрат системи електроди – зразок при фіксованому кутовому положенні кристала відносно вимірювальних електродів, що були рівновіддалені від початку кристала. Також було досліджено кутову залежність зазначених параметрів в межах області III. Встановлено, що мінімуму координатної залежності тангенса кута діелектричних втрат відповідає максимум аналогічної залежності електроємності системи електроди – зразок. Крім того, максимумами й мінімумами кутових залежностей як електроємності, так і тангенса кута діелектричних втрат системи електроди – зразок зміщені один відносно одного на кут $\sim 180^\circ$. Ці дані свідчать про визначальний вплив двовимірних дефектів лише на дійсну частину ϵ' комплексної діелектричної проникності ϵ^* досліджених кристалів ZnSe.

Оскільки дефекти структури різних типів в кристалах зазвичай взаємопов'язані, становило інтерес дослідити координатний розподіл приростів електроємності і тангенса кута діелектричних втрат системи електроди – зразок при дії на кристал білого світла, спрямованого вздовж його осі. Дослід виконувався для двох орієнтацій кристала відносно системи електродів, що відрізнялись кутом повороту відносно осі зразка на 90° . Встановлено, що орієнтація електричного поля не чинить помітного впливу на координатні залежності як для електроємності, так і для тангенса кута діелектричних втрат системи електроди-кристал. В залежностях обох параметрів спостерігається поступове зростання від початку кристала. Спостерігається максимум залежностей, що припадає на область типу III. Зазначені особливості фотодіелектричного ефекту в кристалах ZnSe пояснюються поступовою зміною

системи точкових дефектів вздовж напрямку їх росту внаслідок відхилення складу кристала від стехіометричного при його кристалізації з розплаву. Внаслідок досягнення граничної концентрації певних ростових дефектів відбувається формування двовимірних дефектів структури, чим пояснюється спостереження максимуму координатних залежностей приростів параметрів ϵ і $\text{tg}\delta$ в області локалізації аномалії подвійного променезаломлення. Отже особливості формування дефектної структури при зростанні з розплаву визначають зв'язок електрофізичних, фотоелектричних та оптичних властивостей кристалів ZnSe.

Оскільки точкові дефекти структури можуть чинити визначальний вплив на електричні властивості кристалів, а стан цих дефектів залежить від відхилення складу від стехіометричного важливо дослідити діелектричні властивості кристалів в межах усього зливку. Такі дослідження було виконано в низькочастотній області для кристалів ZnSe. На рис. 3 наведено частотно – координатні залежності частин комплексної діелектричної проникності зразків ZnSe для паралельної орієнтації електричного поля до осі кристалічного зливка. Як видно з цього рисунка, початковим і кінцевим областям кристалічного зливку притаманні максимальні значення складових комплексної діелектричної проникності. Суттєво, що лише за максимальної частоти електричного поля $\sim 10^5$ Гц діелектрична проникність зразків ZnSe має значення ≈ 9 , яке близьке до відомого з літературних джерел. Зазначимо, що в даному випадку частотна залежність ϵ' і ϵ'' , представлена у форматі діаграм

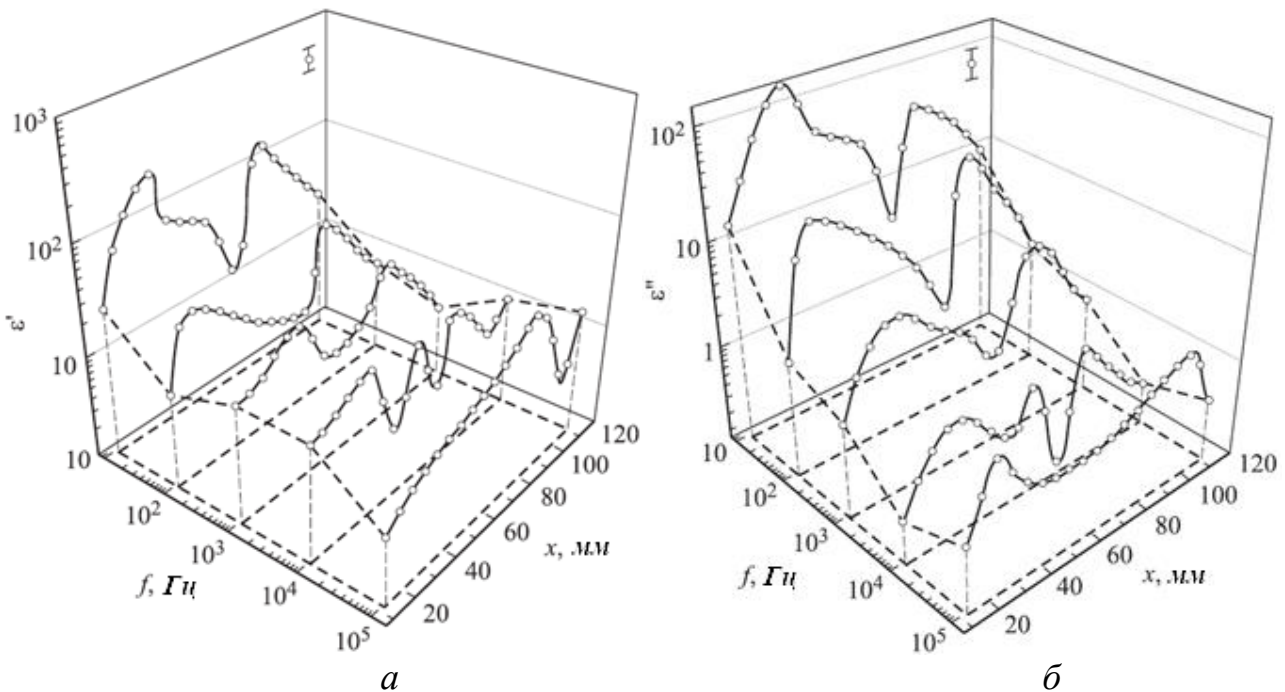


Рис. 3 – Залежності дійсної (а) та уявної (б) частини діелектричної проникності кристалів ZnSe від їх віддаленості від початку кристалічного зливка, виміряні за різних частот електричного поля при його паралельній орієнтації до осі кристалічного зливка.

Коул–Коула апроксимується лінійним відрізком. Обидві частини ε^* досліджених кристалів експоненційно швидко збільшуються з температурою. Ці зміни характеризуються цілим набором енергій активації E_a , які різняться для центральної та периферійних областей злитка ZnSe. Встановлена залежність діелектричних властивостей досліджених зразків ZnSe від орієнтації електричного поля відносно напрямку зростання кристалічного злитку. Так, відношення значень діелектричної проникності, виміряні за паралельної та перпендикулярної орієнтації електричного поля до напрямку зростання, знаходиться в інтервалі $\sim(0,5 - 2)$ і є мінімальним у центральній частині злитка. Залежність діелектричних властивостей досліджених кристалів селеніду цинку від їх віддаленості від початку кристалічного злитку пояснюється визначальним впливом порушення стехіометрії на стан системи точкових дефектів. Крім того, поляризація кристалів у змінному електричному полі пов'язана із стрибками носіїв заряду між локалізованими станами, породженими точковими дефектами структури. Суттєвий вплив на виникнення таких дефектів чинять не лише фонові домішки, але і відхилення складу та термопластичні напруження.

На відміну від бінарних кристалів ZnSe потрібні тверді розчини $Cd_{1-x}Zn_xTe$ характеризуються неоднорідностями складу, що виникають при кристалізації. Ця особливість впливає як на електричні, так і на фотоелектричні властивості твердих розчинів. У цьому зв'язку особливий інтерес становить питомий електроопір, від якого залежить придатність кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ для використання в неохолоджуваних детекторах гама-випромінювання. Встановлено, що величини питомого електроопору зазначених кристалів, виміряні в постійному та змінному електричних полях, можуть суттєво відрізнитися одна від одної (див. рис. 4, а). Причому зі збільшенням діелектричної проникності кристала ця відмінність суттєво зростає. Однією з головних причин такої відмінності є дисипація енергії змінного електричного поля, пов'язана з діелектричною релаксацією. Оцінка вкладу діелектричної релаксації у питомий електроопір на змінному електричному полі може бути здійснена на основі виразів, що описують діелектричний відгук кристала, та визначення функції розподілу релаксаторів за частотою. Встановлено, що для кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з високою поляризуемістю ця функція (рис. 4, б) характеризується максимумами в областях $7 \cdot 10^{-5}$ та $5 \cdot 10^{-3}$ с. За допомогою функції розподілу релаксаторів за частотою було виключено внесок діелектричної релаксації в питомий електроопір в змінному полі, що зменшило відмінність між значеннями цієї величини для постійного та змінного полів (див. рис. 4,а, крива 2).

Важливою умовою дослідження впливу неоднорідностей складу на електричні властивості твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ є встановлення розподілу в межах злитку закономірної компоненти комплексної діелектричної проникності. Для встановлення такого розподілу з центральної частини злитку було вирізано пластину, орієнтовану вздовж напрямку його росту. Отриманий експериментально координатний розподіл частин комплексної діелектричної проникності досліджуваного зразка містив як закономірні, так і випадкові

компоненти. Для виділення з цього розподілу закономірних змін частин діелектричної проникності з координатою вперше було застосовано вейвлет – аналіз. При цьому двовимірний масив експериментальних даних, тобто $\varepsilon'(r_j, Z_j)$ і $\varepsilon''(r_j, Z_j)$ (де r_j – координата в радіальному напрямку, а Z_j – у осьовому), перетворювався в одновимірний $\varepsilon'(l_k)$, $\varepsilon''(l_k)$ шляхом продовження рядка із фіксованими значеннями Z_j наступним рядком у порядку збільшення j . Одержані в такий спосіб залежності $\varepsilon'(l_k)$ наведено

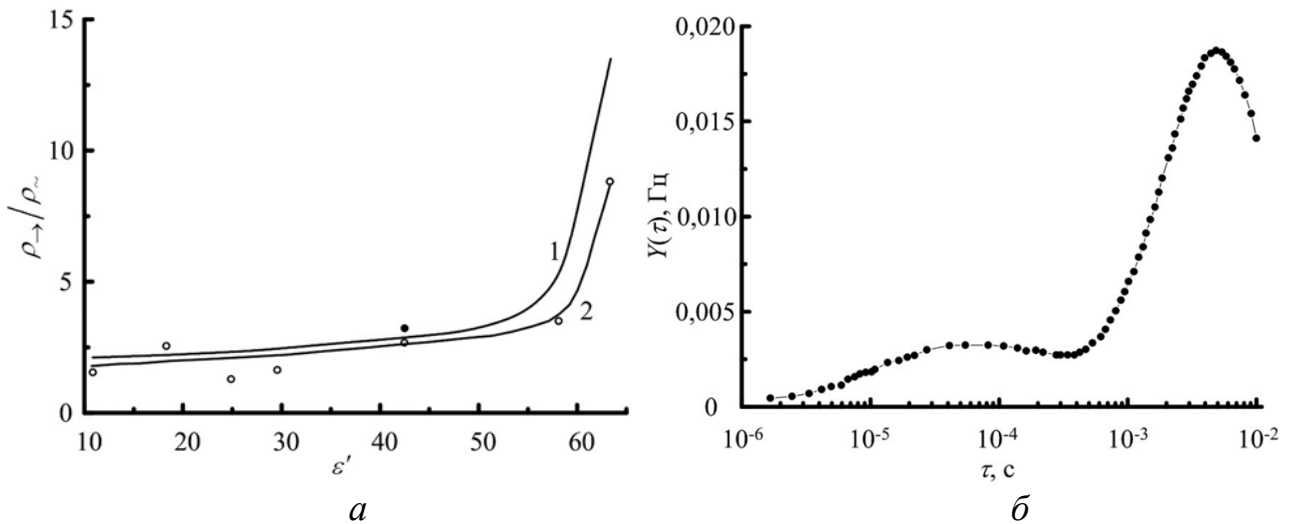


Рис. 4 – Відношення величин питомого опору постійному струму ρ_{\rightarrow} та змінному струму ρ_{\sim} для кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з різною відносною діелектричною проникністю за частоти 100 Гц (а) (1 – експериментальна залежність; 2 – дані, що відповідають кривій 1 за виключенням вкладу діелектричної релаксації) та характерний для кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з високою поляризуємістю розподіл релаксаторів за часом релаксації (б).

на рис. 5 а, б. На рис. 5 в представлено двовимірний розподіл ε'_{tr} із зазначенням ліній однакових значень цієї величини. Експериментальні та отримані шляхом фільтрації аналогічні залежності для ε''_{tr} якісно подібні наведеним. Суттєвою особливістю розподілу ε'_{tr} (див. рис. 5 в) є нахил ізоліній даної величини під відмінним від $\frac{\pi}{2}$ кутом щодо осі кристала (осі Z). Такий нахил ізоліній ε'_{tr} , вочевидь, визначається орієнтацією фронту кристалізації відносно напрямку сили тяжіння і відповідно напрямку зростання (осі Z). Слід зазначити, що температурні залежності частин ε^* зразків з початкової та кінцевої частини злитка $Cd_{1-x}Zn_xTe$ суттєво відрізняються одна від одної. Крім того, встановлено, що для максимум залежності $\varepsilon''(T)$

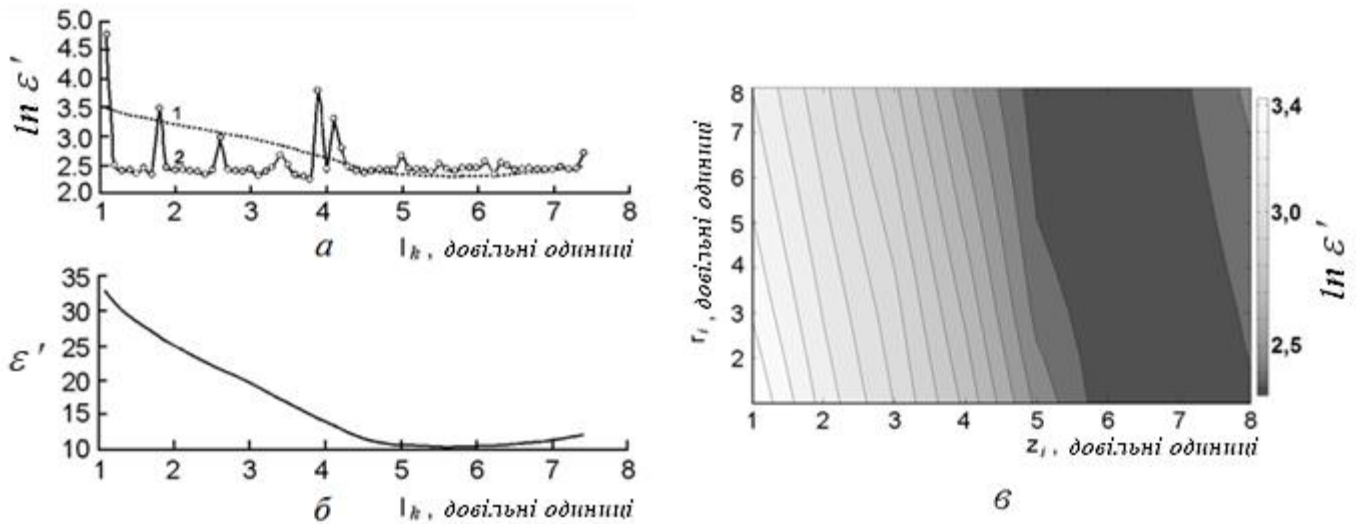


Рис. 5 – Залежності від просторової координати дійсної частини діелектричної проникності і її закономірної складової (а); б – та ж залежність для закономірної складової в лінійному масштабі; в – двовимірний розподіл закономірної складової.

зразків з кінця злитку спостерігається при температурі T_{max} , за якої абсолютне значення $\frac{\partial \varepsilon'}{\partial T}$ досягає найбільшої величини злитку. Така поведінка

температурних залежностей частин ε^* свідчить про релаксаційний механізм поляризації кристалів. Виявлено тенденцію до зростання T_{max} при переході до зразків, розташованих далі від початку кристалічного злитку. Особливості температурних залежностей діелектричних параметрів досліджених кристалів пояснюється наявністю потенціального рельєфу, що виник внаслідок неоднорідного розподілу заряджених точкових дефектів (домішок).

З метою встановлення зв'язку неоднорідностей складу та частин комплексної діелектричної проникності для кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ було виконано порівняльний аналіз змін в радіальному напрямку частин ε^* та вмісту компонентів цього твердого розчину. Склад досліджували енергодисперсійним методом, використовуючи растровий електронний мікроскоп РЕМ-106. Для встановлення закономірних змін компонентів твердого розчину в зазначеному напрямку використовували вейвлет-аналіз. Виявлено ознаки осьової симетрії радіальних розподілів Zn і Cd у початковій області злитку $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. При цьому вміст кожної з цих компонент змінюється асиметрично до складу іншої: максимуму однієї залежності відповідає мінімум іншої і навпаки. Це пояснюється збереженням в межах окремої ділянки злитку відношення концентрацій аніонів та катіонів $(x_{\text{Zn}} + x_{\text{Cd}}) / x_{\text{Te}}$ і наявністю декількох ділянок опуклості (увігнутості) фронту кристалізації, що має до того ж риси осьової симетрії. Тож, максимумам і мінімумам радіального розподілу Zn у початковій області злитку $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ відповідають увігнуті та опуклі в розплав ділянки фронту кристалізації.

Радіальний розподіл Zn у кінцевій області злитка $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ не виявляє ознак осьової симетрії, що, вочевидь, пов'язано із збіднінням кристала атомами Cd і Zn в процесі росту.

Встановлено, що як в початковій, так і в кінцевій частинах злитку $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ обидві частини комплексної діелектричної проникності в більшій мірі корелюють з вмістом Zn, ніж із вмістом інших компонентів твердого розчину.

Описаний вплив крупномасштабних неоднорідностей складу на діелектричні властивості кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ може бути пояснений змінами в радіальному напрямку системи електрично активних точкових дефектів. Ці дефекти, зокрема, пов'язані з вакансіями Cd та міжвузловими атомами Te, що утворюються при кристалізації внаслідок найбільш інтенсивного випаровування з розплаву саме кадмію. Крім того, важливу роль у формуванні діелектричних властивостей відіграють породжені точковими дефектами локалізовані стани носіїв заряду в забороненій зоні кристала. Адже відомі різні механізми впливу таких станів носіїв на електронні процеси в кристалах, включаючи поляризацію.

Враховуючи викладені вище результати, а також важливу роль, яку локалізовані стани відіграють в процесах генерації-рекомбінації носіїв струму, становить інтерес дослідити зв'язок складових діелектричної проникності кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з енергетичною роздільною здатністю (FWHM) детекторів гама-випромінювання, виготовлених на основі цих кристалів. В досліді використовувались кристалічні зразки, які було виготовлено з областей, що знаходяться на однаковій відстані від початку кристалічного злитку. Встановлено кореляцію низькочастотних складових діелектричної проникності з зазначеним параметром детекторів (рис.6). При цьому зразкам з більшим значенням ε' відповідають детектори з гіршою енергетичною роздільною здатністю. Кореляційний зв'язок дійсної частини діелектричної проникності з FWHM пояснено тим, що значна частина точкових дефектів, включаючи утворені вакансіями Cd, є електрично активними і, слугуючи пастками носіїв, впливають не лише на процес поляризації кристалів CdZnTe , а і на електричний шум різного виду (дробовий, тепловий, такий, що змінюється з частотою за законом $1/f$) в створених на їхній основі детекторів гама-випромінювання.

Апробовано модифікацію метода скануючої фотодіелектричної спектроскопії, що дозволяє визначити не лише енергетичний спектр локалізованих станів носіїв, але і приповерхневий електростатичний потенціал кристалів типу $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Зміни в здійсненні метода полягали в використанні додаткового збудження зразка білим світлом та нового параметра — спектральної густини ділянок діаграми фотодіелектричного ефекту $(\ell\lambda)_i$. Даний параметр дорівнює відношенню довжини $\Delta\ell_i$ окремої ділянки діаграми $\Delta\varepsilon''_{ef}(\lambda) - \Delta\varepsilon'_{ef}(\lambda)$ до відповідного інтервалу довжини хвиль $\Delta\lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i$. Зміна

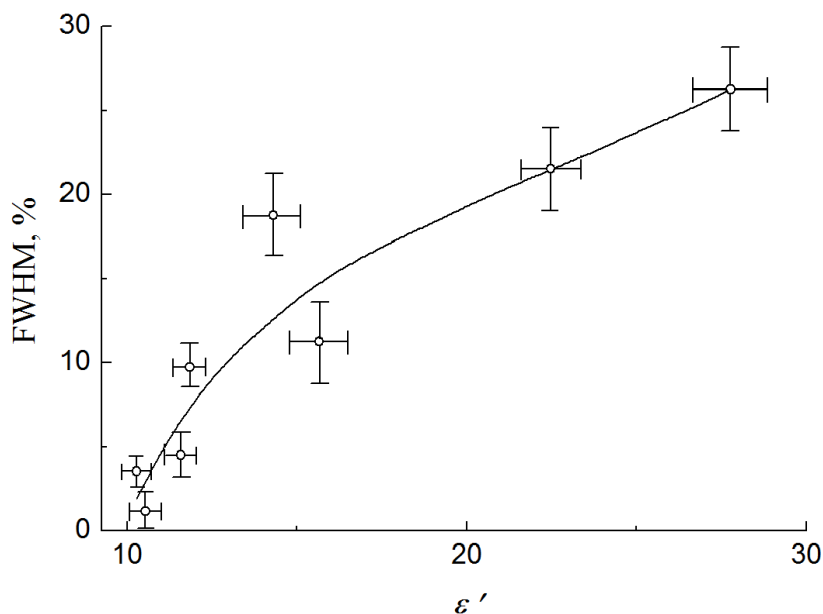


Рис. 6 – Залежність енергетичної роздільної здатності детекторів гамма-випромінювання від дійсної частини діелектричної проникності кристалів.

параметра внаслідок зовнішніх впливів, відображає відповідну зміну внеску в комплексну діелектричну сприйнятливність тих локалізованих станів, що обумовлюють фрагмент $\Delta\ell_i$ діаграми фотодіелектричного ефекту.

Встановлено, що при додатковому збудженні зразка білим світлом розширюється енергетичний спектр локалізованих станів носіїв. У більшості випадків таке розширення становило 0,1 еВ. Зміна з енергією локалізованого стану зазначеного параметра $(\ell\lambda)_i$ описується дзвіноподібною функцією. Вид цієї функції пояснено поєднанням впливів на фотодіелектричний ефект двох чинників: залежності від енергетичного положення поляризованості станів та зміною їхньої заселеності з довжиною хвилі світла внаслідок його поглинання.

У четвертому розділі «Вплив легування та механічної обробки поверхні на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів $A^{IV}B^{VI}$ » наведено результати дослідження впливу легування кристалів ZnSe (домішкою Cr) та CdWO₄ (домішкою Bi) на їх діелектричні властивості, а також впливу механічної обробки на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів ZnSe та Cd_{1-x}Zn_xTe.

Загальновідомо, що введення легуючих домішок широко використовується для управління електричними та фотоелектричними властивостями кристалів різного складу. У той же час цьому способу управління властивостями притаманні свої недоліки, пов'язані, зокрема, з труднощами в передбаченні взаємодії атомів домішок з власними дефектами кристала. Тому існує потреба в експериментальному дослідженні впливів домішок на зазначені властивості в залежності від природи домішок, складу та умов вирощування кристалів.

Встановлено, що легування атомами Cr з концентрацією 10^{18} см^{-3} чинить суттєвий вплив на низькочастотні діелектричні властивості вирощених з розплаву кристалів ZnSe. При цьому досягаються однорідність діелектричних властивостей в межах усього кристалічного злитка і суттєво зменшується (порівняно з нелегованими кристалами) величина діелектричних втрат. Так, кристали ZnSe:Cr у порівнянні з ZnSe характеризуються незначною залежністю частин комплексної діелектричної проникності від частоти та положення зразка у кристалічному злитку. До того ж леговані кристали не виявляють помітної температурної залежності ε' , хоча залежності $\varepsilon''(T)$ і мають експоненційний характер. Останні залежності характеризуються декількома енергіями активації, проте їх кількість в два-три рази менша, ніж у кристалів нелегованих. Зазначені особливості діелектричних властивостей кристалів ZnSe:Cr пов'язані з домінуючим впливом легуючих атомів на утворення точкових дефектів, як простих, так і асоціатів, при кристалізації з розплаву.

Досліджено вплив легування атомами Bi з концентрацією $10^{-3} \text{ мас.}\%$ та високотемпературного відпалу в водневій атмосфері на оптичні та діелектричні властивості кристалів CdWO_4 , вирощених методом Чохральського. Встановлено, що легування призводить до суттєвого зменшення коефіцієнту пропускання світла в широкому інтервалі довжин хвиль (300 – 900 нм). Крім того, відпал у водневій атмосфері впливає на коефіцієнт пропускання у цьому спектральному інтервалі. Причому у випадку легованих кристалів ця величина зменшується після відпалу у 2 рази. У той же час відпал практично не впливає на спектр пропускання нелегованих кристалів.

Дослідження спектрів термостимульованої провідності та люмінесценції в інтервалі температур 70 – 320 К показали, що ці спектри докорінно відрізняються у нелегованих і легованих кристалах CdWO_4 . Зокрема, у той час як в спектрах нелегованих кристалів спостерігаються 6-7 максимумів, у спектрах кристалів легованих міститься лише один відносно широкий максимум. Описані відмінності термоактиваційних процесів в легованих та нелегованих кристалах пояснюються створенням за участю легуючих атомів і власних дефектів низки пасток носіїв, що визначають ці процеси.

Встановлено, що легування Bi та відпал у водневій атмосфері докорінно змінюють діелектричні властивості кристалів CdWO_4 в низькочастотній області. Зокрема, внаслідок легування в цій області спостерігається сильна дисперсія комплексної діелектричної проникності. Така ж дисперсія, але дещо слабша спостерігається і після відпалу. Водночас відпал практично не впливає на частотну залежність частин комплексної діелектричної проникності легованих кристалів. Зазначимо, що подальше тривале (півтора року) зберігання нелегованих кристалів в звичайних умовах призводить до відновлення їхніх початкових діелектричних властивостей. Властивості легованих кристалів не змінюються з часом.

Сильний вплив високотемпературного відпалу в водневій атмосфері на діелектричні властивості кристалів пояснюється збільшенням концентрації власних дефектів, зокрема вакансій кисню V_o до рівня, при якому дефекти

утворюють кластери. Наприклад, після відпалу в водні можливе формування кластерів WO_{3-x} , які утворюються при відновленні вольфраму до п'ятивалентного стану. Оскільки дефекти у складі кластера відрізняються один від одного зарядовим станом, ці дефекти приймають участь у стрибковій поляризації. Тривале зберігання на повітрі, безумовно, призвело до зниження концентрації вакансій кисню V_o і, як наслідок, до зникнення утворених за участю них кластерів. Електронні стрибки між дефектами в складі кластерів спричиняють аномально високу поляризуємість кристалів $CdWO_4$, яка нами спостерігалась вперше. Характерною рисою легованих Ві кристалів CWO є також те, що кластери власних точкових дефектів в них породжені домішковими атомами. Внаслідок цього вакансії V_o , що виникають при відпалі у водні, не чинять істотного впливу на розміри кластерів.

Дослідження впливу механічної обробки поверхні на діелектричні властивості кристалів становить інтерес з огляду на виникнення при такій обробці різноманітних дефектів структури та пружних напружень в приповерхневій області, а отже підсилення електронних процесів, що протікають в цій області.

Встановлено, що індукована локальним деформуванням кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$ неоднорідність електрофізичних та фотоелектричних властивостей обумовлена не лише створеними цією дією дефектами та пружними полями, але і початковою системою дефектів. При цьому з часом відбувається релаксація системи дефектів та механічних полів, що відбивається і на їх електрофізичних властивостях.

Шліфування, полірування та сколювання з хімічною поліровкою суттєво впливають на спектральні залежності діелектричних параметрів кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$: відбувається перерозподіл висот власного та домішкового максимумів, спостерігається зсув домішкового максимуму в область довгих хвиль. Причому, еволюція зазначених залежностей відбувається послідовно в напрямку «сколювання з хімічним травленням» – «полірування» – «шліфування». Виявлено, що механічна обробка чинить істотний вплив на локалізовані стани носіїв з широким спектром енергій. Встановлений вплив механічної обробки на спектральні залежності діелектричних параметрів кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ і $ZnSe$ зумовлений зміною дефектної структури і внутрішніх фізичних полів і, як наслідок, енергетичного спектра локалізованих станів носіїв в кристалах.

У п'ятому розділі «Вплив електромагнітного випромінювання на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів $A^{IV}B^{VI}$ » наведено результати дослідження впливу електромагнітного випромінювання з різною енергією квантів на електрофізичні та фотоелектричні властивості кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$, а також композитів на основі кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$.

З ціллю розробки нових негомогенних кристалічних матеріалів з регульованими електрофізичними властивостями для застосування у фоточутливих електронних пристроях було отримано об'ємні композитні матеріали на основі епоксидної смоли LH288 та кристалічного наповнювача

складу $Cd_{1-x}Zn_xTe$, що характеризувався високою фотопровідністю та питомим електроопором. Розмір кристалітів складав $d_1 = 130$ мкм в зразках першого типу і $d_2 = 370$ мкм у зразках другого типу. Також дослідження проводили на композитних зразках, що склалися з каучуку та кристалічного наповнювача складу $ZnSe$ та $ZnSe(Al)$ з концентрацією домішки алюмінію на рівні 0,005 ат. %.

Встановлено, що зі зростанням частоти електричного поля у діапазоні (10 – 1000) Гц збільшується величина діелектричної проникності композитів з кристалітами $Cd_{1-x}Zn_xTe$ як розміру d_1 , так і розміру d_2 . Показано, що в діапазоні частот електричного поля ($10^3 - 10^5$) Гц комплексна діелектрична проникність композитних матеріалів з кристалітами $Cd_{1-x}Zn_xTe$ порівняно з чистою епоксидною смолою відзначається значною чутливістю до слабого немонохроматичного фотозбудження білим світлом інтенсивністю (10 – 100) мВт/см². Зазначимо, що інерційність змін комплексної діелектричної проникності композитних матеріалів з кристалітами $Cd_{1-x}Zn_xTe$ під впливом імпульсів немонохроматичного білого світла є невеликою, порядку одиниць секунд. Встановлено особливості дзеркального та дифузного відбиття світла композитів з кристалітами $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Зазначені матеріали характеризуються вищим дифузним відбиттям світла порівняно з чистою епоксидною смолою.

Встановлено, що комплексна діелектрична проникність композитів на основі каучуку та кристалітів $ZnSe(Al)$ істотно змінюється під дією немонохроматичного фотозбудження білим світлом інтенсивністю 100 мВт/см². Причому найбільших абсолютних значень ці зміни досягають за частоти електричного поля $10^3 - 10^4$ Гц у випадку композитів на основі кристалітів, що мали найбільшу електропровідність. Крім того, зазначені зміни діелектричної проникності мають як позитивний, так і негативний знак. Виявлено, що спектральні залежності приростів обох частин комплексної діелектричної проникності мають максимум ~ 700 нм, що не характерно для кристалів $ZnSe$. Встановлено, що в діапазоні частот електричного поля ($10^2 - 10^4$) Гц вплив рентгенівського випромінювання потужністю дози 200 мР/год на зразки композитного матеріалу на основі каучуку та кристалітів $ZnSe(Al)$ приводить до помітних змін їх комплексної діелектричної проникності, що мають як позитивний, так і негативний знак. Важливо, що найбільші зміни комплексної діелектричної проникності під дією рентгенівського випромінювання спостерігаються за частоти електричного поля 1 кГц і саме для зразків композитів на основі кристалітів $ZnSe(Al)$ з найбільшою електропровідністю, як і у дослідах з немонохроматичним фотозбудженням.

Встановлені особливості електрофізичних та фотоелектричних властивостей композитних матеріалів з кристалітами складу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe(Al)$ пов'язуються з визначальною роллю локалізованих станів носіїв заряду на поверхні кристалітів в композиті.

Відомо, що електрофізичні та фотоелектричні властивості високоомних негомогенних кристалічних матеріалів, а також характеристики електронних приладів на їх основі можуть суттєво змінюватись під дією іонізуючого

випромінювання експозиційної дози від одиниць до 10^6 та більше рентген. Проте вплив іонізуючого випромінювання експозиційної дози порядку сотень мікрорентген на електрофізичні та фотоелектричні властивості високоомних негомогенних кристалічних систем є мало дослідженим.

Встановлено, що потік іонізуючого випромінювання ізотопу ^{137}Cs дуже низької експозиційної потужності дози, що не перевищує 700 мкР/годину, істотно впливає на комплексну діелектричну проникність кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ у низькочастотній області. До того ж, при такому радіаційному впливі не спостерігаються зміни електроопору даних кристалів постійному струму. Треба зазначити, що середні значення абсолютних величин змін обох частин комплексної діелектричної проникності під впливом зазначеної експозиційної дози радіаційного випромінювання зменшуються з частотою вимірювального електричного поля в діапазоні ($10^1 - 10^5$) Гц. Крім того, даний вплив супроводжується зміною енергетичного спектра локалізованих станів носіїв заряду у досліджених кристалах: зникають стани із глибиною залягання $E_v+0,13$ еВ, $E_v+0,47$ еВ та $E_v+0,52$ еВ, але з'являються стани з глибиною залягання $E_v+0,24$ еВ. Встановлені особливості впливу рентгенівського випромінювання експозиційної дози до 700 мкР/годину на кристали $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ пов'язуються в першу чергу із реакцією зв'язаних носіїв заряду на дію високоенергетичних квантів електромагнітного випромінювання. В цьому важливу роль відіграє складна система точкових дефектів, що утворилась при зростанні кристалу з розплаву внаслідок нестехіометрії складу, а також зміна стану комплексів дефектів під впливом рентгенівських квантів.

Більш широке практичне застосування високоомних негомогенних кристалічних систем складу $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ стримується складністю управління їх дефектно – домішковим складом, що визначає їх електрофізичні та фотоелектричні властивості. Для зазначеного управління нерідко використовують різноманітні технології відпалу даних кристалів за високих температур, що також може призводити до генерації нових дефектів і зміни стану ростових дефектів структури. Тож відпал кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ у НВЧ полі без суттєвого збільшення їх температури є більш переважним для рішення вказаної задачі.

Встановлено, що НВЧ – відпал при частоті 2,45 ГГц та середній потужності 100 Вт кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ тривалістю не більше 10 хвилин призводить до зміни їх комплексної діелектричної проникності, що збільшується з часом відпалу. Комплексна діелектрична проникність кристалів, які характеризуються початковим значенням діелектричної проникності близьким до відомого з літературних джерел з ростом часу відпалу незначно монотонно збільшується. Це може пояснюватись тим, що такі кристали характеризуються невеликою кількістю власних дефектів і вони не чинять суттєвого впливу на початкову величину діелектричної проникності таких кристалів. Вплив же НВЧ відпалу призводить до незначного збільшення дефектності зразка, що відображається на величині його ϵ^* , але не призводить до змінення енергій локалізованих станів. В той же час, зразки

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, що мали аномально високе початкове значення комплексної діелектричної проникності, характеризувались суттєвим зменшенням ϵ^* з часом дії НВЧ випромінювання і суттєвою зміною енергій локалізованих станів. Виявлено, що такі кристали мали значну дисперсію ϵ^* завдяки стрибковій електропровідності. Змінення лише низькочастотної ділянки діаграми Коул – Коула після НВЧ відпалу даних кристалів також свідчить на користь зміни системи точкових дефектів внаслідок зазначеного впливу.

Встановлено ефект «малих доз» для кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в області експозиційних доз рентгенівського випромінювання (0 – 60) Р. Виявлені особливості впливу ультрамалих доз рентгенівського випромінювання на електрофізичні властивості кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ р – типу. Так, зменшення комплексної діелектричної проникності кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в області (10 – 40) Р викликана зменшенням нерівноважності системи кристалічних дефектів, що, видимо, пов'язано зі зменшенням концентрації атомів Те і, як наслідок, заряджених дефектів, утворених вакансіями Cd, які і породили акцепторні рівні в забороненій зоні кристала. При цьому рівень Фермі зміщується в бік середини забороненої зони кристала, кількість дірок у горбах валентної зони зменшується, потенціальні бар'єри рельєфу стелі валентної зони збільшуються, що і викликає зменшення комплексної діелектричної проникності. При збільшенні поглиненої дози від 40 до 60 Р спостерігається вплив радіаційних дефектів, що утворюють у забороненій зоні акцепторні стани, рівень Фермі зміщується ближче до стелі валентної зони, індукуючи зворотні процеси, що призводять до збільшення комплексної діелектричної проникності кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

У шостому розділі «Структура, морфологія поверхні та електрофізичні властивості багатокомпонентних покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf» наведено результати дослідження покриттів WC, отриманих іонно-плазмовим методом та покриттів з високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf, створених вакуумно-дуговим методом.

Багатокомпонентні покриття різного складу вже знайшли практичне застосування, хоча все ще залишаються відкритими питання розробки технології отримання даних покриттів з заданими фізичними властивостями, а певні фізичні властивості багатокомпонентних покриттів, наприклад, електрофізичні, все ще мало досліджені. До того ж умови синтезу багатокомпонентних покриттів, як правило, є нерівноважними, що, очевидно, призводить до утворення негомогенних кристалічних систем і має науковий інтерес.

В Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» розроблено та реалізовано в дослідній установці метод формування багатокомпонентних, багаточарових покриттів шляхом розпилення численних катодів-мішеней, виготовлених з окремих компонентів покриття. Дана установка є різновидом інверсних магнетронних систем. Перевагами зазначеної технології є те, що вона дозволяє контролювано

змінювати в широких межах склад створюваного покриття, середню енергію і щільність потоку осаджених іонів та атомів шляхом управління технологічними параметрами процесу осадження. За цією технологією на металевих підкладках з бронзи БрАЖ9-4 і нержавіючої сталі 12ХН10Т було отримано покриття карбиду вольфраму товщиною 4 – 9 мкм, що активно застосовується у машинобудуванні і виробництві інструментів. Встановлено, що основна складова отриманих покриттів є нестехіометричним карбідом вольфраму WC_{1-x} . Причому у покриттів з найбільшою товщиною (8,8 мкм) спостерігається текстура. Виявлено, що для мікроструктури кристалітів текстури характерний розмір блоків становить близько 30 нм, а викривлення ґратки – 0,003 нм. Встановлено, що для центральної частини досліджених зразків покриття WC порівняно з його периферійними областями характерні кристаліти меншого розміру. Визначено, що морфологія поверхні досліджених покриттів WC залежить від матеріалу підкладки, якості обробки її поверхні, а також енергії іонів при підготовці її поверхні до формування покриття.

Встановлено, що електроопір R системи підкладка – покриття WC характеризується істотно нерівномірним розподілом вздовж зразка, як для бронзової, так і сталевий підкладок. Причому різкі зміни R спостерігаються в межах областей протяжністю близько декількох часток міліметра, що на два і більше порядків перевищує характерний розмір кристалітів.

Досліджено вплив неконтрольованого легування хімічними елементами зі складу конструкції технологічної камери на структуру та мікротвердість покриттів WC отриманих зазначеним вище методом. Покриття були сформовані на підкладках зі сталі 14Х1, їх товщина становила 3-6 мкм. Визначено, що вміст W в зразках змінюється в широких межах і зі зменшенням цього вмісту зростає вміст заліза. Вміст хрому несуттєво змінюється від зразка до зразка, а нікель і титан виявлені лише в деяких зразках. Встановлена наявність у складі покриттів таких елементів як Fe , Cr , Ni та Ti , на нашу думку, пов'язана з тим, що при формуванні покриттів WC також розпоршувались електричні екрани зі сталі 12Х18Н9Т. Виявлено, що досліджені покриття мають структуру кубічного карбиду вольфраму з досить малим розміром області когерентного розсіювання. При цьому в усіх зразках параметр решітки карбиду вольфраму значно перевищує відоме з літературних джерел значення $a = 4,215\text{Å}$, що може бути пов'язано з наявністю в покриттях механічних макронапружень. Встановлено, що зі збільшенням області когерентного розсіювання спостерігається тенденція до зменшення періоду решітки та мікротвердості досліджених зразків покриттів WC . Наведені дані, очевидно, свідчать про визначальний вплив не лише складу, але і суттєво нерівноважних умов формування на структуру та мікротвердість покриттів WC .

Нітридні покриття, в тому числі і типу високоентропійних сплавів (ВЕС), також знані своїм практичним застосуванням у машинобудуванні. Проте питання однорідності їх фізичних властивостей, зокрема електрофізичних, недостатньо вивчені і це складає як науковий так і практичний інтерес. Крім того, важливим залишається питання пошуку нових типів нітридних сполук,

технологій їх формування та модифікації їх фізичних властивостей. До перспективних нітридних покриттів відносяться і досліджені ВЕС типу Ti-V-Zr-Nb-Hf, що були отримані вакуумно-дуговим напиленням. Встановлено, що даний сплав є твердим розчином на основі ОЦК решітки, а в стані нітридного покриття – ГЦК – кубічної. Для нітридного покриття ВЕС складу Ti-V-Zr-Nb-Hf зафіксовано високі значення твердості, що досягають 60 ГПа. На поверхні досліджених зразків виявлено включення різного типу, що різняться між собою складом, характерним розміром та формою. Включення I та II типу мали правильну форму, розміри від одиниць до десятків мікрометрів, характеризувались більшим вмістом Zr ніж у матриці зразка на 5 – 15 % і 30 – 90 %, відповідно. Включення III типу мали неправильну форму, розміри в межах від 50 до 100 мкм і на 50 – 90 % менший вміст Zr порівняно з матрицею зразка. Координатні залежності електроопору змінному струму вздовж зразка мають ділянки різких змін у межах лінійних областей довжиною 0,2 – 0,5 мкм, що спостерігаються на координатних залежностях добротності значно частіше. Встановлено, що щільність вищезгаданих включень на поверхні зразків, як правило, корелює з електроопором, але не з добротністю зразка. Це пояснюється тим, що координатні залежності зазначених параметрів досліджених зразків переважно визначаються морфологією поверхні, де суттєву роль відіграє щільність включень, а також рельєфні виступи та впадини поверхні зразка. Дослідження хімічного складу зразків ВЕС типу Ti-V-Zr-Nb-Hf виявило суттєву неоднорідність цього параметру вздовж їх поверхні, що, видимо, також чинить вплив на отримані координатні залежності їх електрофізичних параметрів.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена науково-технічна проблема розроблення фізичних основ формування електричних та фотоелектричних властивостей високоомних кристалів $A^{II}B^{VI}$, а також електричних властивостей покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf.

Основні наукові і практичні результати можна сформулювати у вигляді таких узагальнюючих висновків:

1. Встановлено закономірні зміни дійсної та уявної частин низькочастотної діелектричної проникності в межах усього об'єму кристалічних зливків $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$. Показано, що величина таких змін визначається відхиленням складу від стехіометричного й утвореними внаслідок цього власними дефектами структури і отже слугує критерієм стабільності характеристик сенсорів іонізуючого випромінювання, виготовлених з зазначених зливків.

2. Встановлено, що вплив легуючих домішок на показники діелектричних властивостей кристалів визначається не лише типом домішок, але й хімічним складом кристала, умовами росту та іншими чинниками, що впливають на утворення точкових дефектів. Зокрема, легування атомами Cr з концентрацією 10^{18} см^{-3} суттєво покращує просторову однорідність складових низькочастотної

діелектричної проникності при одночасному зниженні на (80 – 90)% рівня дисипації енергії поля в вирощених з розплаву кристалах ZnSe. У той же час легування атомами Ві (10^{-3} мас.%) кристалів CdWO₄ навпаки призводить до підвищення на порядок і більше рівня дисипації енергії поля, що пов'язано з виникненням області сильної дисперсії діелектричної проникності. Зазначені особливості впливу легування на електрофізичні властивості кристалів зумовлені взаємодією атомів домішок з різноманітними власними дефектами кристала.

3. Показано, що збільшення концентрації приповерхневих локалізованих станів носіїв заряду шляхом створення композитів на основі кристалів A^{IV}B^{VI} та діелектричної матриці розширює можливості управління характеристиками фотодіелектричного ефекту в матеріалах при дії як світла, так і рентгенівського випромінювання.

4. Встановлено, що дія ультрамалих (10 – 40 Р) експозиційних доз гама-випромінювання забезпечує стабілізацію дійсної та уявної частин діелектричної проникності кристалів Cd_{1-x}Zn_xTe в низькочастотній області завдяки дифузії та подальшому захопленню точкових дефектів на гетери. З іншого боку, створення нерівноважного стану системи власних дефектів внаслідок відхилення складу від стехіометричного зумовлює чутливість зазначених кристалів до гама-випромінювання з експозиційною потужністю дози усього 700 мкР/годину. При цьому усереднені по сукупності зразків абсолютні значення змін частин комплексної діелектричної проникності, спричинених випромінюванням, закономірно зменшуються з частотою.

5. Встановлено, що наслідком суттєво нерівноважних умов формування покриттів іонно-плазмовим методом є утворення покриттів карбиду вольфраму як нестехіометричних систем WC_{1-x}. У структурному відношенні ці матеріали є наноструктурованими та містять блоки з характерним розміром 30 нм. При товщині 8,8 мкм покриття мають текстуру (100). У випадку орієнтації електричного поля перпендикулярно поверхні покриттів спостерігається крупномасштабна неоднорідність їхніх електрофізичних властивостей. Встановлена взаємна кореляція мікротвердості, сталої кристалічної решітки та області когерентного розсіювання рентгенівських промінів для багатокомпонентних покриттів на основі WC. Це надає можливість направлено покращення як механічних, так і електричних властивостей зазначених покриттів шляхом оптимізації їхнього складу та умов формування.

6. Встановлено, що макроскопічна неоднорідність електрофізичних властивостей нітридних покриттів на основі високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf, отриманих вакуумно – дуговим методом, визначається включеннями, які виникли при формуванні покриттів і різняться між собою складом та характерним розміром. Тому головною умовою отримання однорідних за своїми електрофізичними властивостями покриттів Ti-V-Zr-Nb-Hf є усунення фізико-технологічних чинників формування зазначених включень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Chugai O.O., Poluboiarov O.O., **Oleynick S.V.**, Sulima S.V., Voloshin O.O., Zaitsev R.V., Kirichenko M.V. Scanning photodielectric spectroscopy of CdZnTe crystals under additional non-monochromatic illumination. – *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2021. – V. 328. – Article 112772. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112772> (Q2, Scopus).
2. Poluboiarov O.O., Chugai O.N., Oleynick S.V., Sulima S.V. Dielectric properties and quality of Cd_{1-x}Zn_xTe crystals for gamma radiation detectors. – *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – V. 244. – P. 233 – 236. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.052> (Q2, Scopus).
3. Horban V.F., Serdiuk I.V., Chuhai O.M., Voloshyn O.O., **Oliinyk S.V.**, Veselivska H.H., Danylenko M.I., Sliusar D.V., Stolbovyi V.A., Kalahan O.S. Specific Features of the Structure and Electrophysical Characteristics of Nitride Coatings Based on Ti–V–Zr–Nb–Hf High-Entropy Alloy. – *Materials Science*. – 2021. – V.57, no. 3. – P. 428 – 433. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00557-8> (Q3, Scopus).
4. Kolesnyk V.P., Chuhai O.M., Kalakhan O.S., Voloshyn O.O., **Oleinyk S.V.**, Veseliv's'ka H.H. Structure and Properties of Ionic-Plasma WC Coatings. – *Materials Science*. – 2019 – V.55, no.2. – P. 220 – 224. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00292-1> (Q3, Scopus).
5. Chugai O.M., Gerasimenko A.S., Komar' V.K., Nalivaiko D.P., **Oleinik S.V.**, Podshivalova O.V., Sulima S.V., Novokhatskaya T.N. Effect of dopant Cr ions on the dielectric properties of melt-grown ZnSe crystals. – *Physics of the Solid State*. – 2013. – V. 55. – P. 60 – 63. <https://doi.org/10.1134/S1063783413010113> (Q3, Scopus).
6. Abashin S.L., Komar V.K., Nalyvaiko D.P., **Oleynick S.V.**, Puzikov V.M., Rom M.A., Sulima S.V., Chugai O.N. Influence of dielectric relaxation on the contactless resistivity measurement of semiinsulating CdZnTe crystals. – *Telecommunications and Radio Engineering* (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). – 2011. – V. 70, No 13. – P. 1203 – 1215. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v70.i13.80> (Q3, Scopus).
7. Komar V.K., Sulima S.V., Chugai O.M., Abashin S.L., Nikolov O.T., **Oleinik S.V.**, Puzikov V.M., Terzin I.S., Yatsina Y.A. Effect of ionizing radiation in ultrasmall doses on dielectric properties of CdZnTe crystals with anomalously high polarizability. – *Technical Physics Letters*. – 2011. – V. 37.

- P. 589 – 592. <https://doi.org/10.1134/S106378501107008X> (Q3, Scopus).
8. Chugai O.M., Gerasimenko A.S., Komar' V.K., Morozov D.S., **Oleinik S.V.**, Puzikov V.M., Rizak I.M., Sulima S.V. Dielectric properties of ZnSe crystals grown from melt. – *Physics of the Solid State*. – 2010. – V. 52. – P. 2467 – 2471. <https://doi.org/10.1134/S1063783410120048> (Q3, Scopus).
 9. Poluboiarov O., Chugai O., **Oliinyk S.**, Sliusar D., Sulima S. Effect of low-dose-rate ionizing radiation on the complex dielectric permittivity of CdZnTe crystals. – *Lithuanian journal of physics*. – 2023. – V. 63, no. 1. – P. 35 – 39. <https://doi.org/10.3952/physics.2023.63.1.5> (Q4, Scopus).
 10. Slusar D., Isakov O., Kolesnyk V., Chugai O., **Oliynick S.** Computer Simulation of Abnormal Glow Discharge in Inverse Magnetron Sputtering Systems with Sectioned Cathode Units. – *Springer, Cham*, 2021, October. – P. 311 – 320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_27 (Q4, Scopus).
 11. Chugai O.M., **Oleynick S.V.**, Voloshin O.O., Galkin S.M., Sidelnikova L.Iu., Sosnytska O.O. Influence of Electromagnetic Radiation of Different Quantum Energy on Dielectric Properties of Composites Based on Crystals CdZnTe and ZnSe. – *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – V. 1113. – P. 139 – 150. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_13 (Q4, Scopus).
 12. Chugai O.M., Tupitsyna I.A., **Oleynick S.V.**, Voloshin O.O., Luniov I.V. Influence of Bi doping and high-temperature annealing on optical and dielectric properties of CdWO₄ crystals. – *Functional Materials*. – 2020. – V. 27, № 2. – P. 245 – 251. <https://doi.org/10.15407/fm27.02.245> (Q4, Scopus).
 13. Poluboiarov O.O., Chugai O.N., Voloshin O.O., Zherybyatiev D.P., **Oleynick S.V.**, Sulima S.V. Inhomogeneity of dielectric properties of cadmium zinc-telluride crystals grown from melt. – *Functional materials*. – 2016. – V. 23, № 3. – P. 378 – 381. <https://doi.org/10.15407/fm23.03.378> (Q4, Scopus).
 14. Литовченко Л.В., Колесник В.П., Чугай О.М., Бояркін А.О., Слюсар Д.В., Степанушкін М.П., **Олійник С.В.** Особливості побудови системи електроживлення інверсної магнетронної розпорошувальної системи для формування багатокomпонентних покриттів (спосіб управління процесом розпорошення та його практична реалізація) – *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2019. – № 2 (90). – С. 99 – 107. <https://doi.org/10.32620/reks.2019.2.09> (Категорія А).

15. Чугай О.М., Абашин С.Л., **Олійник С.В.**, Луньов І.В. Вплив механічної обробки поверхні на діелектричні та фотодіелектричні властивості кристалів $A^{II}B^{VI}$. – *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – №3. – С. 73 – 78. <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.3.08> (Категорія Б).
16. Чугай О.М., Полубояров О.О., **Олійник С.В.**, Волошин О.О., Зайцев Р.В., Кіріченко М.В. Макроскопічна неоднорідність оптичних, діелектричних і фотодіелектричних властивостей кристалів ZnSe. – *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 6(166). – С. 54 – 60. <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.6.06> (Категорія Б)
17. Слюсар Д.В., Колесник В.П., Чугай О.М., Литовченко Л.В., Іщенко Є.І., **Олійник С.В.** Вплив попередньої підготовки поверхні підкладок на морфологію двокомпонентних покриттів, отриманих в інверсній магнетронній розпорошувальній системі. – *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2019. – № 1 (153). – С. 79 – 85. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.1.10> (Категорія Б).
18. Литовченко Л.В., Колесник В.П., Чугай О.М., Бояркін А.О., Слюсар Д.В., Степанушкін М.П., **Олійник С.В.** Особливості побудови систем електроживлення інверсної магнетронної розпорошувальної системи для формування багатокомпонентних покриттів (практичні аспекти розробки резистивних ланцюжків у складі генератора плазми). – *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2019. – № 5 (157). – С. 12 – 23. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.5.02> (Категорія Б).
19. Слюсарь Д.В., Колесник В.П., Чугай О.Н., Литовченко Л.В., Степанушкин Н.П., Абашин С.Л., **Олейник С.В.** Вплив різних факторів на морфологію поверхні покриттів типу WC, що осаджені іонно-плазмовим методом. – *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2018. – № 6 (150). – С. 76 – 82. <https://doi.org/10.32620/aktt.2018.6.10> (Категорія Б).
20. Чугай О.М., **Олійник С.В.**, Колесник В.П., Полубояров О.О., Слюсар Д.В., Сулима С.В., Волошин О.О. Діелектричні, оптичні та фотоелектричні властивості кристалів $A^{II}B^{VI}$, вирощених з розплаву: *монографія*. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 191 с.
21. Чугай О.М., Терзін І.С., Комар В.К., Новохатська Т.М., Полубояров О.О., Сулима С.В., **Олійник С.В.**, Шматко О.О. Спосіб вимірювання питомого електроопору високоомних твердих розчинів напівпровідників: пат. на винахід № 76300 Україна МПК (2012) G01R 31/26; заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського, „Харк. авіац.

ін.-т”); Заявл. 09.07.2012; Опубл. 25.10.2012, Бюл. №24. – 8 с.

22. Чугай О.М., Комар В.К., Сулима С.В., Пузіков В.М., Герасименко А.С., Абашин С.Л., **Олійник С.В.**, Морозов Д.С. Спосіб вимірювання питомого електроопору високоомних твердих розчинів напівпровідників: пат. на винахід №90037 Україна, МПК G01R 31/26; заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т»; Заявл. 17.06.2008; Опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6. – 6 с.
23. Чугай О.М., Абашин С.Л., Герасименко А.С., Комар В.К., Новохатська Т.М., Полубояров О.О., **Олійник С.В.**, Сулима С.В. Спосіб визначення фотоактивних центрів в кристалічних матеріалах: пат. на винахід №78882 Україна, МПК (2012) G01N 13/00; заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського „Харк. авіац. ін.-т”. – № u2012 08435; Заявл. 09.07.2012; Опубл. 10.04.2013, Бюл. №7. – 6 с.
24. Галкін С.М., Рибалка І.А., Сосницька О.О., Волошин О.О., Чугай О.М., **Олійник С.В.** Спосіб визначення розподілу електрофізичних неоднорідностей в кристалічному матеріалі: пат. на винахід № 123325 Україна МПК G01J 5/50 (2006.01) та G01N 27/22 (2006.01); заявники й патентовласники Інститут сцинтиляційних матеріалів Національної Академії Наук України і Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"; Заявл. 21.12.2018; Опубл. 17.03.2021, Бюл. №11. – 8 с.
25. Чугай О.М., Абашин С.Л., Пузіков В.М., Комар В.К., **Олійник С.В.**, Сулима С.В. Спосіб визначення розподілу електрофізичних неоднорідностей в кристалічних матеріалах: пат. на винахід № 92595 Україна МПК G01J 5/50, G01N 27/22; заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського „Харк. авіац. ін.-т”; Заявл. 20.06.2007; Опубл. 25.11.2010. – 6 с.
26. Чугай О.М., Терзін І.С., Комар В.К., Охрімівський А.М., **Олійник С.В.**, Полубояров О.О., Сулима С.В., Яцина Ю.А. Спосіб вимірювання експозиційної дози електромагнітного випромінювання: пат. на винахід № 76301 Україна МПК (2012) G01T 1/24; заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського „Харк. авіац. ін.-т”; Заявл. 09.07.2012; Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с.
27. Чугай О.М., Полубояров О.О., **Олійник С.В.**, Волошин О.О., Зайцев Р.В., Кіріченко М.В. Макроскопічна неоднорідність оптичних, діелектричних і фотодіелектричних властивостей кристалів ZnSe. Міжнародна науково-практична конференція “Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering” ICTM-2020: тези доп. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т

ім. М.Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. –С. 21 – 25.

28. Чугай О.М., Волошин О.О., **Олійник С.В.**, Галкін С.М., Сідельнікова Л.Ю., Сосницька О.О. Дослідження впливу електромагнітного випромінювання з різною енергією квантів на діелектричні властивості композитів на основі кристалів CdZnTe і ZnSe. Міжнародна науково-практична конференція “Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering” ICTM-2019 («Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ-2019): Тези доп. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – Том 2. –С. 147 – 150.
29. Chugai O.N., Gavrishuk E.M., Balabanov S.S., **Oleynick S.V.** et. al. Effect of alloying chromium atoms on the defect structure and electrical properties of polycrystalline zinc selenide grown by CVD-method. Abstr. of Int. Conf. “Functional Materials” ICFM – 2011. – Partenit, Crimea, Ukraine, October 3 – 8. – 2011. – P. 153.
30. Komar V.K., Abashin S.L., Chugai O.N., **Oleynick S.V.** et. al. Composition Irregularities and Electrophysical Properties of Melt-Grown CdZnTe Crystals. Int. Conf. on Crystal Growth (ICCG-16) in conjunction with The 14th International Conference on Vapor Growth and Epitaxy (ICVGE-14). – Beijing, China, August 8 – 13. – 2010. – Access mode: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/iccg162010/pic/abstract.zip>
31. Gerasimenko A.S., Komar V.K., Morozov D.S., **Oleynick S.V.** et. al. The influence of Cr alloying atoms on dielectric properties of ZnSe laser crystals. Abstr. Of Int. Conf. “Functional Materials” ICFM – 2009. – Partenit, Crimea, Ukraine, October 5 – 10. – 2009. – P. 341.

АНОТАЦІЯ

Олійник С.В. Фізичні основи формування електричних та фотоелектричних властивостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ і електричних властивостей багатокомпонентних покриттів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла. – Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2023.

Дисертація присвячена проблемі розроблення фізичних основ формування електричних та фотоелектричних властивостей високоомних кристалів $A^{II}B^{VI}$, а також електричних властивостей покриттів WC і високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf. Розроблено комплекс нових методів дослідження, що охоплюють різні складові технологій приготування високоомних кристалів, серед яких метод вимірювання питомого електроопору з урахуванням діелектричної дисперсії, енергетичного спектра локалізованих станів носіїв заряду для окремих зразків та методи визначення розподілу електрофізичних параметрів в межах усього кристалічного зливку. Встановлено та надано пояснення закономірним змінам дійсної та уявної частин низькочастотної діелектричної проникності в межах усього об'єму кристалічних злиwkів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$. Дані закономірності запропоновано використовувати для визначення експлуатаційної стабільності характеристик сенсорів іонізуючого випромінювання, виготовлених із злиwkів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ та $ZnSe$. Вперше встановлено, що введення в кристали $ZnSe$ легуючих атомів Cr з концентрацією 10^{18} см^{-3} суттєво покращує діелектричні характеристики цих матеріалів, зокрема покращує просторову однорідність складових низькочастотної діелектричної проникності при одночасному зниженню рівня дисипації енергії поля на $\approx (80 - 90)\%$. Показано, що легування кристалів $CdWO_4$ атомами Bi ($10^{-3} \text{ мас.}\%$) так само як і високотемпературний відпал в водневій атмосфері зумовлює збільшення їх діелектричної проникності в 15 разів і коефіцієнта діелектричних втрат в (40 – 500) разів в низькочастотній області. Отримано та досліджено нові перспективні для оптоелектроніки композитні матеріали на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$, електрофізичні та фотоелектричні властивості яких визначаються приповерхневими локалізованими станами носіїв заряду кристалітів. Вперше встановлена стабілізація дійсної та уявної частин діелектричної проникності кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ в низькочастотній області під впливом ультрамалих експозиційних доз гама-випромінювання (10 – 40 Р). Експериментально показано чутливість комплексної діелектричної проникності кристалів типу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ до гама-випромінювання з дуже малою експозиційною потужністю дози 700 мкР/годину. Останнє пояснено наявністю суттєво нерівноважного стану власних дефектів структури внаслідок відхилення складу від стехіометричного при зрозтанні з розплаву кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Вперше встановлена кореляція макроскопічної неоднорідності електрофізичних властивостей нітридних

покриттів на основі високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf з щільністю включень, які виникли при формуванні покриттів. Усунення фізико-технологічних факторів формування таких включень необхідне для формування однорідних за електричними властивостями нітридних покриттів на основі високоентропійного сплаву Ti-V-Zr-Nb-Hf. Виявлено кореляційний зв'язок мікротвердості зі сталюю кристалічної решітки та областю когерентного розсіювання рентгенівських промінів багатокомпонентних покриттів на основі WC. Це можна використовувати для цілеспрямованого покращення механічних властивостей і керованої зміни електричних властивостей зазначених покриттів шляхом оптимізації їхнього складу та умов формування.

Ключові слова: діелектрична проникність, коефіцієнт діелектричних втрат, кристали $A^{II}B^{VI}$, покриття WC, нітридні покриття Ti-V-Zr-Nb-Hf, високоентропійний сплав, електричні властивості, фотоелектричні властивості.

ABSTRACT

Oliinyk S.V. Physical basis of formation of electrical and photoelectric properties of $A^{II}B^{VI}$ crystals and electrical properties of multicomponent coatings. – Manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences on the specialty 01.04.07 – Solid state physics. – National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Lviv Polytechnic National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2023.

The dissertation is devoted to the problem of developing the physical foundations of the formation of the electrical and photoelectric properties of high-resistance $A^{II}B^{VI}$ crystals, as well as the electrical properties of WC coatings and the high-entropy Ti-V-Zr-Nb-Hf alloy.

The complex of new methods of research of electrophysical and photoelectric properties of high-resistance crystals has been developed. The regular changes in the low-frequency complex permittivity ε^* in $Cd_{1-x}Zn_xTe$ and $ZnSe$ crystalline ingots were established and explained. The regularities of the effect of doping Cr (10^{18} cm^{-3}) and Bi (10^{-3} wt. \%) on the electrophysical properties of $ZnSe$ and $CdWO_4$ crystals, respectively, were established. New composite materials based on $A^{II}B^{VI}$ crystals were obtained and studied. For the first time, the stabilization of ε^* of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ crystals in the low-frequency region under the influence of ultra-small exposure doses of gamma radiation (10 – 40 R) was established, and their sensitivity of ε^* to gamma radiation (700 $\mu\text{R}/\text{hour}$) was experimentally discovered and explained. For the first time, a correlation between the macroscopic heterogeneity of electrophysical properties and the density of growth inclusions of Ti-V-Zr-Nb-Hf coatings was established. The correlation between microhardness, crystal lattice constant and the region of coherent scattering of WC coatings was revealed.

Keywords: permittivity, dielectric loss coefficient, $A^{II}B^{VI}$ crystals, covering WC, nitride coatings Ti-V-Zr-Nb-Hf, high entropy alloy, electrical properties, photoelectric properties.