

ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ім. В. Є. ЛАШКАРЬОВА
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

СМІРНОВ ОЛЕКСІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 621.315.592; 621.383; 534.29;53.09

**РАДІАЦІЙНО-ПУЧКОВІ ПРОЦЕСИ МОДИФІКАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ CdHgTe CdZnTe
ТА ОКСИДІВ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ (Fe, Cr)**

01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Національна Академія наук України, м. Київ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
старший науковий співробітник
Вербицький Володимир Григорович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»

доктор фізико-математичних наук, професор
завідувач відділу фізики наноструктур
Карбівський Володимир Леонідович,
Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України

доктор фізико-математичних наук
доцент кафедри загальної фізики фізичного факультету
Оліх Олег Ярославович,
Київського національного університету імені Тараса
Шевченка.

Захист відбудеться ____ 2025 р. о 14¹⁵ на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 26.199.01 при Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН
України за адресою: проспект Науки, 41, Київ, 03028.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики
напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України за адресою: проспект
Науки, 45, Київ, 03028. Відгук на автореферат дисертації надсилати на адресу:
03028, Київ, проспект Науки, 45.

Автореферат розісланий « ____ » 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук

О.Б. Охріменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Розвиток електроніки, обчислювальної та телекомунікаційної техніки, енергетики, медицини та інших галузей висунув у розряд актуальних проблем створення нових матеріалів з певними, наперед заданими властивостями. Їм відповідають багатофункціональні нанорозмірні матеріали, композитні та гібридні структури на їх основі, що володіють специфічною сукупністю функцій, яка не реалізується для кожного з компонентів окремо.

Технології створення нових матеріалів відносяться до критичних з точки зору сталого розвитку та прогресу людської діяльності. Серед інших, мова йде про радіаційні та плазмові технології, які мають можливості забезпечити контрольованість та відтворюваність властивостей матеріалів. Науковою основою цих технологій є емпіричні результати взаємодії електронів, іонів, окремих атомів та їх кластерів, плазми, лазерного та гамма-випромінювання з твердим тілом.

Протягом всієї історії розвитку функціональних компонентів електроніки, від вакуумного діода до сучасних високоінтегрованих електронних схем, неодноразово виникало питання про фізичні обмеження щодо подальшого прогресу в цій сфері. На сьогодні практично досягнуті граничні можливості технологій для стандартної електроніки на основі кремнію і актуальним стає пошук нової якості, нового погляду на існуючі підходи та методи на цьому шляху. Кроком вперед тут стає поєднання технологій, їх оптимізація, розробка нових технічних рішень, архітектури, тощо.

У дорожній карті сучасних наукових досліджень та розвитку (The International Technology Roadmap for Semiconductors), з'явився новий розділ «Матеріали для нових дослідницьких приладів» (<http://www.itrs.net>), що вказує на необхідність розробки нових напрямків та нового покоління приладів на основі нових фізичних принципів. Серед них, спінтроніка, надпровідна електроніка, одноелектроніка, молекулярна електроніка та інш. Одною з таких областей є оксидна електроніка - світовий науковий та технологічний напрямок, що ґрунтується на створенні широкого спектру елементів на основі тонкоплівкових, нанорозмірних та низьковимірних структур на основі оксидів, зокрема оксидів перехідних металів. Саме в цій області в роботі отримано принципово нові результати з формування комбінованих нанокompозитних структур на основі оксидів перехідних металів (заліза та хрому), які поєднують фото- і термо-електричні властивості та функції суперконденсатора в єдиній гібридній н/п системі для максимально ефективного перетворення та накопичення сонячної енергії.

Разом з тим, актуальною задачею є пошук способів створення нових функціональних матеріалів та структур н/п електроніки та оптоелектроніки із застосуванням комбінації добре відомих технологічних підходів. У нашому випадку мова йде про розвиток іонно-променевих технологій. Це обумовлює наукову та прикладну актуальність проблеми, яка вирішувалася в даній дисертаційній роботі -

встановлення закономірностей змін структури, елементного складу, фазових, морфологічних, оптичних, фото- та електрофізичних, фізико-механічних властивостей, що відбуваються при обробці н/п матеріалів високоенергетичними пучковими потоками, а також пошук шляхів оптимізації властивостей відповідних структур.

Розвиток активних і пасивних систем дистанційного зондування від рентгеновського, ультрафіолетового (УФ) та до далекого ІЧ (ТГц) діапазонів є критичною технологією України. Отже, в якості об'єктів дисертаційного дослідження були також вибрані н/п потрійні сполуки CdHgTe та CdZnTe . Як відомо, телурид кадмію ртуті (CdHgTe , або $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, КРТ) є детекторним матеріалом інфрачервоної (ІЧ-) оптоелектроніки. З моменту його синтезу у м. Дрогобич українським дослідником Я.І. Шнейдером у 1959 році він широко застосовується для створення мультиспектральних фотонних детекторів для дистанційного зондування, військової та медичної візуалізації, тощо. А сполука CdZnTe є базовою для створення Х/гамма детекторів. У дисертаційній роботі запропоновано нові, науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, сукупність яких є досягненням у розвитку іонного наноструктурування та модифікації потрійної сполуки CdHgTe з метою отримання композитних н/п структур, функціональні властивості яких роблять їх придатними для створення нових мультиспектральних приладів ІЧ та ТГц діапазонів спектру. Крім того, приділена увага пошуку шляхів підвищення ефективності детекторних матеріалів (CdHgTe , CdZnTe) для широкого спектрального діапазону.

Зважаючи на велику різноманітність методів та матеріалів, вочевидь, що науковою основою для досліджень таких систем є виявлення фундаментальних закономірностей та взаємозв'язків між технологічними механізмами формування складної системи, що зумовлюють особливості субструктури/морфології, атомної та електронної будови, фазового складу поверхневих шарів наноструктур та їх довготривалими функціональними властивостями, що визначають сфери застосування.

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

Дисертаційна робота виконана в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України і відповідає основним напрямкам наукової діяльності Інституту. Основні результати отримані в рамках виконання програм та конкурсних науково-технічних тем: Основні результати отримані в рамках виконання програм та конкурсних науково-технічних тем: №ІІІ-7-16 «Розробка нових методів формування функціональних напівпровідникових матеріалів і приладових структур» (шифр ІІІ-10-18) № держреєстрації 0116U003696; «Пошук та створення перспективних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано- та оптоелектроніки» (шифр: ІІІ-41-17) (№ держреєстрації 0117U000642); «Напівпровідникові низьковимірні та нанорозмірні структури для ТГц детектування» (шифр 9/20-Н) (№ держреєстрації 0120U102250).; «Розробка нових методів формування функціональних напівпровідникових матеріалів і приладових структур» (шифр: ІІІ-10-18) (№ держ. реєстрації 0118U000212).

Мета і завдання дослідження Встановлення закономірностей формування наноструктур та нанокомпозитів на основі CdHgTe, CdZnTe, оксидів перехідних металів (Fe та Cr) і фундаментальних взаємозв'язків їх атомної та електронної будови, структури та фазового складу з контрольованими функціональними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **наукові завдання**:

1. Вивчити процеси радіаційно-променевого наноструктурування поверхні епітаксійних шарів потрійної сполуки CdHgTe, вирощеної на підкладках CdZnTe, енергетичними іонами різного типу. Встановити фізичний механізм зміни структури та дефектно-домішкового складу потрійної сполуки CdHgTe та розробити на їх основі методику формування багатофункціональних наноструктур та метало-оксидно-вмісних нанокомпозитів з широким діапазоном функціональних характеристик пов'язаних із технологічними параметрами опромінення.

2. Застосувавши метод радіаційно-променевого наноструктурування до потрійних твердих розчинів CdHgTe, отримати та дослідити нову композитну структуру для мультиспектрального детектування в ІЧ- та суб-ТГц діапазонах. Порівняти з болометричним CdHgTe детектором суб-ТГц випромінювання. Проаналізувати механізми детектування у суб-ТГц/ТГц діапазоні частот детекторів на базі н/п матеріалу CdHgTe при умовах використання антен та у безантенному виконанні.

3. Встановити закономірності процесу покращення функціональних характеристик приладних структур на основі потрійних сполук II-VI (CdHgTe, CdZnTe) шляхом іонно-плазмових обробок (Ar^+ , N^+ , H^+) та плазмо-хімічного осадження захисних/просвітлених покриттів алмазоподібних вуглецевих плівок $a\text{-C:H:N}$. Встановити закономірності росту $a\text{-C:H:N}$, атомної та електронної будови синтезованих функціональних систем $a\text{-C:H:N-Hg(Cd)Te}$, $a\text{-C:H:N-Cd(Zn)Te}$.

4. Встановити закономірності впливу умов реактивного лазерного осадження (RPLD) на функціональні властивості нанокомпозитних систем на основі оксидів перехідних металів (Fe та Cr).

Об'єктом дослідження були гетероепітаксціальні структури на основі телуриду кадмію ртуті та цинку кадмію ртуті і нанокомпозитні структури на основі оксидів заліза та хрому.

Предметом дисертаційного дослідження були процеси синтезу та модифікації функціональних матеріалів на базі CdHgTe, CdZnTe та оксидів перехідних металів (Fe, Cr) шляхом радіаційно-пучкових обробок, встановлення закономірностей зміни електричних, фотоелектричних та оптичних властивостей монокристалів, гетероструктур та композитних шарів у результаті застосування радіаційно-пучкових технологій (РПТ).

В роботі були застосовані наступні РПТ – іонне бомбардування, іонно-плазмові обробки (Ar^+ , N^+ , H^+), плазмо-хімічне осадження та реактивне лазерне осадження.

Методи дослідження, які використані в роботі для вирішення поставлених завдань, включають комплексні експериментальні методики (ефект Холла, імпульсанометрія, спектроскопія фотоструму та фото-ЕРС), оптичні методи характеристики (еліпсометрія, комбінаційне розсіювання світла, ІЧ поглинання), а також вивчення структурних властивостей методом рентгенівської дифракції та морфології поверхні (оптична, атомна силова (АСМ) та сканувальна електронна мікроскопія (SEM)). Були застосовані програмні пакети Mathcad, Origin, FlexPde, IDM, а також аналізатор спектрів EISA та інші.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. На основі комплексних, систематичних досліджень впливу потоків іонів різного типу (B^+ та Ag^+) та енергії (100-140 кеВ) на структуру, фазовий склад, оптичні, електричні та механічні властивості епітаксійних шарів потрійної сполуки твердого розчину $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x=0,223$), вирощеного на підкладках $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x=0,04$) методом рідиннофазної епітаксії, встановлені основні закономірності радіаційно-променевої трансформації їх поверхні та приповерхневого шару. Запропоновано деформаційну модель радіаційно-променевого структурування та перетворень в ансамблях точкових дефектів потрійної сполуки під дією іонного опромінення. Встановлено експериментально явище формування наноструктур на поверхні гетероепітаксійних систем p - $HgCdTe/CdZnTe$ при імплантації іонами Ag^+ та B^+ . Визначено роль просторової геометрії бомбардування у процесах структурування поверхні та перетворення в ансамблях точкових дефектів.

2. Розроблено нелітографічний спосіб формування нанорельєфу та створення функціонального нанокompозиту типу оксид металу-н/п p -(Ag_2O - $Hg(Cd)Te$). Запропоновано модель його формування в результаті релаксації залишкових напружень у модифікованому шарі, індукованих іонним бомбардуванням. Методом ковзного бомбардування Ag^+ отримано зразки нанокompозиту p - (Ag_2O - $Hg(Cd)Te$) з фракталізацією поверхні.

3. Визначено механізм чутливості нанокompозиту p - (Ag_2O - $Hg(Cd)Te$) у суб-ТГц області (140 ГГц) у геометрії «ядро - $Hg(Cd)Te$ /оболонка - Ag_2O », де Ag_2O - паразитний елемент ближнього поля (NFRP, near-field resonant parasitic) з негативною діелектричною проникністю.

4. Проведено комплексне вивчення оптичних властивостей алмазоподібних вуглецевих плівок a - $C:H:N$, визначено область максимального просвітлення системи a - $C:H:N/CdZnTe$ (пропускання $\sim 80\%$), яка відповідає вікну прозорості атмосфери MWIR і дозволяє підвищити ефективність детектування масиву зворотно освітлюваних фотодіодів $Hg(Cd)Te$ на цій ділянці спектру на $\sim 50\%$. Встановлено домінуючу роль іонно-плазмових обробок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x \sim 0,04$) у формуванні виявлених «технологічних» перехідних шарів, що суттєво впливає на ефективність просвітлення ($60 \div 90 \%$) синтезованої оптичної системи a - $C:H:N/ CdZnTe$.

5. Вперше отримано ефект значного зменшення струму витоку (не менше ніж у 10 разів), як результат пасивації бічних поверхонь зразків X/гамма-детекторного матеріалу $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x \sim 0,02$) плівкою a - $C:H:N$. Встановлено, що відбувається

збільшення на порядок величини питомого опору ($10^8 - 10^9$ Ом) досліджуваних зразків $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,02$).

6. Показано, що поєднання в одній структурі нанометрових шарів магнітоелектрика Cr_2O_3 та обмінно-пов'язаного з ним слабого феромагнетика $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ на Si:B^+ призводить до утворення композиту, властивості якого визначаються властивостями вихідних компонентів та умовами RPLD (тиск є робочій камері та температура підкладинки). Нанометричні плівки $\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) демонструють негативний магнітоопір у магнітних полях до 0,7 Т. Водночас для мультишарових систем $\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}/\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ ($0 \leq x \leq 2; 0 \leq y \leq 2$) спостерігається позитивний магнітоопір, а також магнітний гістерезис та ефект перемикування магніторезистивності у слабких магнітних полях (0,22 Т) за кімнатних температур.

7. Розроблено концепцію використання нанокompозитних плівок $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$, як функціонального матеріалу для гібридного фото-термо-електричного (ФТЕ) перетворювача сонячної енергії. Продемонстровано, що різниця температур, яка виникає у результаті структурної (теплової, оптичної) неоднорідності $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ призводить до генерації вихідної напруги. Встановлено ступінь впливу температури підкладинки на інтегральний фотовольтаїчний відгук синтезованих зразків $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ у спектральній області (360 ÷ 1100) нм.

Практичне значення. Отримані у дисертаційній роботі наукові результати загалом сприяють розширенню існуючих уявлень про природу процесів, які відбуваються із структурою твердого тіла за рахунок радіаційно стимульованих ефектів. Узагальненням проведених досліджень стала запатентована розробка способу нелітографічного формування нанорельєфу на поверхні гетероепітаксійної плівки $p\text{-CdHgTe}$ та спосіб просвітлення фотоприймача ІЧ-випромінювання на основі структури $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{Zn}(\text{Cd})\text{Te}$. Запропоновано методику іонно-плазмової (H^+ , N^+ , Ar^+) обробки поверхні $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ та $\text{Cd}(\text{Zn})\text{Te}$ та плазмохімічного осадження захисного/просвітленого $a\text{-C:H:N}$ покриття з метою покращення функціональних характеристик приладних структур на основі потрійних сполук II-VI. Також розроблено методику неруйнівного контролю і тестування деградаційної стійкості $a\text{-C:H:N}$ плівок на основі результатів еліпсометрії та ІЧ-спектроскопії.

Охарактеризовано RPLD зразки оксидів Cr/Fe на кремнії, як прототипи перемикаючого елемента з магнітною пам'яттю із двома логічними станами, які змінюють розподіл намагніченості та знак магнітоопору у малих полях за кімнатних температур. Запропоновано функціональні RPLD матеріал $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ для гібридного ФТЕ сонячного модуля з синергічним ФТЕ явищем. Розроблено концепцію квазітвердотільного суперконденсатора на базі $\text{rGO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$, архітектура якого дозволить збирати та накопичувати енергію в одному функціональному пристрої.

Проведений аналіз механізмів детектування н/п матеріалом $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ у суб-ТГц/ТГц діапазоні частот дозволяє розглядати створення масивів суб-ТГц

детекторів, як при умовах використання резонансних NFRP антен, так і у безантенному виконанні.

Достовірність отриманих результатів, викладених у роботі, забезпечується застосуванням перевірених сучасних експериментальних методів та обладнання, узгодженістю отриманих результатів із сучасними теоретичними моделями фізичних процесів, підтверджуються авторитетом наукових видань, в яких опубліковані результати цієї роботи.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно здійснено вибір наукового напрямку досліджень. Мета та завдання роботи, основні наукові положення та висновки, що складають суть дисертаційної роботи, належать автору та сформульовані особисто. Провідна роль у плануванні та проведенні більшості експериментальних досліджень належить автору дисертаційної роботи. Автор роботи особисто проводив більшість експериментальних досліджень, отримав електрофізичні та фотоелектричні характеристики, провів їх обробку та аналіз. Вимірювання методами рентгенівської дифракції, комбінаційного розсіювання світла, ІЧ-поглинання, електронної та атомно-силової мікроскопії виконувалося співавторами відповідних наукових робіт.

Особистий внесок автора виконаних в співавторстві [3,4,6,7,8,10,16,19,20,25] полягає у висуненні ідей, виборі об'єктів та методів дослідження, а також обробці, аналізі та узагальненні отриманих результатів, розробці фізичних моделей та формулюванні висновків. Автору належить підготовка текстів більшості публікацій. Роботи [4,5,24] виконані автором одноосібно. В роботі [11,12,16,17,19,23,24] автором оптимізовані технологічні обробки досліджуваних структур та запропонована інтерпретація результатів. У роботі [16,21,23] автором описані хімічні методи створення композитних наноструктур.

Основна частина результатів представлена автором особисто на вітчизняних та міжнародних конференціях та наукових семінарах [33-39,41,43].

Результати пройшли апробацію під час доповідей на науковому семінарі «Фізика низьковимірних систем, мікро- та наноелектроніка» та наукових зборах Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Результати апробовані як в Україні так і за її межами: на Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-VI, Чернівці, 2013); на Міжнародній науково-технічній конференції „Сенсорна Елетроніка та Мікросенсорні Технології” (СЕМСТ–2006); на Міжнародній конференції з фізики та технології тонких плівок МКФТТП- XII, Івано-Франківськ - 2013; International Materials Research Congress (IMRC) 2012, 2013, 2014, 2018 Cancun, Mexico; на E-MRS 2017 Spring Meeting, Strasbourg, France; International research and practice conference NANOTECHNOLOGY AND NANOMATERIALS (NANO-2015, Львів; NANO-2017, Чернівці), International Conference on II-VI Compounds (Paris-2015); 2nd International Workshop on Physics and technology of Thin Films.- 2006, Praha, Czech Republic, Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Хімія, фізика та технологія поверхні», Київ, Україна, 2015; International Conference on Extended

Defects in Semiconductors (2006-Halle, 2014-Gottingen); International Congress on Optics and Optoelectronics. - 2005, Warsaw, Poland та інш.

Публікації. В дисертаційній роботі представлено та узагальнено результати досліджень, які виконувались впродовж 2005-2023 років. Основні результати дисертації висвітлено в 48 наукових працях, серед яких 26 статті у наукових фахових виданнях України та інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus; 5 статті у наукових виданнях з Переліку наукових фахових видань України; 6 розділів у закордонній монографіях (індексуються наукометричними базами); 5 Патенти України; 17 публікацій у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій. Серед статей та розділів, 8 статей – в реферованих журналах, віднесених до першого і другого квартилів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago, 5 статті у виданнях 3-го квартиля (Q3) відповідно до класифікації SCImago, 5 статей у виданнях 4-го квартиля (Q4) відповідно до класифікації SCImago.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступної частини, п'яти розділів, які містять основні результати досліджень та загальних висновків. В кінці кожного з розділів також наведено проміжні узагальнюючі висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 375 сторінок, 171 рисунка та 40 таблиць, які розміщені у тексті. Список використаних джерел містить 583 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та завдання, які поставлені для її досягнення, відзначено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, особливий внесок здобувача, а також подано інформацію, щодо апробації результатів проведених досліджень.

У **Розділі 1** дисертаційної роботи проаналізовано літературні дані та досягнення в області застосування радіаційно-пучкових технологій створення та модифікації сучасних функціональних матеріалів мікро- та нанoeлектроніки. Розглянуто фізико-хімічні процеси іонно-променевої, іонно-плазмові технології та впливу концентрованих потоків енергії на т.т, що дозволило сформулювати основний напрямок та мету дисертаційного дослідження.

Проаналізовано підходи щодо отримання функціональних матеріалів сучасної мікро та нанoeлектроніки шляхом модифікації н/п з'єднань CdHgTe, CdZnTe та оксидів перехідних металів (Fe, Cr), формування заданого нанорельєфу поверхні н/п матеріалів іонним бомбардуванням, обробкою низькотемпературною плазмою, плазмохімічним осадженням, нанесенням діелектричних покриттів та лазерною епітаксією оксидів металів.

Підтверджено актуальність теми, яка відповідає сучасному розвитку тонкоплівкової технології в електроніці, що незмінно пов'язано з розробкою нових н/п матеріалів, пошуком нових фізико-хімічних способів і прийомів їхнього одержання та обробки.

Як результат, відбувається розширення можливостей використання іонів і

плазми для модифікації фізико-хімічних властивостей н/п матеріалів і тонкоплівкових гетерокомпозицій на їхній основі, стосовно пристроїв перетворення енергії з підвищеною ефективністю

Другий розділ присвячено вивченню процесів радіаційно-променевого наноструктурування поверхні епітаксійних шарів CdHgTe енергетичними іонами різного типу, встановленню фізичних механізмів зміни структури та дефектно-домішкового складу потрібної сполуки з метою розробки методики нелітографічного формування рельєфу та створення функціонального нанокompозиту типу оксид металу-н/п з широким діапазоном функціональних характеристик, пов'язаних із технологічними параметрами опромінення. Розглянуто процес структуривання та самоорганізації на поверхні зразків $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,223$)/ $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y=0,04$), виготовлених методом рідиннофазної епітаксії, при обробці іонами B^+ та Ag^+ з боку гетерошару. Опромінення проводилося при нормальному ($\theta = 0^\circ$, *normal incidence* (NI)), та кутовому падінні пучка на поверхню ($\theta = 45^\circ$, $\theta = 30^\circ$, *oblique incidence* (OI)). Параметри застосованих режимів опромінення наведено в Таблиці 1.

Дослідження методом АСМ та СЕМ виявили відмінність топографії та протилежний характер пошкоджень гетероплівки CdHgTe під дією опромінення іонами B^+ та Ag^+ (Рис. 1 (а, б)). Це заглиблення діаметр (50 ÷ 120) нм на поверхні, опроміненій B^+ , та однорідний масив наноострівців висотою до 25 нм та діаметром до 35 нм на поверхні, імплантованій Ag^+ .

Таблиця 1. Параметри разупорядкованої області зразків $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,223$)/ $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y=0,04$) [4,14,25]

Тип імплантованих іонів та кут падіння θ ($^\circ$)	B^+ , 0°	Ag^+ , 0°	Ag^+ , 0°	Ag^+ , 45°
Енергія іонів, (кеВ)	100	100	140	140
Доза опромінення, (см^{-2})	3×10^{13}	3×10^{13}	$4,8 \times 10^{13}$	$4,8 \times 10^{13}$
Проективний пробіг R_p , (мкм)	0,22	0,0365	0,045	0,04
Страглінг ΔR_p , (мкм)	0,17	0,024	0,028	0,0186
Максимальне механічне напруження σ , (Па)	$1,4 \times 10^3$	$2,2 \times 10^5$	$2,9 \times 10^5$	$1,28 \times 10^5$
Максимальний рівень легування C_{max} , (м^{-3})	$9,5 \times 10^{23}$	5×10^{24}	$5,25 \times 10^{24}$	$3,38 \times 10^{24}$
Концентрація вакансій C_v , ($\text{N}/\text{\AA}$ іон)	20	4,5	4,67	4,68
Коефіцієнт дилатації β , (м^{-3})	$3,51 \times 10^{-31}$	$1,25 \times 10^{-32}$	$1,25 \times 10^{-32}$	$1,25 \times 10^{-32}$

Для опромінених зразків (Ag^+ , B^+) CdHgTe (для NI режиму) були визначені епюри полів механічних напружень $\sigma(z)$ та розподіл імплантату $C_v(z)$ (1):

$$\sigma(z) = \frac{C_v(z)\beta E}{(1-\nu)}, \quad C_v(z) = \left(\frac{\Phi}{\sqrt{2\pi\Delta z}} \right) \exp \left[-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\Delta z^2} \right], \quad C_v(z, \theta) = \left(\frac{\Phi \cos(\theta)}{\sqrt{2\pi\Delta z}} \right) \quad (1)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона, E - модуль Юнга, z - координата, Φ - густина потоку, R_p - проектований пробіг; $C_v(z)$ - профіль розподілу домішки для NI режиму,

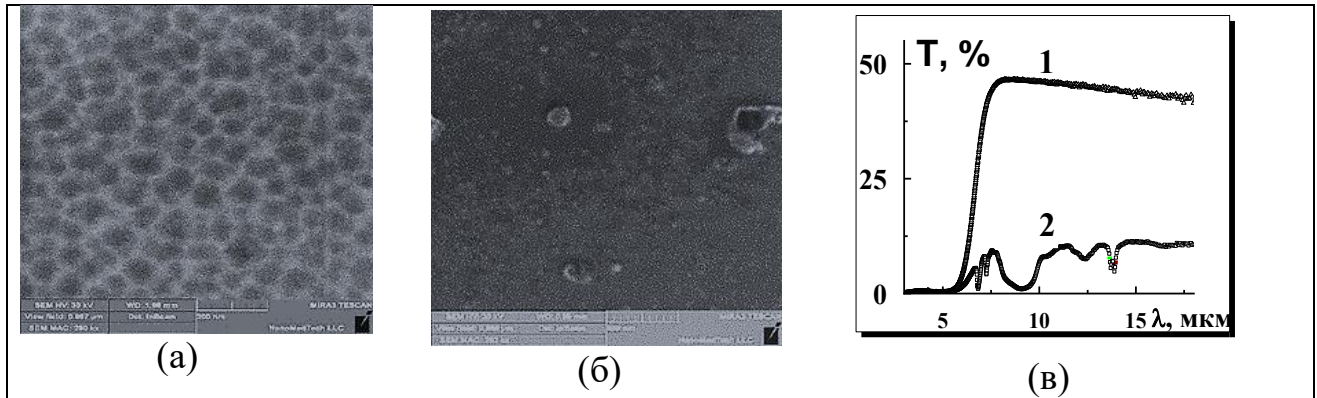


Рис. 1 Електронні зображення поверхні шарів CdHgTe (111) після опромінення (а) B^+ та (б) Ag^+ у режимі (NI). (в) - FTIR спектри оптичного пропускання зразків після імплантації (100 кеВ і $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$): 1 - Ag^+ , 2 - B^+ [18,14,20,22].

$C_V(z, \theta)$ - профіль розподілу домішки для ОІ режиму. Ці данні дозволили встановити межі спотворення кристалічної ґратки ($0,4 \text{ мкм}$ (бор)/ $0,1 \text{ мкм}$ (срібло)) (Рис. 2 (а, б)), характерний розмір якого близький до товщини порушеного шару з аномальними оптичними властивостями, визначеними методом еліпсометрії.

Для пояснення зміни мікроструктури поверхні потрібної сполуки CdHgTe запропоновано дилатаційну модель трансформації дефектно-домішкової структури, яка ініційована іонним опроміненням. Відмінність ефектів пов'язана із знаком деформацій, що вносяться іонами різного розміру до кристалічної ґратки CdHgTe. Імплантація іонами B^+ малого радіусу ($r_{B^+} = 1,17 \text{ Å}$), у порівнянні з $r_{Hg} = 1,76 \text{ Å}$, призводить до стискання пошкодженого шару. Тоді як імплантація сріблом ($r_{Ag^+} = 1,75 \text{ Å}$) призводить до його розтягування.

В результаті дослідження методом рентгенівської дифракції були визначені знак і природа спотворень кристалічної ґратки CdHgTe від введених і від статичних дефектів (див. Рис.2 (в, г)), що дозволило отримати показник дилатації β кристалічної ґратки CdHgTe та максимальні механічні напруження $\sigma_{\text{макс}}$ в області іонного розупорядкування. Значення відповідних величин наведено у Табл. 1.

Комплексне вивчення кривих дифракційного відбиття (КДВ) та результатів ІЧ-пропускання вказало на невідповідність між композиційними (x) (з-н Вегарда) та структурними (а) характеристиками вихідного матеріалу $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x_0 = 0,223$). Величина невідповідності складає: $\Delta x = -0,067$ ($x = 0,223$) та $\Delta a = -0,0029 \text{ Å}$ ($a_0 = 6,4660 \text{ Å}$ за паспортом), що вказує на напружений стан вихідної гетероплівки CdHgTe за рахунок статичних спотворень. ґратка CdHgTe знаходиться під дією деформацій стискання: $\Delta \varepsilon = a_{\text{CdHgTe}} - a_0 / a_{\text{CdHgTe}} = -4,485 \cdot 10^{-4}$ (де $a_{\text{CdHgTe}} = 6,4631 \text{ Å}$ - реальне значення), яка ініційована значною концентрацією власних точкових дефектів V_{Hg} (10^{17} см^{-3}).

Після імплантації Ag^+ ($\theta = 0^\circ$) ми бачимо зсув КДВ у бік менших кутів (Рис. 2 г). Тобто, зникає дефіцит та відбувається зростання параметру кристалічної ґратки, відносно вихідного значення на величину $\Delta a = + 0,0028 \text{ Å}$. Отже процес дилатації відновлює стехіометричність гетерошару CdHgTe. Постімплантаційна термообробка (75°C , 5 год, в атмосфері Ar при 4 Па) призводить до часткової ре-

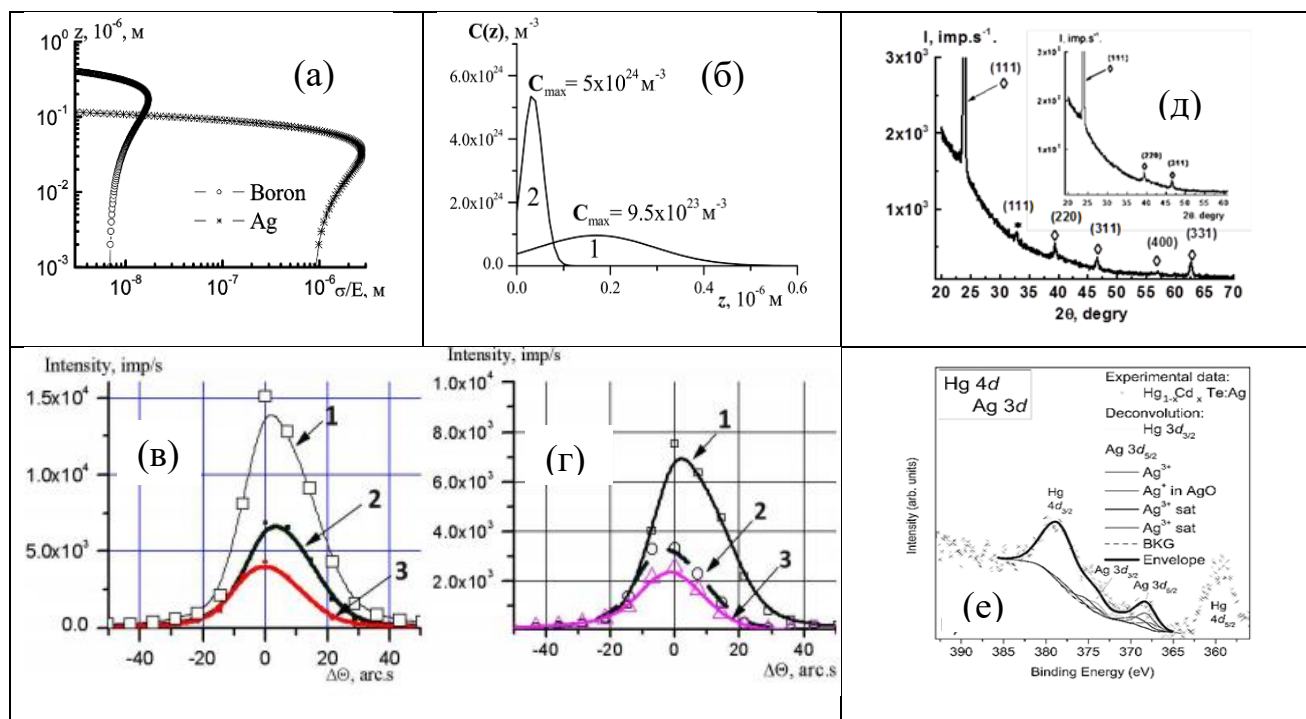


Рис. 2: Профіль деформації (а) та розподілу імплантату (б) опромінених зразків $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$. Відповідні значення напружень та концентрації імплантату наведено у Табл.1; КДВ зразка, опроміненого бором (в) та сріблом (г): 1 - вихідний; 2 - імплантований; 3 – термообробка; (д) - GI XRD та (е) - енергодисперсійний рентгенівський спектр $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$) [13,15,18].

лаксації на пружень порушеного гетерошару CdHgTe . Твердий розчин CdHgTe повертається до стану нестехіометричності (до напружено стиснутого стану) з дефіцитом $\Delta a = -0,0028 \text{ \AA}$.

Для випадку імплантації B^+ виявлена незначна асиметрія КДВ (Рис.2.в). Рівень залишкових деформацій CdHgTe низький, а вплив точкових дефектів взаємно скомпенсований, що корелює з положеннями запропонованої дилатаційної моделі про релаксацію типу «стискання – розтягнення – стискання». Зроблено висновок, що проникнення Ag^+ призводить до зміни термодинамічних параметрів порушеного шару гетероплівки та трансформації його дефектно-домішкової структури.

Цей висновок підтверджується результатами рентгенівського зондування приповерхневого шару досліджуваного матеріалу у ковзній геометрії (GI XRD, кут $\sim 1^\circ$, глибина зондування $< 100 \text{ nm}$) (Рис.2.д). З'ясовано, що після імплантації іонами срібла ($\theta = 0^\circ$) на поверхні p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$) утворюється полікристалічної фази кубічної структури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,20$) [карта ICDD PDF 00-051-1122] з $a = 6,4654 \text{ \AA}$, а також нова оксидна сполука Ag_2O [карта ICDD PDF 00-041-1104] з параметром кристалічної ґратки $a = 4,7263 \text{ \AA}$. На вставці до Рис. 2.д для порівняння наведено дифрактограму p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$), отриману в брегівській конфігурації. Визначено розміри зон когерентного розсіювання для Ag_2O (70 nm) та для CdHgTe (200 nm). Утворення оксиду срібла підтверджено також результатами енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (Рис. 2е).

Отже, введені напруження змінюють фізико-механічні характеристики

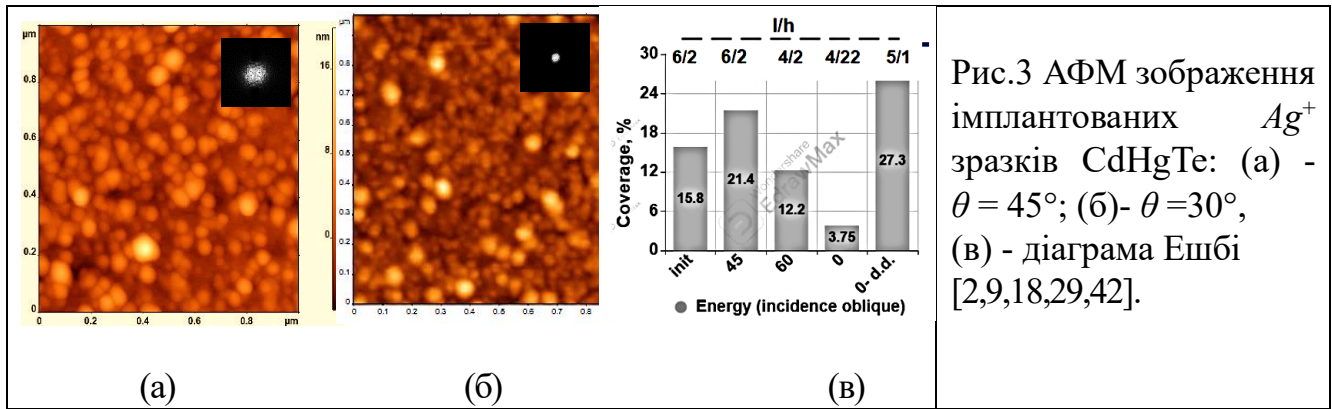


Рис.3 АФМ зображення імпантованих Ag^+ зразків CdHgTe : (а) - $\theta = 45^\circ$; (б)- $\theta = 30^\circ$, (в) - діаграма Ешбі [2,9,18,29,42].

імпантованого сріблом гетерошару CdHgTe . При цьому наслідком стабілізації активованого імпантациєю стану CdHgTe є утворення поліфункціональної системи метал-оксид-н/п: $\text{Ag}_2\text{O-p-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,2$).

Введені напруження змінюють механічні характеристики імпантованого гетерошару $\text{CdHgTe}(\text{Ag}^+/\text{B}^+)$. Дослідження мікротвердості HV імпантованих зразків (Shimadzu HNMV-2000) виявили зміцнення поверхні матеріалу (HV на 12%) для випадку B^+ . Проникнення Ag^+ приводить до зменшення HV на 12%. Це корелює з епюрами розподілу домішки $C(x)$ (Рис. 2а). Для срібла характерним є менше проникнення та більша концентрація вакансій (Рис. 2 б), за рахунок чого і відбувається зменшення HV . Проникнення B^+ , навпаки, дає рівномірний розподіл напружень стискання, як то і зменшення залишкових концентраційних напружень.

Таким чином імпантациа Ag^+ гетерошару CdHgTe змінює енергію пружної деформації системи «розупорядкована область - плівка - підкладинка», що позначається на її рівноважності та проявляється через трансформацію системи дефектів. Оцінка дифузійної здатності імпантованих домішок та власних дефектів продемонструвала, що в порівнянні із бором та сріблом, домінує процес міграції міжвузлової ртуті. Стискання, або ж розтягування не вносить порушення до процесу перескакування мігруючих іонів. Таким чином, наявність неоднорідних механічних напружень і процесу міграції ініціюють спрямоване переміщення атомів та дефектів по кристалічній ґратці імпантованого CdHgTe . Необхідною умовою спрямованого руху у розупорядкованій опроміненій області є наявність градієнту механічних напружень та зсуву у просторі між областю максимальних механічних напружень та глибиною гальмування іонів.

Наступним кроком були проведені дослідження властивостей гетерошарів CdHgTe після опромінення іонами срібла при кутовому падінні пучка на поверхню. Для випадку опромінення Ag^+ ($\theta = 45^\circ$) виявлено, що по всій поверхні CdHgTe відбувається процес структурної самоорганізації з латеральними розмірами структур d ($50 \div 80$) нм та висотою h ($5 \div 10$) нм (Див. Рис. 3.а). Проведений Фур'є аналіз АСМ- зображень підтвердив фракталізацію (FFT образ, вставка до Рис. 3.а) поверхні CdHgTe з просторовими періодами $1/f_1 = 80$ нм та $1/f_2 = 90$ нм. Бомбардування зразка Ag^+ ($\theta = 30^\circ$ Рис. 3б) формує рівномірний масив конічних голок заввишки h ($5 \div 25$) нм і діаметром d ($13 \div 35$) нм без ознак процесу самоорганізації (див. FFT образ на вставці Рис. 3.б).

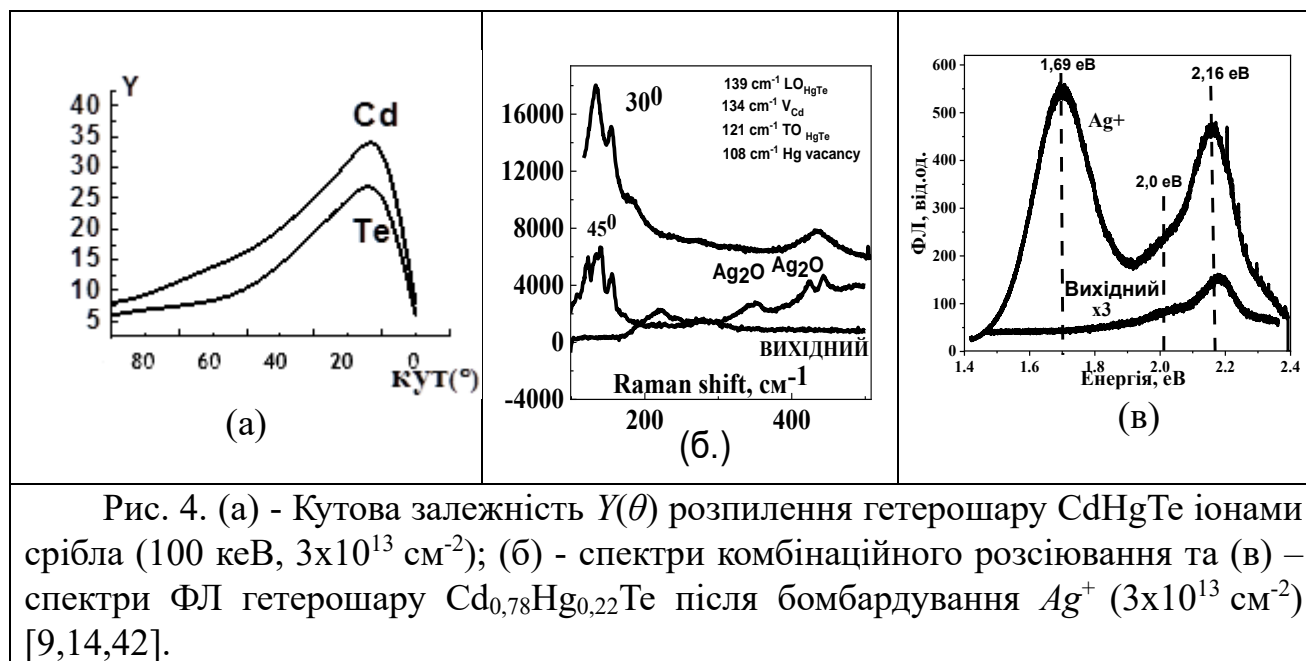


Рис. 4. (а) - Кутова залежність $Y(\theta)$ розпилення гетерошару CdHgTe іонами срібла (100 кеВ , $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$); (б) - спектри комбінаційного розсіювання та (в) – спектри ФЛ гетерошару $\text{Cd}_{0,78}\text{Hg}_{0,22}\text{Te}$ після бомбардування Ag^+ ($3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) [9,14,42].

На основі результатів кількісного визначення показника фрактальної розмірності D поверхні гетерошару CdHgTe (*Gwyddion Power spectrum method*), що враховує латеральні і вертикальні показники рельєфу поверхні (вихідної та опроміненої Ag^+ : 45° ; 30° ; 0° ; $0^\circ_{\text{d.d.}}$) та результатів статистичного звіту (*SPiP Particle & Pore Analysis*) визначено динаміку процесу енергетичної взаємодії Ag^+ з поверхнею гетерошару CdHgTe .

Для характеристики модифікованої поверхні зразків CdHgTe при дозі Ag^+ $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ у дослідженні запропоновано застосувати діаграму Ешбі (Рис. 3.с). А саме, аналіз топологічного параметру (l/h) - співвідношення довжини об'єкта (l , нм) до кінцевої шорсткості (h , нм) поверхні, дозволяє побачити кореляцію між параметром D та характером іонної дії на поверхню гетерошару CdHgTe . Дія іонів Ag ($\theta = 45^\circ$) - збільшується (21,4%) поруватість поверхні CdHgTe при збереженні топології вихідного матеріалу ($l/h = 6/2$). Дія іонів Ag ($\theta = 30^\circ$) - зменшується як поруватість (12,2%), так і характер топології матеріалу ($l/h = 4/22$).

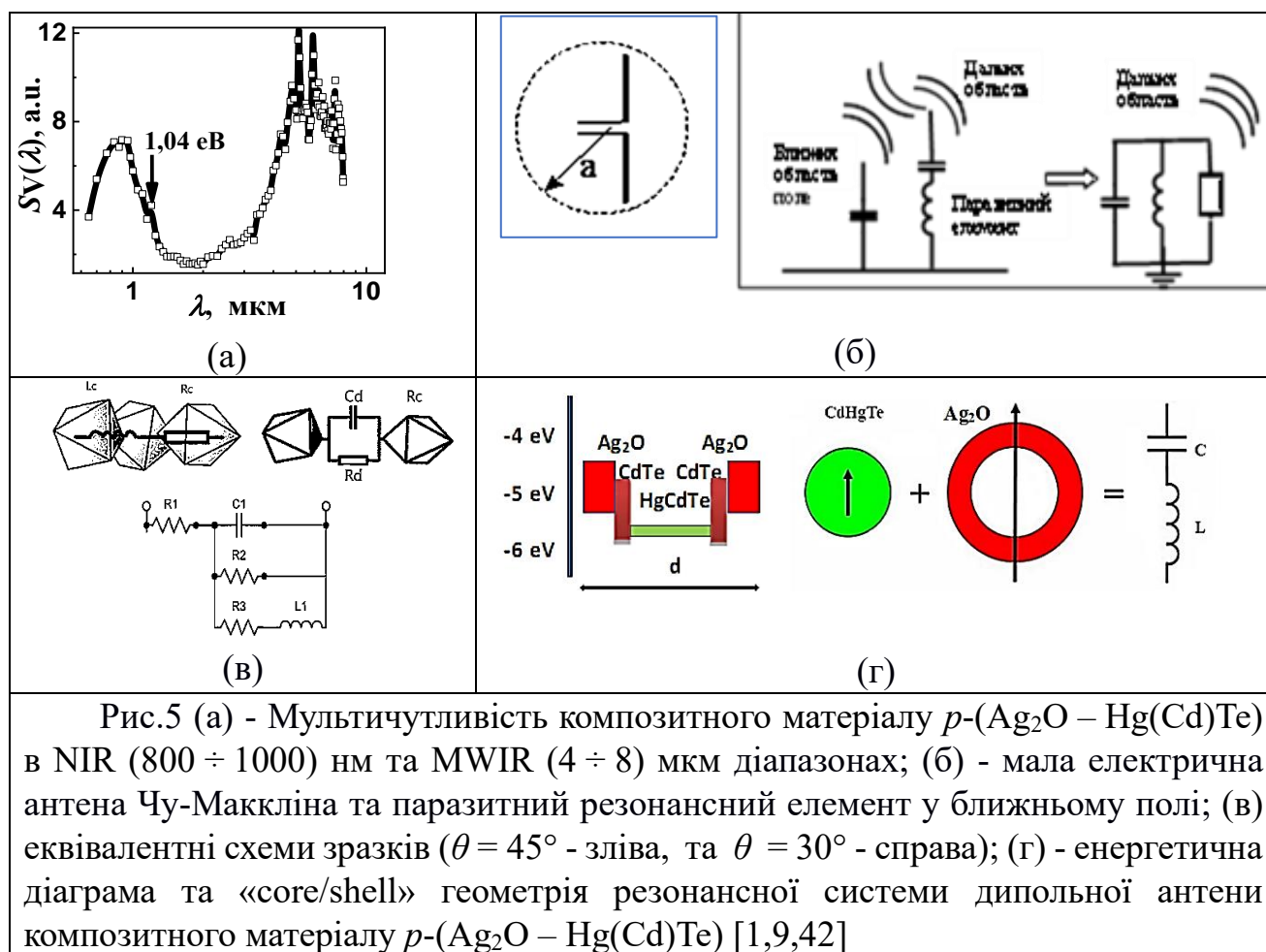
У Дослідженні зроблено оцінку процесу іонного розпилення поверхні CdHgTe при обробці сріблом (100 кеВ , $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Визначено кутову залежність $Y(\theta)$ (Рис. 4а) розпилення атомів потрійної сполуки CdHgTe та встановлено, що розпилюються переважно легші атоми (Cd та Te). Визначено кут взаємодії іонів Ag ($\sim 12^\circ$ від нормалі) з поверхнею CdHgTe , при якому розпилення набуває максимального характеру. В той же час, не співпадиння результатів моделювання глибини розпилення ($\sim 1 \text{ нм}$) з результатами АСМ аналізу поверхні CdHgTe , вказує на те, що іонне розпилення не є домінуючим у процесі модифікування поверхні гетероплівки CdHgTe іонами срібла. Зроблено висновок про «масовий» механізм процесу розпилення CdHgTe . Підтвердженням цього є значна ерозія поверхні ($l/h = 5/1$) та значні зміни співвідношення фаз (поруватість 27,3%) (Див. Рис. 3.в) при надмірному енергетичному впливі на поверхню CdHgTe (NI - $0^\circ_{\text{d.d.}}$ -бомбардування іонами срібла з подвійною дозою).

Вивчення оптичних властивостей (комбінаційного розсіювання світла та ФЛ-фотолюмінесценції) зразків гетерошарів CdHgTe після опромінення іонами срібла під кутом ($\theta = 30^\circ$, $\theta = 45^\circ$) також підтвердило утворення нової оксидної фази на поверхні досліджуваного матеріалу (див. Рис.4 (б,в)). Результати дослідження оптичних властивостей структури на основі CdHgTe дозволяють говорити про те, що вихідні зразки мають достатню якість і характеризуються HgTe-подібними та CdTe-подібними модами. Водночас, розширення піків КРС після імплантації при $\theta = 30^\circ$ свідчить про збільшення недосконалості досліджених зразків, тоді як імплантація під кутом 45° призводить до значного розупорядкування основної кристалічної структури і утворення на її основі композитної конструкції, що складається з нанокристалів оксиду срібла і CdTe в поєднанні з наноструктурованим CdHgTe.

У Дослідженні було проаналізовано процеси проникнення, розпилення та переміщення іонів (за рахунок дифузії, або ж термічного відпау) та аргументовано доведено необхідність враховувати ще один фізичний фактор, а саме, спрямоване переміщення атомів і дефектів, яке відбувається через неоднорідні механічні напруження приповерхневих шарів матеріалу мішені, що піддається іонній імплантації.

В третьому розділі наведено експериментальні та теоретичні дослідження використання CdHgTe в якості високочутливого елементу детектування в суб-ТГц діапазону як болометричної, так і фотоелектричної дії.

Було встановлено, що описаний в попередній главі синтезований іонним опроміненням композит $p\text{-Ag}_2\text{O-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,20$) демонструє фоточутливість в області ближнього ІЧ ($800 \div 1000$) нм та середнього ІЧ ($4 \div 8$) мкм діапазонів спектру (Рис.5а). Слід підкреслити, що вихідні та імплантовані під кутом $\theta = 30^\circ$ зразки демонструють типовий спектральний розподіл чутливості внаслідок власного поглинання [$(4 \div 8)$ мкм, $E_g = 0,192$ еВ, $\lambda = 6,46$ мкм)] без ознак розширення спектрального діапазону. Тоді як композитна структура $p\text{-(Ag}_2\text{O - Hg(Cd)Te)}$ ($\theta = 45^\circ$) без апаратного чи антенного підсилення демонструє також чутливість до суб-ТГц випромінювання на рівні $\text{NEP} = 4,5 \times 10^{-8}$ Вт/Гц^{1/2} при 140 ГГц і 296К. Для розуміння механізму чутливості у суб-ТГц області (140 ГГц), топологія поверхні наноструктурованих ($\theta = 45^\circ$) CdHgTe зразків розглянута, виходячи з теоретичної концепції малих електричних антен (ESA) Чу-Маккліна: $ka \ll 1$, де $k = 2\pi/\lambda$ - хвильове число, λ - довжина електромагнітної (ЕМ) хвилі, a - радіанна сфера Віллера, що окреслює граничний розмір ESA (Рис.5.б). За Віллером, максимальний розмір малої антени $l = 2a$ не повинен перевищувати величину λ/π , і для нашого $f = 140$ ГГц ($\lambda = 2,14$ мм) має становити близько 680 мкм. Виходячи з фактичного розміру включень (з даних рентгеноструктурного аналізу) в ефективному середовищі синтезованого композиту $p\text{-(Ag}_2\text{O - CdHgTe)}$ - 70 нм для Ag₂O та 200 нм для CdHgTe, «елементарна комірка» нашого композиту набагато менше за λ або $2a$ на 140 ГГц. Тобто, розміри елементарної комірки композиту не можуть виконувати роль ESA.



Відомо, що процес зменшення граничного розміру ESA обмежується критеріями Боде і Фано, за якими звужується ширина смуги імпедансу Δf і нівелюється добротність $Q_{\text{rad}} \sim 1/a^3$ антени. Такий об'єкт набуває мінімальний радіаційний опір R_a і значну ємнісну реактивність X_c , що потребує введення у ближнє поле антени індуктивного опору для компенсації X_c .

Однак існує спосіб обійти це обмеження розмірів, застосувавши метод мініатюризації антени з використанням осередків метаматеріалу (MTM). У дослідженні задіяно парадигму паразитного резонансного елемента у ближньому полі (Near Far Resonance Parasitic, NFRP), як новий метод мініатюризації електричних антен. Метаматеріал у ближньому полі ESA відіграє роль NFRP елемента (Рис.5б), який компенсує значну ємнісну реактивність X_c ESA.

Нанокompозитну структуру $p\text{-(Ag}_2\text{O - Hg(Cd)Te)}$ створену шляхом іонної імплантації ($\theta = 45^\circ$) можна вважати середовищем з включеннями MTM. Дослідження переносу заряду для імплантованих сріблом структур методом спектроскопії нестационарного імпедансу підтверджують це припущення і демонструють імпеданс індуктивного типу. На Рис. 5.в показана еквівалентна електрична схема, яка моделює транспортні властивості матеріального середовища. На еквівалентній схемі R1 є опором контакту, паралельний ланцюг R2-CPE1 характеризує провідність і заряд шару, розупорядкованого імплантацією. Схема містить також реактивний елемент — індуктивність L1, що вказує на

середовище з негативним значенням ε , в нашому випадку - Ag_2O , AgO та Ag у системі «оксид металу - $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ ».

Одержані результати підтверджують наявність МТМ та резонансний характер взаємодії зразка p - $(\text{Ag}_2\text{O} - \text{Hg}(\text{Cd})\text{Te})$ з ЕМ хвилями, де неоднорідне середовище з нановключень Ag_2O , AgO , Ag виконують роль LCR-резонаторів. Такий підхід дозволив побудувати енергетичну діаграму (Рис. 5.г) синтезованих елементарних комірок p - Ag_2O - $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$, що здатні акумулювати енергію ЕМ хвиль. Запропоновано модель елементарного RLC - резонатора «ядро/оболонка» із сферичною ε -негативною оболонкою Ag_2O та збуджуючим «позитивним» $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ елементом.

Аналогова інтерпретація дозволила сумістити процеси розупорядкованості та фракталізації поверхні зразків $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$, і пояснити особливості стумопереносу. Для пояснення було залучено перколяційну модель розупорядкованої системи у вигляді Z^2 , кожен вузол якої зайнятий з ймовірністю p , а порожній - з $q = 1 - p$. За елементи твердої $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ матриці було прийнято зайняті, а за пори вільні вузли.

В такому наближенні для зразка ($\text{Ag}^+ \theta = 30^\circ$ на вставці Рис. 5.в справа) виконується умова $p < p_c$, (де p_c - критична концентрація) стану розупорядкованості елементів p . Резистор R_d враховує матеріал н/п $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$, а ємність C_d , це об'ємний заряд часток $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ матриці.

Для зразка $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$ з ознаками фрактальної структури ($\text{Ag}^+ \theta = 45^\circ$ вставка Рис. 5.в зліва) реалізується виникнення умови перколяції $p > p_c$, за якою струмоперенос здійснюється за кластером, який утворюється у матриці $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$. Наочно це аналогова схема з резистором - R_c та індуктивністю - L_c .

У підсумку L та C виступають фізичними факторами, що супроводжують радіаційну обробку Ag^+ , та безпосередньо розподіленими по оброблюваній поверхні н/п з'єднання CdHgTe . Саме наявність структурного розупорядкування надає послаблення руху носіїв заряду, внаслідок процесів розсіювання. Як результат, індуктивність L (Рис. 5.в) є інерційним опором коливанням струму. Отже, це не фізична - L_m , а динамічна індуктивність - L_k .

У Дисертації в окреме дослідження виділено концепцію нагрівання ТГц випромінюванням електронного газу у $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,22$). Розглянуто способи узгодження та наявність антени і чутливого елемента на основі $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}$.

У цій частині Дослідження отримано болометричний відгук на розігрів носіїв заряду у CdHgTe , в якому під дією суб-ТГц/ТГц випромінювання змінюється σ (за рахунок зміни часів релаксації τ та рухливості μ гарячих носіїв заряду).

На Рис. 6.а наведено ескіз SHEBa (Semiconductor Hot Elctron Balometr) ($2a = b = 50$ мкм, $c = 8$ мкм, $s \approx 500$ мкм, опір активного елемента $R_o \approx (23 \div 29)$ Ом. Контакти (Au), а гетерошари $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}/\text{Ge}$ ($d \approx 0,5$ мм) наклеєні на сапфірову підкладку. Залишкова концентрація домішок $N \leq 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. У Дослідженні було задіяно декілька джерел суб-ТГц та ТГц діапазонів спектру для визначення механізму струмопереносу. Зразок - прототип $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ SHEB піддавався опроміненню $f_{\text{мод}} < 10^3 \text{ Гц}$ (36; 39; 55; 75) ГГц, або опромінювався HCN ($\lambda = 337$

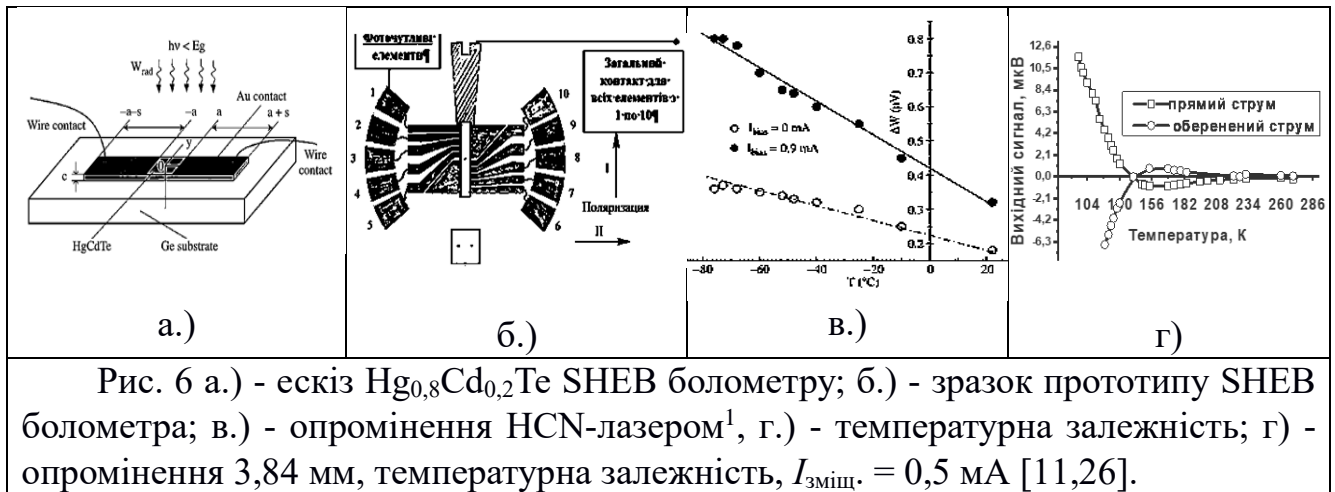


Рис. 6 а.) - ескіз Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te SHEB болометра; б.) - зразок прототипу SHEB болометра; в.) - опромінення HCN-лазером¹, г.) - температурна залежність; г) - опромінення 3,84 мм, температурна залежність, $I_{\text{зміщ}} = 0,5$ мА [11,26].

мкм, $f = 0,89$ ТГц), або DCN лазером ($\lambda \approx 190$ мкм, $f \approx 1,58$ ТГц) з лінійно-поляризованим модульованим променем $D = 40$ мм і вихідною потужністю до $W \sim 5$ мВт та $f_{\text{мод}} = 600$ Гц. DCN-лазер являє собою, модернізований заміною вихідного дзеркала та активної робочої речовини метану (CH₄) на дейтеріований ацетон (C₃D₆O), HCN-лазер.

Виявлено фотовідгук прототипу HgCdTe SHEB у ТГц діапазоні та його залежність, як від величини та напрямку струму $I_{\text{зміщ}}$ через зразок (Рис. 6.д), так і від T (Рис. 6.с) та від орієнтації площини поляризації (Рис. 6.б та Рис. 7.а) опромінювання зразка. На частоті 0,89 ТГц отримано температурні залежності корисного $\Delta V(T)$ сигналу зразка на дію випромінювання HCN лазера (Рис. 6.с) при різних значеннях $I_{\text{зміщ}}$ через зразок, яка виявила значний вплив контактів на суб-ТГц фотовідгук.

Отримано типові болометричні залежності відгуку ΔV зразків SHEB (Рис. 6.с і Рис. 7 а, 7.б) на джерело 36 ГГц, $W_{\text{опр}} = 16$ мВт/см² та лінійну залежність $\Delta V(I_{\text{зміщ}})$. Виявлено, що величина суб-ТГц фотовідгуку змінюється в залежності від орієнтації вектору \mathbf{E} електричного поля падаючого на зразок випромінювання, по відношенню до контактної області (Рис. 6.б напрямом II).

Встановлено кутову залежність відгуку зразка $\Delta V(\psi)$, де ψ - кут між напрямком контактів та \mathbf{E} - вектором ЕМ хвилі (Рис. 6.б та 7.а). Рівень сигналу не досягає нуля при $\psi = 90^\circ$.

З'ясовано, що сигнал $\Delta V(I_{\text{зміщ}}) \neq 0$ при $I_{\text{зміщ}} = 0$ і цей результат незмінний для будь-якого кута \mathbf{E} -поляризації. Це означає, що дія електричного поля в області металевих контактів (антен) викликає в цій області перерозподіл енергії та зміщує рівень ΔV (Рис. 7.а та 7.б). Оцінено, для $\psi \approx 80^\circ$ (Рис. 6.с), вольт-ватна $S_V = \Delta V/W_{\text{опр}} \sim 0,3$ В/Вт чутливість і $NEP \sim 2,5 \times 10^{-9}$ Вт ($\Delta f = 1$ Гц). Для $\psi \approx 0^\circ \rightarrow S_V \sim 2$ В/Вт, $NEP \sim 3,5 \times 10^{-10}$ Вт ($\Delta f = 1$ Гц) у порівнянні з теоретичними: $S_{V\text{теор}} = 4,2$ мВт/Вт і $NEP_{\text{теор}} = 1,7 \times 10^{-7}$ Вт.

Оцінки впливу товщини шару a показали зменшення виявної здатності D^* при його збільшенні, що пояснюється збільшенням рівня генераційно-

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАНУ, м. Харків.

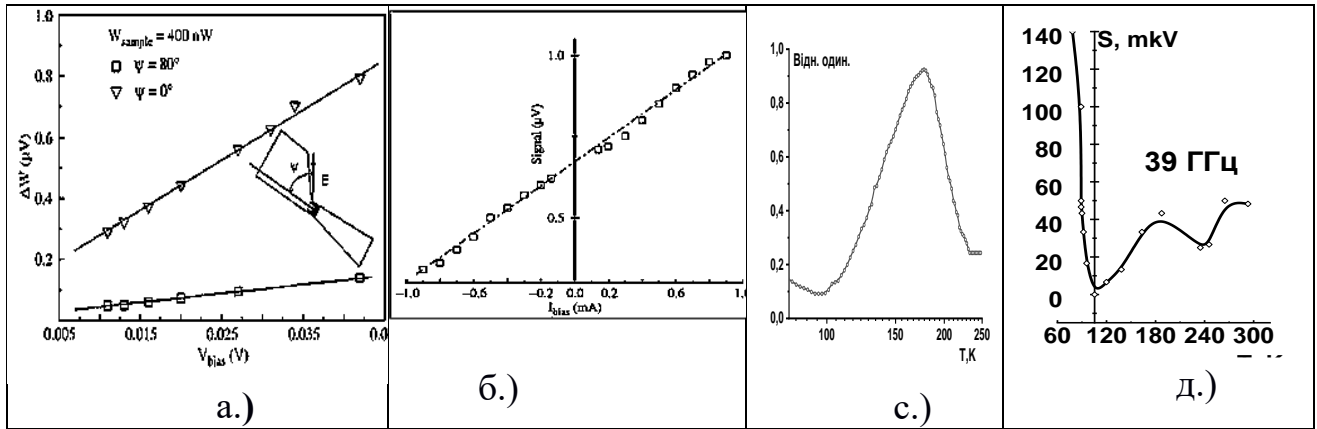


Рис. 7 Залежність: а.) - кутова $\lambda = 8\text{мм}$; б.) HCN - лазер від I_{bias} ; с.) HCN - лазер температурна; д.) - температурна $I_{\text{bias}} = 0,623\text{ мА}$, $W = 245\text{ мВт}$ $\lambda = 8\text{ мм}$ [10,26].

рекомбінаційного шуму. Максимальне значення D^* реалізується наближуючись до плазмової частоти $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ (4,24 ТГц і 0,329 ТГц для 300К і 77К відповідно).

Зроблено висновок, що наявність ТГц відгуку при $I_{\text{зміщ}} = 0$ через зразок (Рис. 6.д) та при всіх кутах опромінення, по відношенню до контактної області, вказує на вплив мікроантен - металевих (Au) контактних площадок.

Отримано температурну залежність $S(T)$ ($I_{\text{зміщ}} = 0,623\text{ мА}$, $W = 2,45\text{ мВт}$ $f_{\text{мод}} = 1000\text{ Гц}$) (Рис. 7.д) прототипу $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ SHEВ болометра у діапазоні (78÷300) К lock-in методом з підсилювачем і трансформатором на рівні 20 dB.

Визначено кілька характерних ділянок на $S = f(T)$. В області (300 ÷ 130) К $S = f(T)$ має тенденцію до зниження. В області (110÷130) К сигнал проходить через нуль, де змінює полярність, а при 78 К має $4^{\text{ох}}$ кратне збільшення у порівнянні з 300 К. Інверсна (ліва на Рис. 7.д) частина гілки $S = f(T)$ зображена для наочності у лівому (+) квадранті координат.

Залежність, яка зображена на Рис. 7.д корелює із залежністю Рис. 7.с., тобто вони мають подібний характер і збігаються їх характерні точки. Окрім того, аналізуючи залежність на Рис. 7.с відмітимо, що при температурі 101°К величина відгуку становиться майже нульовою. Проведені експериментальні дослідження на більш низьких частотах ($\lambda \sim 3\text{ мм}$) показали, що відгук при температурі $\sim 130^\circ\text{К}$ може змінювати фазу на 180° (Рис. 7.д.). Першопричиною є зміна у величині n носіїв заряду або/і зміна напрямку градієнту n цих носіїв заряду.

Проведено аналіз монотонного характеру зменшення амплітуди $S = f(T)$ (Рис. 7.д), виходячи із зміни ефективного часу життя носіїв заряду $\tau_{\text{еф}}$, за рахунок релаксації на рекомбінаційно-дрейфових неоднорідностях $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}/\text{Ge}$ SHEВа.

Це визначається, як $\tau_{\text{еф}} = \tau_0 \exp(\phi)$, де $\phi = E/kT$ і E - висота бар'єрів, τ_0 - час життя носіїв (ЕД пар) без бар'єрів. Зроблено висновок, що дію суб-ТГц випромінювання необхідно розглядати з точки зору порушення термодинамічної рівноваги між дифузійним та дрейфовим струмами, що призводить до виникнення вбудованих термо-е.р.с гарячих носіїв заряду у н/п.

Проведено порівняння зразка $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ SHEВ болометра з коміркою Голя у суб-ТГц області ($\text{NEP} \sim 2 \times 10^{-10}\text{ Вт/Гц}^{-1/2}$). Зроблено висновок, що $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$

SHEB мікроболометр знаходиться на рівні існуючих аналогів, він може працювати між 36 ТГц та 1,58 ТГц, а його робочі параметри (S_V і NEP) пояснюються як неоптимізованими розмірами зразків (50×50 мкм і $d = 8$ мкм), так і наявністю приконтатної антени.

Розробка моделі SHEB і експериментальні дослідження підтвердили запропоновану концепцію, за якою у відділі №6 Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ успішно спроектовано ТГц масиві швидкодіючих кімнатної температури CdHgTe SHEB мікроболометрів.

Четвертий розділ присвячений встановленню закономірностей процесу покращення функціональних характеристик приладних структур на основі потрійних сполук II-VI (CdHgTe, CdZnTe) шляхом іонно-плазмових обробок (Ar^+ , N^+ , H^+) та плазмо-хімічного осадження захисних/просвітлених покриттів на основі алмазоподібних вуглецевих (АПВ) плівок a-C:H:N. У Розділі представлено результати дослідження синтезованих функціональних систем АПВ /Hg(Cd)Te та АПВ /Cd(Zn)Te.

PECVD метод осадження з метану (CH_4) гідрогенізованого аморфного вуглецю a-C:H:N проводився за стандартною ВЧ (13,56 МГц) технологією. Для отримання покриття товщиною $d = 0,9$ мкм був застосований режим осадження: $W_1 = 250$ Вт, 100 Па, 40 хв з робочої суміші газів у реакторі $Ar:CH_4:H_2:N_2 = 1:3:5:9$.

Перед осадженням підкладинку $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x \sim 0,04$) ($S = 1 \times 1$ см, $d = 1,5$ мм) обробляли в плазмі H^+ (25 Па) 5 хв для очищення та пасивації поверхні. На першому етапі a-C:H:N плівка осаджувалася на пілотних Si ($S = 1 \times 1$ см, $d = 300$ мкм) та на CdZnTe зразках одночасно. За результатами профілометрії (Dektak-3030) було отримано товщини a-C:H:N на CdZnTe і на Si: $d = 0,1 \pm 0,05$ мкм та $d = 0,3 \pm 0,05$ мкм відповідно.

Mapping синтезованих плівок a-C:H:N на спектральному еліпсометрі дозволив визначити їх оптичні параметри (n , k , d). Коефіцієнт заломлення плівки АПВ у діапазоні (3 ÷ 16) мкм знаходився в межах $n_{АПВ} = (1,55 \div 1,95)$, коефіцієнт екстинкції складав величину $\sim 0,0021$. Відповідні параметри для $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ підкладинки: $n_{КЦТ} = (2,7 \div 3,15)$, $k \sim 0,2$. Дослідження спектрів оптичного пропускання (Рис. 8а) дозволило визначити ефективність просвітлення в синтезованій оптичній системі a-C:H:N/CdZnTe, пропускання якої T збільшується до $\sim 80\%$ у вікні прозорості атмосфери (3 ÷ 5) мкм, у порівнянні з пропусканням $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ у вихідному стані на рівні 55%.

Встановлено, що в процесі нанесення АПВ покриття утворюються «технологічні» перехідні шари (Рис. 8 (а,б)). Осциляції на спектрах пропускання a-C:H:N/CdZnTe системи на ділянках поза межами максимального просвітлення вочевидь пов'язані з інтерференцією світла за рахунок явища багаторазово відбиття у системі перехідних шарів з малим коефіцієнтом екстинкції.

Визначено склад синтезованого АПВ покриття шляхом розбиття спектрів поглинання в області валентних ($2700 \div 3100$ cm^{-1}) та деформаційних коливань ($1300 \div 1700$ cm^{-1}) СН-груп на криві Лоренца (Рис. 8с). З'ясовано наявність кисню

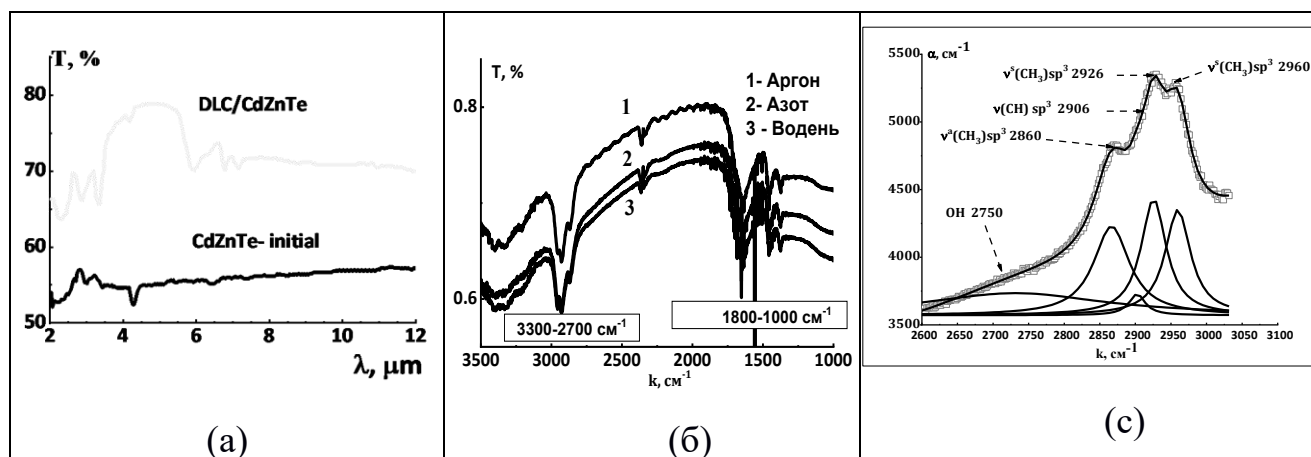
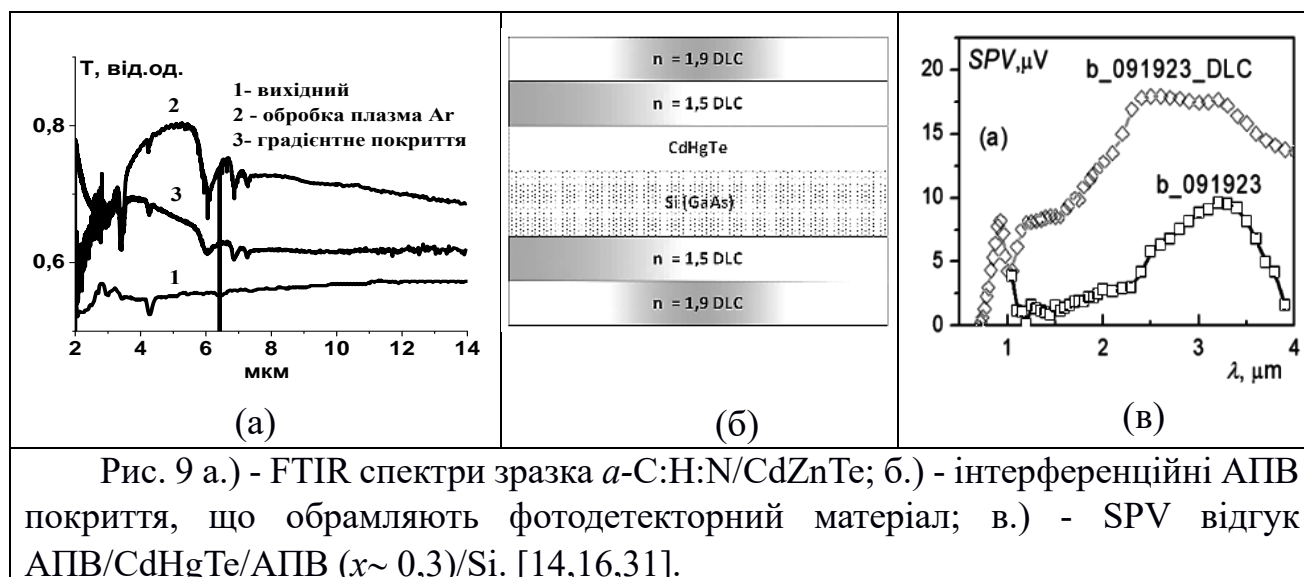


Рис. 8 Спектри оптичного пропускання CdZnTe: (а) – у вихідному стані та після нанесення АВП, (б) - після нанесення АВП з попередньою плазмовою обробкою (H₂, N, Ar) поверхні та (с) - спектр валентних коливань системи *a*-C:H:N/CdZnTe [16,21,24].

(широка смуга поблизу 2750 cm⁻¹) та відсутність у коливальних спектрах смуг sp²-гібридизованих зав'язків. Зроблено висновок, що у синтезованому АПВ покритті атоми вуглецю переважно мають sp³ - гібридизацію та відносно високу частку CH₃-груп, що підтверджує метильний механізм його утворення. Обґрунтовано також наявність CH₂ і CH груп. Метильні радикали беруть участь в утворенні АПВ плівки внаслідок дисоціації CH₄ електронним ударом. В процесі росту відбувається процес активного видалення пов'язаного водню з поверхні *a*-C:H:N покриття згідно схеми: CH₄→CH₃+H; CH₃→CH₃*; CH₃*+H→CH₂*+H₂; CH₂*+H→CH*+H₂ (* - радикали, які включені у АПВ плівку). Таким чином, в єдиному вакуумному процесі PECVD осадження *a*-C:H:N покриття (*d* = 0,9 мкм) на CdZnTe виникає складна багатошарова система з двома перехідними шарами і з показником оптичного пропускання на рівні 80%, в якій найближчий шар до підкладки формується в результаті іонного травлення. Наступним кроком проаналізовано роль іонно-плазмових обробок підкладки Cd_{1-x}Zn_xTe (*x* ~ 0,04) у процесі формування «технологічних» перехідних шарів.

Було відпрацьовано режими іонно-плазмових обробок (H₂, N, Ar) та осадження *a*-C:H:N. Зразки Cd_{1-x}Zn_xTe (*x*~0,04) ((1x1) см і *d* = 1,5 мм) було оброблено (5 хв) у плазмі Ar⁺ (№1), H⁺ (№2) та N⁺ при потужності ВЧ (13,56 МГц) розряду *W* = 175 Вт та *P* = 100 Па. Після проводилося осадження *d* = 0,9 мкм *a*-C:H:N (40 хв, *W*₁ = 250 Вт, 100 Па).

Вперше показано, що обробка Ar⁺, у порівнянні з H⁺ і N⁺, вносить помітні зміни в приповерхневій області CdZnTe з відмінними від об'єму оптичними показниками (*k*_j; *n*_j; *d*_j), що пояснює багатошаровість синтезованої оптичної системи при одношаровому осадженні АПВ/Cd_{1-x}Zn_xTe (*x* ~ 0,04). Оптичний контроль виявив найбільший та найменший вплив на поверхню Cd_{1-x}Zn_xTe (*x* ~ 0,04), ступінь якого змінюється в наступній послідовності Ar⁺ → N⁺ → H⁺. Тобто, максимальний ефект оптичного пропускання в системі (80%, по відношенню до 55%) АПВ/CdZnTe на рівні 80%, в порівнянні з 55%, отримано для



зразків після обробки плазмою Ar^+ (Рис. 8б). Також виявлено осциляції пропускання на спектрі $T(\lambda)$, в області максимального просвітлення системи $a\text{-C:H:N/CdZnTe}$, після обробки підкладки плазмою Ar^+ (Рис. 8б). Визначено, що обробка Ar^+ (в порівнянні з N^+) на порядок величини зменшує k ($0,2 \rightarrow 0,04$) порушеного шару та підвищує n ($2,55 \rightarrow 3,2$).

Після обробки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,04$) плазмою Ar^+ порушений шар стає близький до ZnTe ($(n_{\lambda=632,8 \text{ нм}} = 2,98, k_{\lambda=632,8 \text{ нм}} = 0,07 \text{ при } \lambda = 632,8 \text{ нм})$).

Змодельовано інтерференційну структуру на основі $a\text{-C:H:N}$ плівок (Рис. 9.(а,б)), що утворює відомий із НВЧ техніки несинхронний трансформатор опорів, принцип якого перенесено на двошарове АПВ покриття. Оптимізація процесу осадження багатошарових інтерференційних структур на основі $a\text{-C:H:N}$ плівок шляхом зміни кількості азоту у реакторі з регульованим показником заломлення n ; дозволила зменшити загальну товщину покриття та розширити спектральний діапазон просвітлення (Рис. 9.(а-с)). Вперше отримано систему АПВ1/АПВ2/ CdZnTe , яка дозволила розширити спектральну область ($2 \div 6$) μm оптичного просвітлення (70% по відношенню до 80%) ІЧ н/п матеріалу та зменшити загальну товщину діелектричного покриття.

Отримано також зразки оптимізованих несиметричних інтерференційних АПВ покриттів, що обрамляють фотодетекторний матеріал (CdHgTe/Si) по обидва його боки (Рис.9.б), в результаті чого спостерігається підвищення ефективності та розширення спектрального діапазону детектування такої структури (Рис. 9.в).

Друга практична ціль дослідження, представленого в четвертому розділі, полягає у застосуванні АПВ покриття з метою зменшення втрат заряду, який виникає за рахунок неповного збору нерівноважних носіїв, та зменшенні струму витоку X/γ детекторів на основі монокристалічного $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,04$). Аналіз літературних джерел дозволив визначити ефективність алмазоподібної $a\text{-C:H:N}$ плівки та її толерантність до дії рентгенівського опромінення.

Ця властивість ґрунтується на радіаційній стійкості алмазоподібного вуглецю, яка перевищує радіаційну стійкість кремнію і є наслідком сильних зав'язків в АПВ

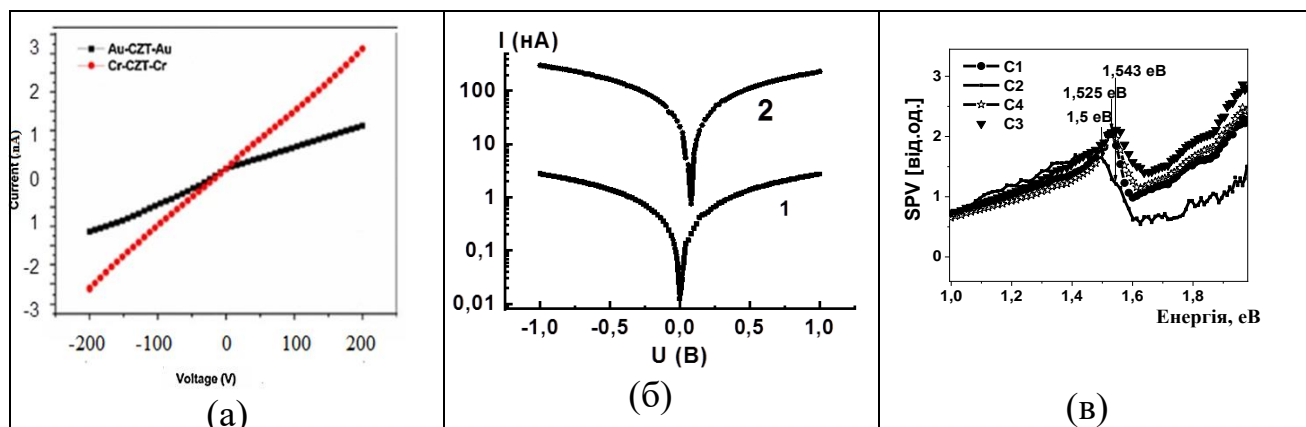


Рис. 10 Характеризація зразків серії C_i : (а) - типові ВАХ після нанесення контактів Au та Cr; (б) - темнова ВАХ (1), $\rho = 4,5 \times 10^8$ Ом см, та при освітленні (2), $\rho = 5 \times 10^6$ Ом см); (в) спектри поверхневої фото-ерс [6,34,47,48].

Відібрано та охарактеризовано партію зразків C_i монокристалів $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,02$), вирощених методом Бриджмена, які вирізалися струнною різкою (розміри (2x5x5) мм), та оброблялися у поліруючому травнику. На більші грані хімічним шляхом наносилися золоті контакти товщиною 20 нм. Відпрацьовано та оптимізовано процес хімічно-вологого виготовлення контактів (Рис. 10.а).

Досліджуваний матеріал був охарактеризований шляхом вивчення вольт-амперних залежностей (Рис.10.б) та спектрів фото-ерс в області (0,4 ÷ 2,0) мкм (Рис.10.в). Питомий опір зразків складав $\sim 2 \times 10^7$ Ом см. Фотоопір досліджуваного матеріалу зменшується на два порядки до $\sim 5 \times 10^6$ Ом см.

Критерієм, за яким проводилася оцінка фоточутливості CdZnTe оцінювалася за параметром $RI = I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$, а саме, відношення значення струму I_{light} при освітленні до сили струму I_{dark} у темноті. Для Au/CdZnTe/Au структур значення RI знаходилося у діапазоні ~ 100 , що свідчить про їх високу фоточутливість та корисний потенціал, як детекторів іонізуючого випромінювання.

Проведено PECVD осадження пасивуючого покриття $a\text{-C:H:N}$, $d = 800$ нм (в єдиному циклі із попередньою обробкою Ar^+) на зразки детекторного матеріалу (CdZnTe). На Рис. 11.а зображено типові ВАХ для зразків партії C_i прототипів CdZnTe γ -детекторів до та після нанесення $a\text{-C:H:N}$ покриття на бічні грані.

Дослідження ВАХ зразків CdZnTe до та після нанесення захисного покриття на бічні поверхні детекторного матеріалу виявило ефект значного зменшення струму витоку (в 12...17 разів) та збільшення питомого опору ($2 \times 10^8 \dots 5 \times 10^9$ Ом см).

Отриманий ефект, з різницею у часі (півроку), показав стабільність явища зменшення струмів витоку, оброблених плазмою Ar^+ та захищених АПВ плівкою зразків першої (C_i) партії CdZnTe детекторів. Зроблено висновок, що ефект пасивації носить незворотній характер.

Встановлено, що пасивований АПВ покриттям н/п CdZnTe демонструє високу радіаційну стійкість до дії γ - опромінювання (див. Табл. 2 та Рис. 11.б) майже до дози

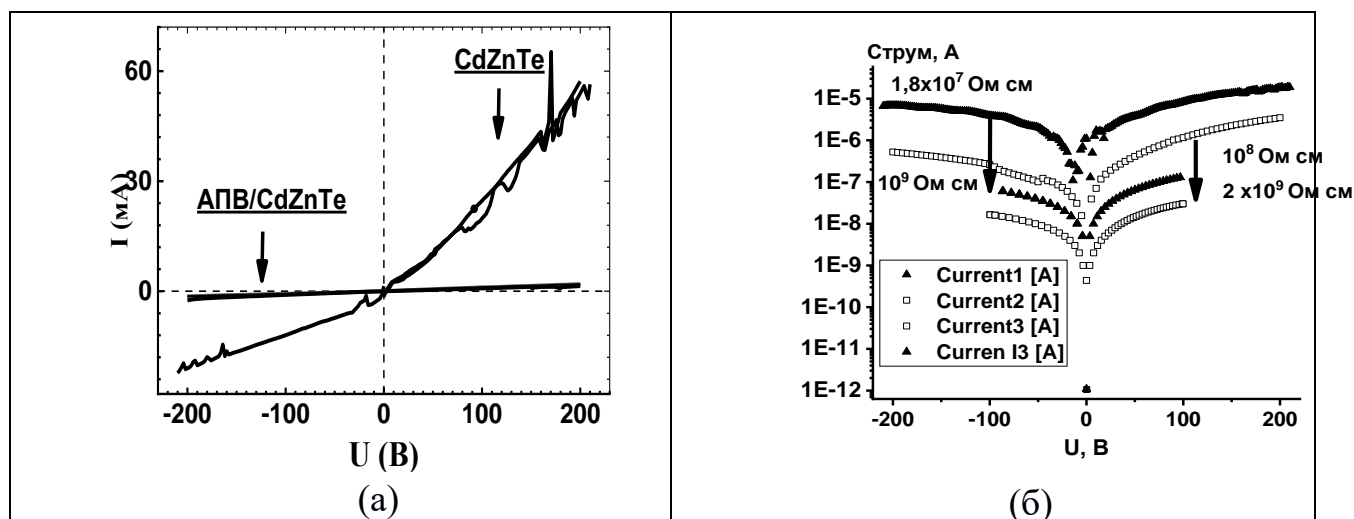


Рис. 11 (а) - типова ВАХ зразка CdZnTe у вихідному стані та після нанесення АПВ покриття ($d = 800$ нм); (б) - зразки С1 і С2 до та після γ опромінення (доза 5×10^5 Рад). Зміни питомого опору наведено в Табл.2 [34,47,48].

10^6 Рад. Приріст питомого опору зразків CdZnTe\АПВ після опромінення складає $\rho_{\gamma}/\rho_{\text{АПВ}} \sim 6$, а зразків без АПВ - $\rho_{\gamma}/\rho \sim 50$ (зразки С1, С2 відповідно, див. Табл. 2).

Виявлено, що при обробці плазмою аргону зразків $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ відбувається порушення поверхні на глибину ~ 200 нм з переважним видаленням Cd. Відбувається процес накопичення V_{Cd} . При цьому в CdZnTe відбувається процес самокомпенсації провідності та збільшення питомого опору н/п матеріалу. Дія γ -опромінення призводить до активізації генераційних та анігіляційних процесів і процесу перерозподілу дефектів у монокристалі $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$. Ступінь структурної досконалості в об'ємі навіть дещо зростає до «граничного» стану, поки концентрація $V_{\text{Cd}} <$ концентрації Zn, що відображається на зменшенні струмів $I_{\text{внт}}$ зразків без АПВ (Табл. 2). Отже, первинні властивості матеріалу (тип провідності, рівень легування, домішковий склад), а також умови опромінення визначають швидкість досягнення цього стаціонарного граничного стану.

Цей стан н/п відповідає практично повній взаємній компенсації радіаційних дефектів (донорів та акцепторів), при цьому густина зв'язаного на дефектах заряду після опромінення перевищує густину вільних носіїв навіть у вироджених матеріалах. Процеси плазмової обробки аргонем та нанесення АПВ покриття на

Таблиця 2 Параметри типових зразків серії C_i [34,47,48].

Зразок		R_o [Ом]	ρ_o [Ом см]	R_{DLC} [Ом]	$\rho_{\text{DLC}}/\rho_{\gamma}$ [Ом см]	E_{max} [eV]
C1	DLC / γ^*	$1,8 \times 10^7$	$2,25 \times 10^7$	$2,5 \times 10^8$	$3 \times 10^8 / 2 \times 10^9$	1,525
C2	Init/ γ^*	$1,44 \times 10^7$	$1,8 \times 10^7$	-	- / 10^9	1,543
C3	DLC	$1,5 \times 10^7$	2×10^7	$1,8 \times 10^8$	$4,5 \times 10^8$	1,543
C4	DLC	5×10^6	6×10^6	$7,4 \times 10^7$	2×10^8	1,525

* γ опромінення доза 5×10^5 Рад (5 кГрей)

монокристали фізично створюють та фіксують процес досягнення стаціонарного «граничного» стану CdZnTe, що підвищує робочу здатність детекторів при

великих дозах жорсткого опромінення.

Зроблено висновок, що обробка зразків CdZnTe плазмою аргону перед осадженням АПВ покриття дозволяє синтезувати стабільну захисну систему α -C:H:N/CdZnTe. Це дозволяє підвищити робочі значення напруги зміщення у детекторній структурі і тим самим покращити ефективність детектування.

У П'ятому розділі наведено результати вивчення нанокompозитних та гібридних систем на основі шарів оксидів перехідних металів (Fe, Cr)/на<100> Si:B⁺ зі змінною товщиною, стехіометрією та магніто-, фото - електричними властивостями. За рахунок природи зв'язку метал-кисень у цих матеріалах відбувається варіювання властивостей від іонного до ковалентного або металевого стану, що відображається на діапазоні електронних і магнітних властивостей відповідно. Зразки отримано методом імпульсної лазерної епітаксії (RPLD) у реакторі KrF-лазером ($\lambda = 248$ нм) в атмосфері кисню P_{O_2} (0,1 Па ÷ 1,0 Па) при температурах підкладки T_{Si} (293 К та 800 К).

Таблиця. 3 Параметри магнітних композицій на кремнії Si <100> [3,5,12,43].

	Параметри синтезу зразка : 0,1 Па O ₂ T _s =293 К	R ₀ ,кОм	Проф., нм	XRR, нм	Жорсткість, нм	
					Si	R _{as} (AFM)
#1	Fe ₂ O _{3-x} , (0≤x≤1)	47,0	80±4	73±1	1,4	0,939
#2	Cr _{3-x} O _{3-y} , (0≤x≤2; 0≤y≤2)	512,0	55±2,75	-	-	1,092
#3	Fe ₂ O _{3-y} /Cr _{3-x} O _{3-y} /Fe ₂ O _{3-y} /Cr _{3-x} O _{3-y}	22,0	50±2,5	-	-	-
#4	Fe ₂ O _{3-y} /Cr _{3-x} O _{3-y} /Fe ₂ O _{3-y} /Cr _{3-x} O _{3-y}	7,0	10,0	108±0,5	1,4	-

Отримано зразки одношарових, дво - (Fe₂O_{3-y}/Cr_{3-x}O_{3-y}) та чотиришарових (Fe₂O_{3-y}/Cr_{3-x}O_{3-y}/Fe₂O_{3-y}/Cr_{3-x}O_{3-y}) структур. При відпрацюванні RPDЛ технології, отримані зразки були охарактеризовані методами електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, рамановської та імпедансної спектроскопії.

У дослідженні основним матеріалом є гематит α -Fe₂O₃. Це н/п p -типу, який виявляє тривалу стабільність в умовах зовнішнього середовища та низьку собівартість. За результатами рентгеноструктурного аналізу виявлено кореляцію між структурними властивостями плівок оксидів та технологічними параметрами (P_{O_2} , T_{Si}). При $T_{Si} = 293$ К шари оксидів Fe аморфні і не мають суцільності. При $T_{Si} = 800$ К відбувається кристалізація шарів оксиду Fe у найбільш стабільну фазу Fe₃O₄ → α -Fe₂O₃ (Рис. 12.а). Для плівок оксиду Cr шари в основному складаються з Cr₂O₃ найбільш стабільної сполуки на фазовій діаграмі Cr-O (Рис. 12.б).

Оксиди Fe₂O₃ та Cr₂O₃ відносяться до корундів і згідно теорії груп мають сім активних раманівських мод (2A_{1g} + 5E_g), які для оксиду заліза знаходяться в спектральному проміжку (200 ÷ 650) см⁻¹. Чотири основні моди спостерігаються при (225, 290, 410, 612) см⁻¹ і друга гармоніка (широка смуга) - при ~ 1320 см⁻¹ (Рис. 13.(а.б)). Також було виявлено, що спектри комбінаційного розсіювання продемонстрували три моди E_g і лише одну A_{1g} для оксиду хрому. За піками оксиду заліза можуть ховатися ще дві моди – близько 228 см⁻¹ і 615 см⁻¹. Оскільки частота моди A_{1g} (540 см⁻¹) зміщена від типового значення (552 см⁻¹), шар оксиду хрому

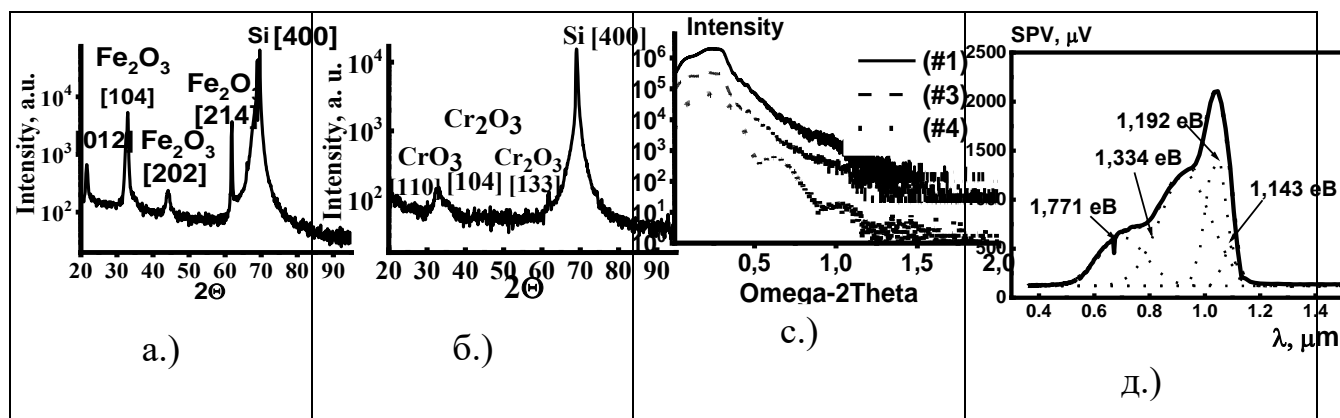


Рис. 12 а.) та б.) - XRD та спектри RPLD зразків #1 та #2 відповідно, с.) XRR спектри, д.) - SPV спектри зразків (#1), (#2), (#3) (Див. Табл. 3) [3,8,35,38].

очевидно є деформованим, що узгоджується з різницею в параметрах ґратки розглянутих оксидів. Характеристики оксиду хрому в положенні смуги навколо $(840 \div 860) \text{ см}^{-1}$, як правило, приписують модам розтягування $\text{Cr}^{\text{VI}} - \text{O}_2$ або змішаним коливальним модам оксиду $\text{Cr}^{\text{III}}/\text{Cr}^{\text{VI}}$. Відносно інтенсивна смуга при 650 см^{-1} спостерігається на спектрах КР двошарових зразків (Рис. 13.б). Цікаво, що спектр КР ідеального кристала гематиту ніколи не містить жодного сигналу в проміжку $(640 \div 660) \text{ см}^{-1}$ смуги. Походження цієї смуги було проаналізовано на основі літературних джерел. Цю смугу часто називають «смугою безладу».

Таким чином, досліджувані мультишари оксидів заліза та хрому можна описати, як недосконалі шари оксиду заліза (III), змішані з напруженими шарами оксиду хрому (III).

Рентгенівський аналіз відбивної здатності дозволив підтвердити параметри шарів $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. На Рис. 12.с за відстанню між смугами, яка обернено пропорційна товщині шару зразків, визначено густину шару $\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}$ $\rho = 5,2 \text{ г/см}^3$ зразка #1 та шару $\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ $\rho = 5,3 \text{ г/см}^3$. Останнє значення близьке до номінальної густини Cr_2O_3 . Твердження, що додатковий вклад $0,1 \text{ г/см}^3$ у шар $\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ може давати невелика частина оксиду Cr_3O_4 , але його присутність не підтверджено рентгеноструктурним аналізом (Рис. 12.б), на відміну від CrO_3 , який мав би зменшити загальну густину шару. Отже густина шару $\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ $\rho = 5,3 \text{ г/см}^3$ не виходить за межі похибки експерименту. Визначена густина для оксиду заліза становить $5,2 \text{ г/см}^3$, що менше густини Fe_2O_3 ($5,26 \text{ г/см}^3$) і більше густини Fe_3O_4 ($5,17 \text{ г/см}^3$), що може вказувати на присутність заліза різної валентності і бути деяким середнім значенням багатofазної системи.

Синтезовані структури охарактеризовані методом спектроскопії фотovoltaїчної ерс (SPV) (синхронне детектування, $f_{\text{мод}} = 300 \text{ Гц}$, $W_{\text{пит}} = 1 \text{ Вт/см}^2$, $\lambda = (0,4 \div 2) \text{ мкм}$). Встановлено, що структура $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Si}$ - «прозора» у діапазоні довжин хвиль $(600 \div 1200) \text{ нм}$, а структура $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ є фоточутливою на рівні $\text{SPV}_{\text{max}} = 4 \text{ мкВ}$.

Експериментальні спектри поверхневої фото-ерс в області $(360 \div 1100) \text{ нм}$ для набору досліджуваних багатошарових структур наведені на Рисунку 14.д. Форма

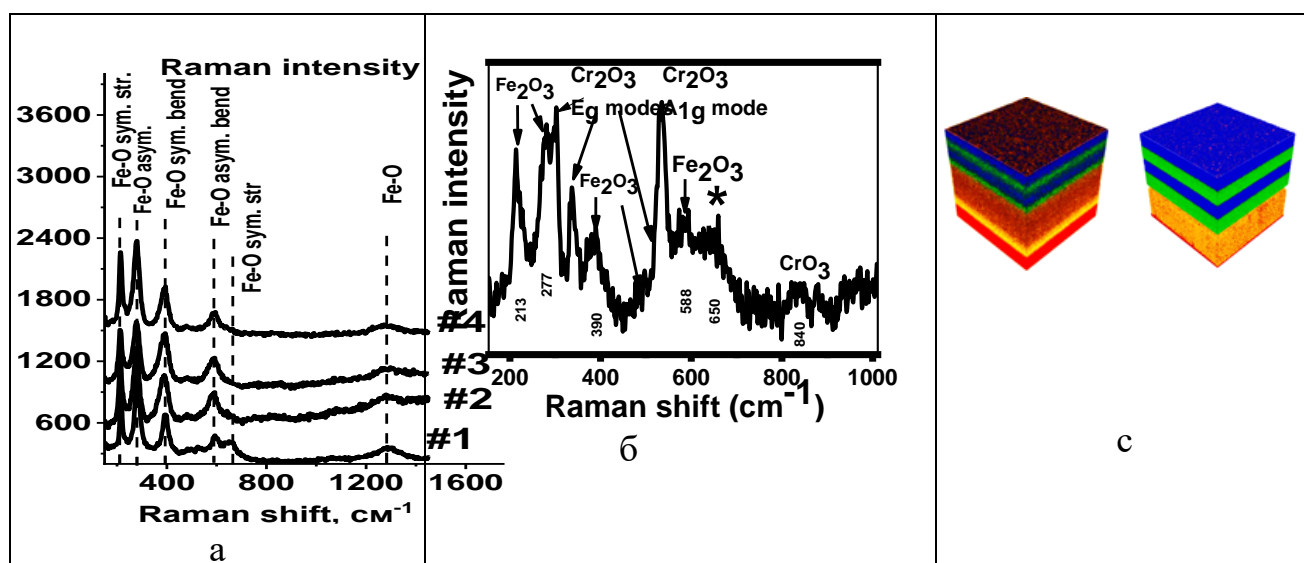


Рис. 13 а.) - спектри КР зразків (Табл.3), б.) - спектр КР зразка #1, с.) - TOFSIMS архітектура в залежності від температури Si підкладки [11,36,45].

спектрального розподілу сигналу SPV майже однакова для всіх представлених зразків. Фото-ерс починає зростати при 2,2 еВ. Різке збільшення фотовідповіді спостерігається приблизно на 1,1 еВ і відповідає ширині забороненої зони кремнію. Слід зазначити, що фотовольтаїчний ефект спостерігався лише у зразках, вирощених на холодній підкладці (293K), а зразки, вирощені на гарячій підкладці (800K), демонстрували явище фотолюмінесценції (ФЛ) в діапазоні (500 ÷ 600) нм.

Як правило, фотовольтаїчний ефект полягає у зміні розподілу вбудованого потенціалу в структурі та є результатом просторового розділення носіїв заряду. У гетероструктурі $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ внутрішній вбудований потенціал є результатом некомпутативного зміщення зон і є достатнім для просторового розділення $e\text{-}h$ пар. В результаті структури з “різкою” поверхнею розділу демонструють сильний фотовідгук, тоді як набагато менший фотоіндукований сигнал спостерігається, якщо границя розділу оксидів є “змішаною”, типу сплаву $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$.

Вочевидь, що термодинамічні умови вирощування зразків на гарячій підкладці (Див. результати дослідження методом TOF-SIMS, Рис. 13.с) достатні для змішування оксидних компонентів і утворення розчину на межі розділу (на Рис. 13. зліва). У цьому випадку фотогенеровані носії не розділяються. Вони рекомбінують, а ми спостерігаємо явище люмінесценції.

Було виявлено кореляцію спектрів SPV з низкою експериментальних параметрів, таких, як композиційний та архітектурний дизайн, а також частота модуляції падаючого світла та спосіб фіксації зразка. Найбільший ефект (на рівні $\text{SPV}_{\text{max}} = 2 \times 10^3$ мкВ) продемонстрували двошарові зразки товщиною (80 ÷ 100) нм. Порівняно з іншими зразками, інтегральне значення їх фотонапруги було вищим, фотовідповідь з'явилась також між 1,1 еВ і 2,2 еВ (рис. 14.д). Величина фотовідгуку в залежності від способу кріплення досліджуваних структур показана

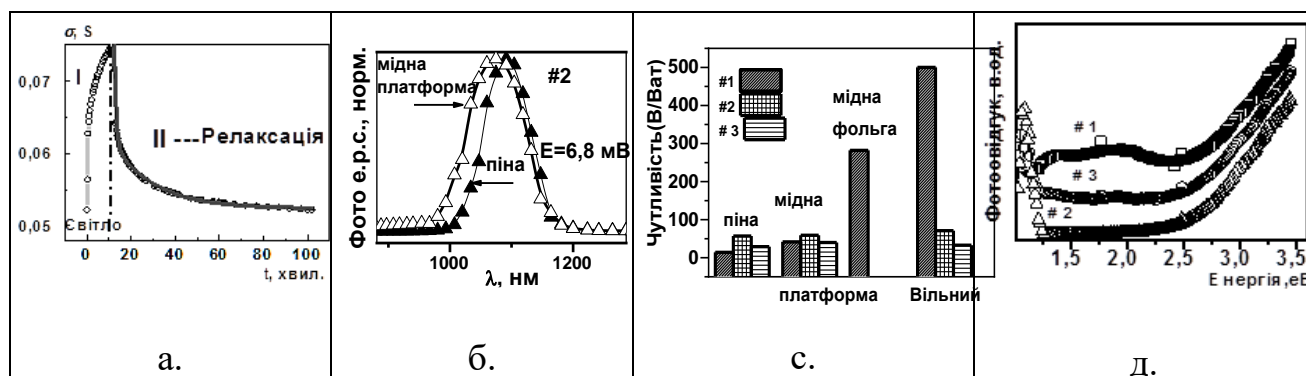


Рис. 14 а – релаксація фотовідгуку б. – теплова природа фотовідгуку, с - статистика фотовігуку від способу підвісу, д. - фотовольтаїка зразків [3,10,37,45].

на Рис.14.с. Композитні зразки, які були максимально наближені до "вільно підвішених", щоб мінімізувати теплопровідність, продемонстрували максимальну інтегральну чутливість. Оптимізація частоти модуляції падаючого світла призводила до покращення сигналу SPV для всіх зразків. Ці результати підтвердили вплив теплового ефекту в системі. Різниця температур, що виникає в результаті структурної (теплової, оптичної) неоднорідності $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$, призводить до генерації вихідної напруги на постійному току за рахунок явища Зеєбека.

Крім того, таку багатшарову структуру характеризує ефект тривалої фоторелаксації із загальним часом до 2 годин (Рис. 14.а). Визначено кінетику зростання фото-е.р.с (джерело $\lambda = 470$ нм) і спаду у темряві, яка описується експонентами з двома показниками часу: $\tau_1 = 0,51$ хв і $\tau_2 = 9,03$ хв (зростання) та $\tau_3 = 0,92$ хв і $\tau_4 = 19,05$ хв (спадання).

Наступним кроком було дослідження магніто-транспортних властивостей (на постійному струмі, $T = 300\text{K}$) наноккомпозитних структур $\text{Cr}_2\text{O}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si} \langle 100 \rangle$. Зразки осаджувалися на $\text{Si} \langle 100 \rangle$ підкладинку ($T_{\text{Si}} = 300^\circ\text{K}$)

Сполука Cr_2O_3 має ескалоїтоподібну структуру і є стабільним магнітодіелектричним оксидним матеріалом. Він антиферомагнітний до $T_{\text{NCr}_2\text{O}_3} = 307\text{K}$ (температура Нееля) та магніто-електричний (МЕ) матеріал, в якому співіснують магнітний та електричний порядок. Гематит - $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ демонструє м'який феромагнетизм (змішаний антиферомагнітно-феромагнітний стан) між $[260\text{ K} \div T_{\text{Na-Fe}_2\text{O}_3} = 955\text{K}]$.

У дисертації визначено статичні магнітні властивості зразків з максимальним магнітним полем (Табл. 3) у магнітних полях (H) до 10 кОЕ (Рис. 15.а). Поле прикладалося як у площині, так і перпендикулярно до площині плівки оксиду на вібраційному магнітометрі (LDJ-9500).

Встановлено (Рис. 15.а) феромагнітну природу зразка (#1) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-x}/\text{Si} \langle 100 \rangle$. Отримано підтвердження анізотропії плівок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-x}$ (#1). Їх намагніченість насичення більша, якщо поле прикладене перпендикулярно до площини плівки.

З'ясовано, що петля гістерезису плівок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-x}$ (#1) не досягає насичення навіть при максимальному повздовжньому магнітному полі до 10 кОе (Рис. 15.б).

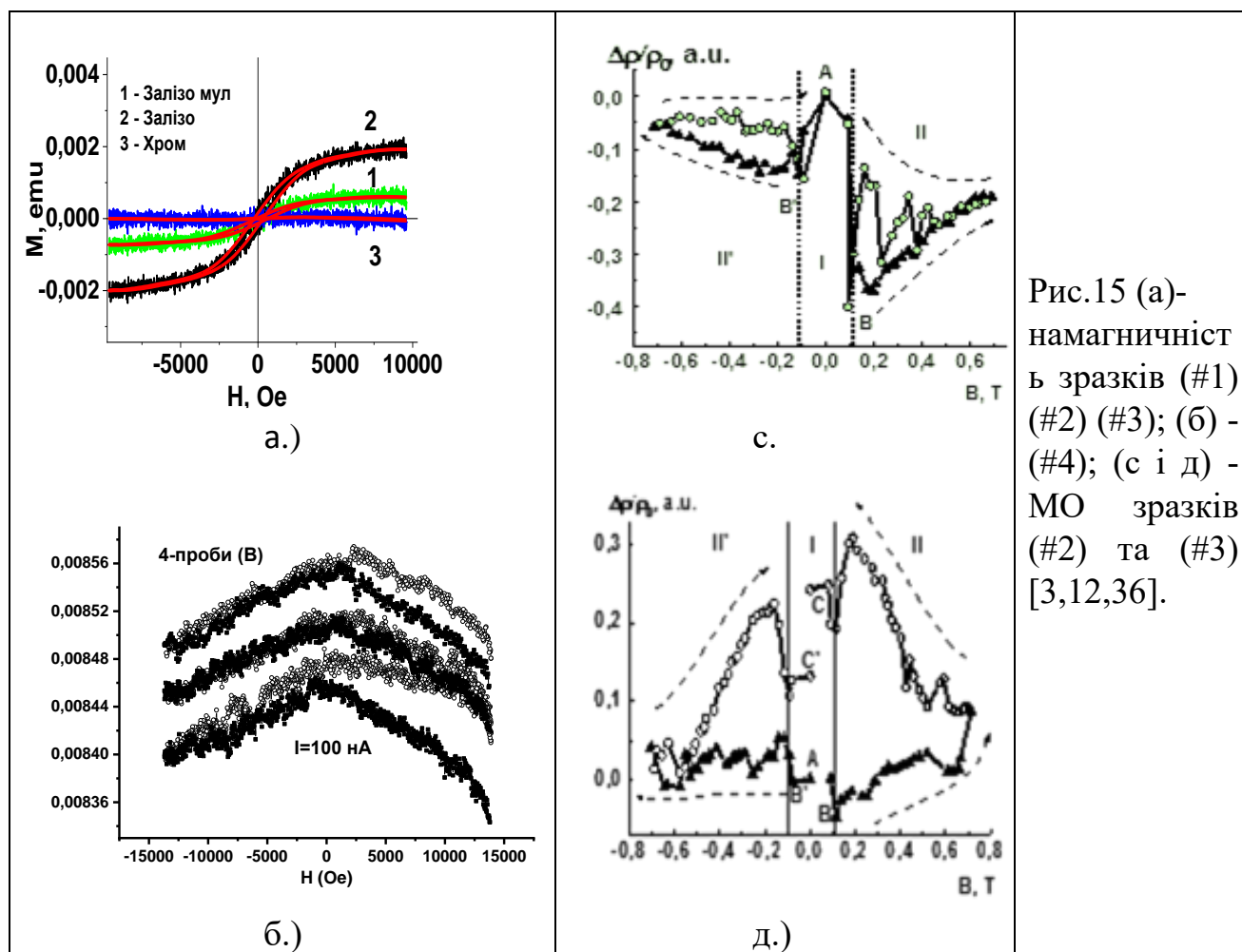


Рис.15 (а)-
намагнічність
зразків (#1)
(#2) (#3); (б) -
(#4); (с і д) -
МО зразків
(#2) та (#3)
[3,12,36].

Визначено залишкову намагніченість (M_e) 0,16 *тети* та коерцитивність (H_c) 0,26 кОе Fe₂O_{3-x} (#1). Виявлено, що Cr₂O₃/p-Si (#2) (Рис. 15.а) має нульову намагніченість, через значні втрати та через кінцеву провідність. Визначено, що нанокompозитні шари Fe₂O_{3-x}(0≤x≤1)/Cr_{3-x}O_{3-y}(0≤x≤2; 0≤y≤2)/Si мають феромагнітну поведінку, з дуже малою петлею гістерезису (Рис. 15.а).

У Дисертації представлено серію дослідів, що виявляють магнітотransпортні властивості зразків. Отримано, у діапазоні полів до 7 кОЕ прикладених нормально до площини плівки, зміну магнітоопору (МО) (Рис. 15.(с.д)) за методом Ван-дер-Пау) на зразках (5x5) мм. На поверхню у кутках (5x5) мм нанесено точкові In контакти. Метод Ван-дер-Пау дозволяє змінювати, як напрямок магнітного поля H , так і полярність струму ($I = 100$ мкА) через зразок.

Використання малих магнітних полів було зумовлено «низьким» значенням рухливості носіїв заряду ($\mu_e \sim 10^{-4}$ м²/Вс) α -Fe₂O₃ (Холівські вимірювання підтверджують p – тип провідності з концентрацією $\sim 10^{18}$ см⁻³ (при $I = 600$ нА).

Для зразка #1 виявлено явище (-) МО (Рис. 15.с). Залежність $R/R_0(H)$ немонотонно зменшується з мінімумом біля 2 кОе (т. В, В' Рис. 15.с). Виявлено для зразка #3 явище позитивного (+) МО (Рис. 15.д). Залежність $R/R_0(H)$ характеризується немонотонним збільшенням на зворотній гілці (максимум R/R_0 при 2 кОЕ). Для зразків спостерігається явище (Рис. 15.(с.д)) гістерезису, що пов'язане із феромагнетиком (α -Fe₂O₃) у складі нанокompозиту Fe₂O₃/Cr₂O₃/p-Si.

Виявлено для зразка #3 явище «ефекту пам'яті», для якого МО не повертається у вихідну точку на зворотній гілці петлі гістерезису (т. А і С(С')) Рис. 15.д). Для зразка #1 «ефект пам'яті» відсутній, МО повертається у вихідну точку (т. А, Рис. 15.с).

Вперше, в обох зразках (#1 і #3,) виявлено польовий ефект «перемикання» МО, який зареєстровано при ~ 2 кОе. Особливості поведінки $\Delta R/R(H)$ зразків (#1 і #3) який пов'язано з їх магнітними властивостями.

З літератури, поведінка феромагнітних матеріалів при низьких магнітних полях описується законом Релея: $\Delta M = \chi_H \cdot \Delta H + \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \Delta H^2$, де ΔM - зміни намагніченості, ΔH - зміни напруженості магнітного поля, χ_H - зворотна магнітна сприйнятність, η - постійна Релея магнітній в'язкості матеріалу.

Відомо, що магнітна симетрія Cr_2O_3 дозволяє існувати додатковій електричній поляризації зразка від ΔH , тобто прямому і непрямому магнітоелектричному (МЕ) ефекту. Отже, встановлений у дослідженні ефект «пам'яті» для зразка #3, що містить Cr_2O_3 , відображає дію магнітного поля, що призводить до збурення та магнітної релаксації спостерігаємо МЕ явища.

Проаналізовано механізми виникнення явища (+) МО у гібридній структурі $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$. Розглянуто вплив магнітного поля, з огляду на електронну взаємодію, на транспортні властивості: силами Лоренца та високорухомими електронами у кремнієвому інверсійному шарі; стрибковим характером МО за наявності домішкових локалізованих станів у н/п; слабкою локалізацією у розорієнтованому середовищі.

Відповідно до останнього механізму, у Si:B^+ носії заряду знаходяться у випадковому потенціалі, що формується розподілом в об'ємі допанту. Ця теорія передбачає залежність виду $H^{0,5}$ у високих полях і H^2 у низьких полях. Що якісно відповідає поведінці МО зразка #1 від магнітного поля (Рис.15.а). Теорія передбачає зміну типу залежності при $H = k_B T / g \mu_B = 2,20$ кОе, де $g = G / (e^2 (h/2\pi))^{-1}$ ($T = 300$ К), що кількісно співпадає з нашим експериментом (Рис. 15.(с.д)).

Виникнення (-МО) на збурення від магнітного поля свідчить про включення іншого механізму провідності нанокompозиту. Поведінка $\text{МО}(H)$ ($T = 300$ К) (Рис. 15.б, де (\square) - скан від 1,4 Т до -1,4 Т, (о) - скан в оберненому напрямку) зразка #4 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ (0,5 Па O_2 ; 293К; 2000x2+2000x2) відображає процес магнітної релаксації, яка призводить до руйнування ефекту слабкої локалізації. При слабкій локалізації (-МО) зазвичай спостерігається у слабких полях ($100 \div 200$) Ое. Для зразка #10 (-МО) спостерігається у полях від 5 кОе до 1,4 Т. Криві (3 повтори по $2^{\text{бі}}$ криві) зшиті з лівого боку, справа вони розповзаються у часі. Проте кімнатна температура наводить на думку про мезоскопічну природу отриманих результатів. Не видно магнітного гістерезису та немає ознак насичення намагніченості магнітоопору. Це говорить про те, що зовнішнє поле керує магнітоопором. Саме негативний магнітоопір (-МО) є відмінною ознакою явища стрибкової провідності, що спостерігається за рахунок перескоків носіїв між різними локалізованими станами.

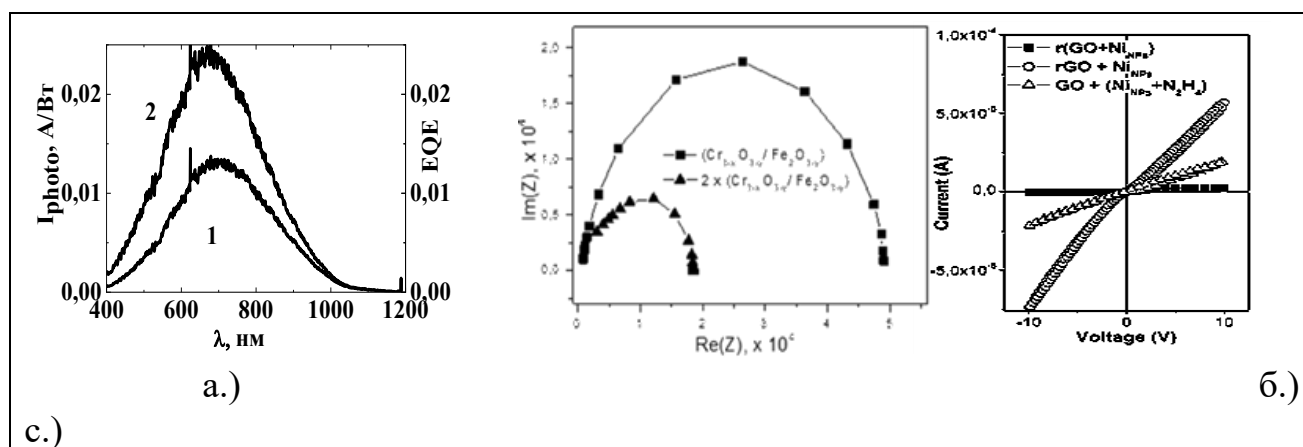


Рис.16 а.) - спектральна SPV залежність у режимі постійної потужності, б) - діаграма Найквіста зразків (#3 -□) та (#4 -Δ), (с) – ВАХ плівок оксиду графену з наночастинками Ni [3,19,36,38,40].

Годограф імпедансу для зразків зображено на Рис.16.б Спектр імпедансу є одиничне півколо зміщене вздовж напрямку дійсної вісі, відносно початку координат. Півкруг меншого (#4) та більшого радіусу (#3) відповідає внеску морфологічних властивостей (зерна, границі) до загального електричного відгуку системи. Можна зробити висновки, що синтезовані зразки мають н/п властивості, що виражено у спаданні значення опору при підвищенні частоти (вліво). По діаметрам півкола наявна різниця в опорі зразків. Збільшення опору (#3) та ємності вказує на наявність границь нанокристалітів. Перше коло (#4) вказує на об'єм з нанокристалітів, як і очікувалося для нано полікристалічного матеріалу.

Зроблено висновок щодо можливості керування намагніченістю нанокомпозиту $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$ при 300K.

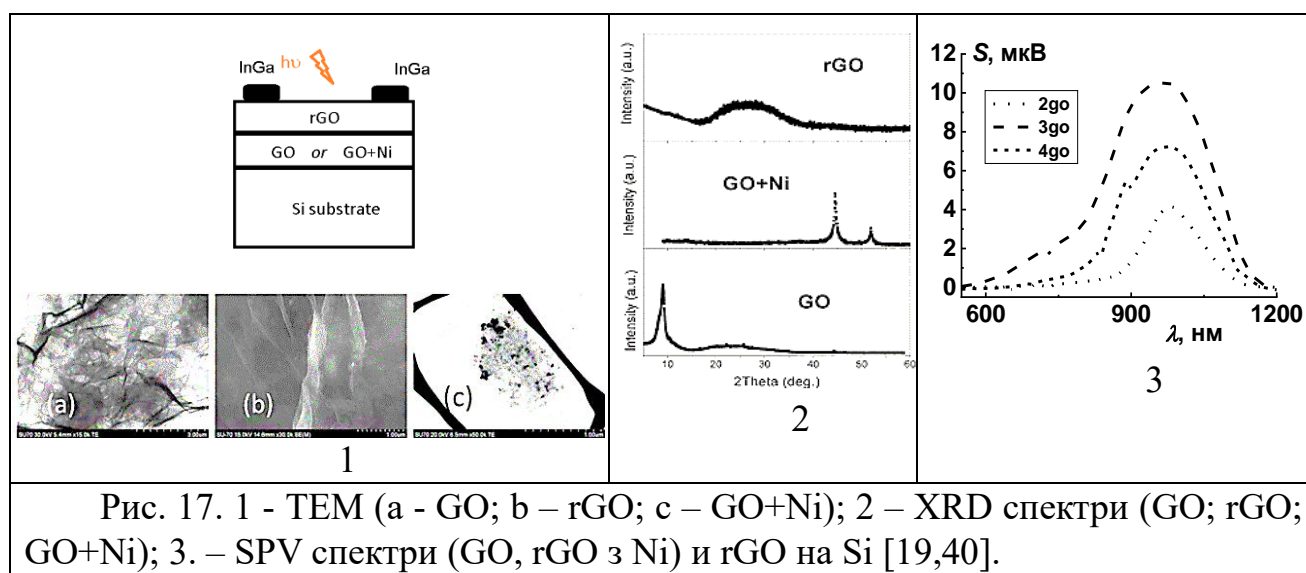
У **Розділі** наведено обґрунтування концепції гібридного модуля для збору енергії сонячного випромінювання - *hybrid solar cells (HSCs)* з функцією суперконденсатора.

Вперше здійснено комплексне поєднання фізичних явищ синтезованої композитної $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$ структури: - процесу поглинання сонячної енергії в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (2,06 еВ) та $p\text{-Si}$ (1,1 еВ); процесу придушення рекомбінації фотоносіїв у подвійному поглиначі $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/\langle 100 \rangle \text{Si}$ (шар $\text{Cr}_2\text{O}_3 \sim 3$ еВ); процесу синергії термо- та фото- електричних властивостей (ФТЕ).

Отримано інтегральний SPV відгук нанокомпозитної структури $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/\langle 100 \rangle \text{Si}$ у спектральній області (360 ÷ 1200) нм, який становить 500 В/Вт, що більш ніж в 100 разів ніж у неоптимізованих структурах.

Отримано, значення вольт-ватної чутливості - S_V та коефіцієнту Зеебека – S для ФТЕ комірки на рівні $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3/\langle 100 \rangle \text{Si}$, 500 В/Вт та 0,5 мВ/К, відповідно.

У дослідженні обґрунтовано функціональні переваги оксиду $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, а саме: - завдяки $E_g \sim 1,95$ еВ, це ефективний фотоперетворювач сонячної енергії; - за рахунок явища Зеебека ($S = 0,1 \div 0,5$ мВ K^{-1}) це ефективний термоперетворювач; - анод суперконденсатора, через високу густину енергії $E = 0,5 C_{sp} V^2$ (C_{sp} – питома ємність, V - широке вікно робочих потенціалів, від -1,2 В до 0,25 В за рахунок



оборотних фарадеївських окисно відновних реакцій $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ на межі розділу електрод/електроліт.

У дослідженні проведено оцінку питомої ємності суперконденсатора на основі $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Вона знаходиться у межах $(100 \div 500)$ Ф/год (σ для $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ знаходиться на рівні $\sim 10^{-5}$ См/м). Обґрунтовано використання $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ електроду, у поєднанні з вуглецевими матеріалами (rGO) з питомою ємністю $(600 \div 900)$ Ф/год. Це дає можливість досягнення густини енергії цього суперконденсатора на рівні свинцево-кислотних акумуляторів $(30 \div 40 \text{ Вт год кг}^{-1})$.

Експериментально підтверджено використання карбонового матеріалу у системі rGO/Fe₂O₃/Si - ФТЕ сонячного модуля. Отримано зразки GO з дисперсії порошку GO у H₂O (1 мг/мл) за допомогою модифікованого методу Хаммера.

Відбувалося приготування Ni (GO + Ni-NPs), GO та GO з наночастками Ni. Суміш (вставка до Рис 17-1) з наночастинками Ni (GO + Ni-NPs) осаджувалася на p-Si підкладинці (300 мкм), із прозорим електродом з відновленого оксиду графену (rGO) поверх. Проводилося вимірювання фото-е.р.с при T = 300 К.

Отримано SEM-зображення (Рис. 17-1 (а, б, в)) зразків осаджених GO, rGO та (GO + Ni-NPs) на Si, відповідно. Підтверджено суцільність шарів GO (Рис.17-1.а) та, rGO (Рис.17-1.б) та деяку агломерацію Ni-NPs для (GO + Ni-NPs) (Рис.17-1.с).

Визначено вплив нановключень. Рентгенограми (Рис. 17-2) зразків GO, (GO + Ni-NPs) та відновленого GO (rGO). Пік біля $2\theta = 9,86^\circ$ відповідає відстані ($d = 0,896 \text{ нм}$) між шарами GO. Це значення ($d = 0,334 \text{ нм}$, $2\theta = 26,4^\circ$) висче за міжшарову відстань графітових лусочок, через наявність оксигенованих функціональних груп та інтеркальованих молекул води.

Виявлено (Рис. 17-3) додаткові піки від Ni, після інтеркаляції наночастинок (GO + Ni-NPs), які пов'язані з різними кристалографічними площинами гранецентрованих кубічних (ГЦК) Ni-NPs [картка JCPDS № 04-0850] частинок.

Визначено кристалічність Ni-NPs ($2\theta = 44,4^\circ$) (Рис. 17-3) та для GO різкий зсув від $9,86^\circ$ до вищих кутів $\sim 25,56^\circ$ та зменшення $d = 0,349 \text{ нм}$ для rGO. Виявлене зменшення d вказує на впорядкування двовимірної структури.

Отримано фотовольтаїчний SPV відгук гібридного матеріалу $rGO/GO/(GO + Ni-NPs))/p-Si$. Наведено BAX (Рис. 16.с) та SPV спектри зразків $rGO/GO/(GO + Ni-NPs))/p-Si$ відповідно та їх поведінка в залежності від домішки Ni.

Визначено роль включень металевої фази (Ni) на фото- та електричні характеристики композиту $rGO/GO/(GO + Ni-NPs))/p-Si$. У всіх зразках спостерігається фотовольтаїчний $S(\lambda)$ відгук (Рис. 17-3, архітектура на Рис.17-1) та оптичного поглинання (FWHM) ~ 1100 нм, яке відповідає $p-Si$ підкладинці. Отримано SPV відгук у короткохвильовій області (~ 820 нм та ~ 890 нм), який є унікальною особливістю для досліджених плівок GO з високою концентрацією Ni.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено наукову проблему з встановлення механізмів та особливостей модифікація функціональних матеріалів CdHgTe CdZnTe та оксидів перехідних металів (Fe, Cr) шляхом радіаційно-пучкових процесів. Виходячи з аналізу проведених досліджень можна сформулювати такі основні результати та висновки роботи:

1. Встановлено закономірності модифікації поверхні гетероепітаксійних систем на основі $p-Hg_xCd_{1-x}Te$ ($x = 0,223$)/CdZnTe при іонному бомбардуванні (Ag^+/B^+). Визначено роль просторової геометрії бомбардування на електрофізичні та фотоелектричні властивості та отримано данні про дилатаційну природу структурної неврівноваженості стану системи Hg(Cd)Te.

2. Вперше встановлено можливість ковзного бомбардування $Ag^+ p-Hg_xCd_{1-x}Te$ ($x = 0,223$)/CdZnTe. Це дозволяє створення функціонального н/п нанокompозиту $p-(Ag_2O - Hg(Cd)Te)$ чутливого до суб-ТГц (140 ГГц) області спектру. Показано, що наявність Ag_2O визначає механізм чутливості електрично малого диполю ESA у геометрії «ядро - Hg(Cd)Te/оболонка - Ag_2O », де Ag_2O це паразитний елемент ближнього поля антени - NFRP, який перевершує стандарти Чу.

3. Аналіз механізмів ефективності детектування у суб-ТГц/ТГц діапазоні частот н/п матеріалом Hg(Cd)Te дозволяє розглядати створення масивів суб-ТГц детекторів кімнатної або помірно охолодженої температури при умовах використання резонансних NFRP антен, так і у безантенному виконанні.

4. Отримано просвітлені алмазоподібні вуглецеві плівки $a-C:H:N$, нанесені на Hg(Cd)Te та Cd(Zn)Te, плазмово-стимульованим осадженням. Встановлено та з'ясовано утворення та оптичні параметри складної оптичної системи синтезованих покриттів $a-C:H:N$ з двома перехідними шарами та встановлено фізичні причини цього явища.

5. Запропоновано методику плазмохімічного осадження та іонно-плазмової (H^+ , N^+ , Ar^+) обробки поверхні Hg(Cd)Te та Cd(Zn)Te і неруйнівного контролю та тестування деградаційної стійкості DLC плівок на основі результатів еліпсометрії та ІЧ - спектроскопії. На основі оригінальних технологічних рішень отримано експериментальні зразки $a-C:H:N/(Hg(Cd)Te)$ та $a-C:H:N/Cd(Zn)Te$ з

використанням перехідних шарів.

6. Вперше, з метою пасивації бічних поверхонь зразків Х/гамма-детекторного матеріалу методикою плазмохімічного осадження та іонно-плазмової (Ar^+), отримано зразки $\alpha\text{-C:H:N/Cd(Zn)Te}$. Вперше отримано ефект значного зменшення струму витоку (не менше ніж у 10 разів), як результат пасивації бічних поверхонь зразків Х/γ детекторного матеріалу $\alpha\text{-C:H:N}$ плівкою.

Як результат відбувається збільшення на порядок питомого опору ($10^8 \rightarrow 10^9 \Omega\text{м}$) досліджуваних зразків та відбувається підвищення робочих значень напруги зміщення у детекторній структурі $\alpha\text{-C:H:N/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,02$).

7. Вперше виявлено взаємозв'язок магнітних властивостей нанокompозитних плівок $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ з архітектурою та умовами RPLD осадження на кремнії. Отримано негативний магнітоопір нанокompозитних плівок $\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) та позитивний магнітоопір систем з шарів $\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)/ $\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ ($0 \leq x \leq 2$; $0 \leq y \leq 2$) на кремнії у малих полях при кімнатній температурі. Проведено порівняльний аналіз та пояснення явищам магнітного гістерезису, ефекту перемикування магнітоопору (+ -МО) у сильних та м+алих магнітних полях.

8. Вперше розроблено концепцію використання нанокompозитних плівок $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$, як функціонального матеріалу для гібридного фото-термо-електричного (ФТЕ) перетворювача сонячної енергії.

9. Вперше експериментально встановлено наявність синергетичного поєднання фото- та термоелектричних (ФТЕ) явищ у зразках із багатошарових комбінацій оксидів Cr/Fe на кремнії зумовленого фото- та термо- ефектом Зеебека у синтезованої н/п системі.

10. Вперше запропоновано та обґрунтовано концепцію гібридного модуля, архітектура якого дозволяє збирати та накопичувати енергію в одному пристрої, що забезпечується квазітвердотільним суперконденсатором на базі $r\text{GO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ з очікуваними робочими параметрами: питомою ємністю не нижче 600 Ф/г; густиною енергії не менше за 30 Вт год кг^{-1} . Обґрунтовано та експериментально доведено використання карбонового матеріалу у якості контакту для гібридних ФТЕ сонячних модулів $r\text{GO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$.

НАУКОВІ ПРАЦІ У ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Savkina Rada, and Oleksii Smirnov. "Photoconductive and Photovoltaic IR Detectors." *Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors: Volume 2, Photodetectors*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 23-52. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-20510-12>
2. Smirnov A.B., Savkina R.K. (2017) Nanostructuring Surfaces of HgCdTe by Ion Bombardment. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications. NANO 2016. Springer Proceedings in Physics, vol 195. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56422-730>

3. Demchenko, I., Mulenko, S., Smirnov, A., Savkina, R., Walczak, M., & Voloshin, N. Electrical and Photoelectric Properties of Iron/Chromium Oxide Nanolayers Composite Structures. Chapter 26 in Springer Proceedings in Physics, 2020, Vol. 244, p.259-268. ISBN 978-981-15-3995-4. <https://doi.org/doi:10.1007/978-981-15-3996-126>
 4. A.B. Smirnov Solid state composites produced by ion implantation Chapter 5 in Solid State Composites and Hybrid Systems: Fundamentals and Applications ed. by R Savkina & L Khomenkova CRC Press, 2018. <https://doi.org/10.1201/9781351176071>
 5. A.B. Smirnov Electrical characterization of oxide-based materials using impedance spectroscopy. Chapter 3 in Oxide-based Materials and Structures: Fundamentals and Applications ed. by R Savkina & L Khomenkova: CRC Press, 2020. <https://doi.org/10.1201/9780429286728>
 6. Корсунська Н.О., Маркевич І.В., Борковська Л.В., Хоменкова Л.Ю., Савкіна Р.К., Смірнов О.Б., Венгер Є.Ф., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В. Вплив термічно та радіаційно стимульованих процесів дифузії на властивості матеріалів мікроелектроніки та приладів на їх основі Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2019. – 211 с. - ISBN 978-617-527-201-5.
- Основні наукові результати, опубліковані у фахових виданнях, віднесених до першого і другого кварталів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago:*
7. Mulenko, S. A., Stefan, N., Skoryk, M. A., Popov, V. M., Smirnov, A. B., & Gudymenko, O. Y. (2022). Laser synthesis of hybrid Fe/Cr 2D structures based on their oxides for thermo-sensors with high sensitivity. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 33(27), 21258-21269. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08850-1> (Q2).
 8. Stefan, N., Mulenko, S. A., Skoryk, M. A., Popov, V. M., & Smirnov, A. B. (2023). Influence of hybrid Fe/Cr parameters structures synthesised with laser radiation on their photosensitivity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(26), 1830. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-11149-4> (Q2).
 9. Smirnov, O.B., Savkina, R.K., Udovytska, R.S. *et al.* Nanostructured ternary compound Hg(Cd)Te-based composite formed by ion bombardment Ag^+ for hybrid photonics. *J Mater Sci: Mater Electron* **33**, 26178–26189 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09304-4> (Q2).
 10. Rada Savkina, Aleksej Smirnov, Iurii Nasieka, Sergii Mulenko, Marcin Strawski, Wojciech Paszkowicz, Tetyana Kryshchab (2020) Hybride photovoltaic-thermoelectric structure based on multilayer combinations of Cr/Fe oxides. Materials Letters. Volume 280, 1 December 2020, 128551. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128551> (Q1).
 11. Dobrovolsky, V., Sizov, F., Kamenev, Y. and Smirnov, A. "Ambient temperature or moderately cooled semiconductor hot electron bolometer for mm and sub-mm regions" Opto-Electronics Review, vol. 16, no. 2, 2008, pp. 172-178. <https://doi.org/10.2478/s11772-008-0003-6> (Q2).
 12. A.B. Smirnov, M.L.Sadovnikova, R.K.Savkina, S.A. Mulenko, S.Kryvyi, N.Stefan Structural and magnetoresistive properties of nanometric films based on iron and

chromium oxides on the Si substrate // Nanoscale research letters. - 2016.-Vol. 11: 467. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1684-2> (Q2).

13. Smirnov A.B., Savkina R.K., R.S. Udovitska, Gudymenko A.I., Kladko V.P., Korchovyi A.A Ion Beam Nanostructuring of HgCdTe Ternary Compound // Nanoscale research letters. - 2017.-Vol. 112: 320. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2093-x> (Q2).

14. Smirnov, A.B., Savkina, R.K., Nasieka, I.M., Strelchuk, V.V., Demchenko, I.N., Kryshtab T. Optical characterization of the HgCdTe-based composite structure obtained by Ag ion implantation. J Mater Sci: Mater Electron 29, 15708–15714 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9177-y> (Q2).

у виданнях 3-го квартіля (Q3) за класифікацією SCImago:

15. A.B. Smirnov, R.K. Savkina, A.I. Gudymenko, V.P. Kladko, F.F. Sizov, and C. Frigeri. Effect of Stress on Defect Transformation in B⁺ and Ag⁺ Implanted HgCdTe/CdZnTe Structures // Acta Physica Polonica A.-2014.- Vol.125, № 4.- pp.1003-1005. <http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.125.1003> (Q3).

16. N. I. Klyui, V. B. Lozinskii, A. N. Luk'yanov, V. A. Morozhenko, R. K. Savkina, F. F. Sizov, A. B. Smirnov, and V. A. Deriglazov Ion – Plasma Treatment of Cd_{1-x}Zn_xTe (x ~ 0.04) Single Crystals and Application of Antireflection Diamond Like Carbon Films // Technical Physics. – 2012. - Vol. 57. - No. 8. pp. 1121–1126. <https://doi.org/10.1134/S1063784212080142> (Q3).

17. A.B. Smirnov, R.K. Savkina, A.I. Gudymenko, V.P. Kladko, A.A. Korchevyi, F.F. Sizov, R.S. Udovitska Nano-scale pattern formation on the surface of HgCdTe produced by ion bombardment \ Phys. Status Solidi (c).-2015.-Vol.12, №8.- P. 1175-1178. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400302> (Q3).

18. Sizov, F.F., Savkina, R.K., Smirnov, A.B., Udovytska R.S., V.P. Kladko, A.I. Gudymenko, Safryuk, N.V., Lytvyn O.S. Structuring effect of heteroepitaxial CdHgTe/CdZnTe systems under irradiation with silver ions // Physics of the Solid State. - 2014.- v. 56, 11.-cc. 2091-2096. <https://doi.org/10.1134/S1063783414110286> (Q3).

19. Lena Okhay, Rahul Krishna, Elby Titus, Kateryna Andreeva, Rada Savkina, Oleksii Smirnov, Photovoltage Study of Graphene Oxide with Ni Nanoparticles, Materials Today: Proceedings, Volume 2, Issue 1, 2015, Pages 431-435, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.051>. (Q3).

У виданнях 4-го квартіля (Q4) за класифікацією SCImago:

20. Smirnov A.B., Korchovyi A.A., Krolevets N.M., Morozhenko V.A., Savkina R.K., Udovytska R.S., Sizov F.F. Study of the Morphology of p-CdHgTe Layers Structured by Grazing Silver-Ion Beam Irradiation // Ukr. J. Phys. 2015, Vol. 60, N 10, p.1055-1061. <https://doi.org/10.15407/ujpe60.10.1055> (Q4).

21. Sizov F. F., Klyui N. I., Luk'yanov A. N., Savkina R. K., Smirnov A. B., Evmenova A. Z. Antireflection Properties of Diamondlike Carbon Films on Cd_{1-x}Zn_xTe (x ~ 0.04) Single Crystals // Technical Physics Letters. - 2008.- Vol. 34, No. 5.- pp. 377–380. <https://doi.org/10.1134/S1063785008050052> (Q4).

22. Smirnov, A.B., O.S. Litvin, V.O. Morozhenko, et al. 2013. Role of Mechanical

- Stresses at Ion Implantation of CdHgTe Solid Solution // Ukr J Phys 58: 872-880. (Q4).
23. Ruslana S. Udovytska; Alex B. Smirnov; Rada K. Savkina Improvement of the IR detectors by plasmon resonance using transparent nanoparticles obtained by the colloid dispersion synthesis: overview Proceedings SPIE Volume 10691, Advances in Optical Thin Films VI; 106911H (2018) <https://doi.org/10.1117/12.2303472>. (Q4)
24. Smirnov, A. B. "Plasma treatment of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x \sim 0.04$) single crystals." *Functional Materials* 18.2 (2011): 176-180.(Q4).
25. Смирнов А.Б., Р.К. Савкина, Р.С. Удовицкая, А.З. Евменова, Ф.Ф. Сизов Свойства гетероэпитаксиальных структур CdHgTe/CdZnTe после облучения B^+ Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.- 2012.- Том.3 (9),№1.-С.62-69. <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.1.112829>
26. Сизов, Ф. Ф., Забудский, В. В., Смирнов, А. Б., Гуменюк-Сычевская, Ж. В., Добровольский, В. Н., & Момот, Н. И. (2010). Приемник субмиллиметрового излучения на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,2$). *Прикладная физика*, (5), 114-117.

Патенти

27. Савкіна Р.К., Смірнов О.Б., Удовицька Р.С., Сизов Ф.Ф. Спосіб отримання наноструктур на поверхні гетероепітаксійної плівки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ "Промислова власність"- 2014.-№4 Патент України на корисну модель № 87886 від 25.02.14.
28. Сизов Ф.Ф., Савкіна Р.К., Смірнов О.Б. Ганус В.О., Ключ М.І. Спосіб просвітлення КРТ ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) фотоприймача ІЧ-випромінювання "Промислова власність"-2014.-№22 Патент України на корисну модель № 94605 від 25.11.2014.
29. Сизов Ф.Ф., Савкіна Р.К., Смірнов О.Б. Удовицька Р. С. Спосіб отримання наноструктур на поверхні гетероепітаксійної плівки p-CdHgTe "Промислова власність"-2016.-№3. Патент України №22614-3А-14 Заявка № а201408608 від 10.02.2016.
30. R. K. Savkina, A. B. Smirnov, S.O. Yuriev, S.I. Yuschuk, Ukrainian patent UA 31098 for "Control of defect structure of semiconductor crystals" of 25.03.2008.
31. F. F. Sizov, R. K. Savkina, and A. B. Smirnov, Ukrainian patent UA40000 for "Uncooled photovoltaic detector of IR radiation" of 25.03.2009.

Матеріали наукових конференцій та семінарів

32. Savkina R.K., Smirnov A.B., Kryshab T., Krivko A. Fabrication of a $\text{CaSiO}_3\text{-SiO}_2\text{-Si}$ nanoheterosystem through ultrasonically induced pathways of silicon modification // The 19th International Conference on Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology Mondsee (GADEST XIX 2022), Austria, September 10-16, 2022.
33. Смірнов О. Б., Савкіна Р. К. Іонно-синтезована композитна структура $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,223$) для мультиспектральних детектуючих систем // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: тези доповідей (м. Кременчук, 14-16 травня 2022 р.).
34. Rada Savkina, Aleksej Smirnov, Nikita Voloshin, Roman Grill "Diamond-like carbon nanocomposites"// 8th International Conference "Nanotechnologies and

Nanomaterials" NANO-2020: 26-29 серпня 2020 р., м. Львів, Україна.

35. Rada Savkina, Aleksej Smirnov, Anatoly Luk`yanov, Dmytro Golyachenko, Nikita Voloshin, Roman Grill "Diamond-like Carbon Coating in Improving the Performance of II-VI Devices" // IEEE International Conference "NANOMATERIALS: APPLICATIONS & PROPERTIES", NAP 2020: 9-13 листопада 2020 року, online.
36. Iu. Naseka, S. Mulenko, W. Paszkowicz, R. Savkina, and A. Smirnov. Nanocomposites based on the transitional metal oxides //symposium O: Synthesis, processing and characterization of nanoscale multifunctional oxide films VII of the E-MRS 2019 Fall Meeting. Warsaw. Poland. O P11.8.
37. R. Savkina, A. Smirnov, A. Shevchik-Shekera, R. Udovitska, I. Demchenko, S. Mulenko, N. Stefan, and T. Kryshtab. 2018. Hybrid system of the nanometric layers based on transition metals oxides useful for spintronic. In 34th ICPS congress, from 29th July to 3rd August, 2018 Montpellier, France.
38. Tatiana Barlas, Olha Kondratenko, Sergii Mamykin, Iurii Naseka, Rada Savkina, Aleksey Smirnov, Andriy Kryvko, Tetyana Kryshtab. 2019. Optical properties of nanocomposites based on the transitional metal oxides. In XXVII International Materials Research Congress, Cancún, México, August 18-23, 2019.
39. Smirnov A. B. & Savkina, R. K. (2016, August). Nanostructuring surfaces of HgCdTe by ion bombardment. In International Conference on Nanotechnology and Nanomaterials (pp. 405-416). Springer, Cham.
40. O.Okhay, R.Krishna, E. Titus, J.Gracio, K.Andreeva, O.Smirnov Photovoltage study of graphene oxide films with Ni nanoparticles 5th International Conference on Advanced Nanomaterials, 2-4 July 2014, Aveiro, Portugal.
41. Ф.Ф. Сизов, А. Б.Смирнов, Р.С. Удовичка Рентгеноструктурный анализ гетероструктуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ после ионной имплантации ионами Ag^+ и низкоэнергетической обработки. Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2014) Кременчук, 20 - 23 травня 2014 року, с. 99-100.
42. T. Kryshtab, A. B. Smirnov Multi-Band Radiation Detector Based on HgCdTe Heterostructure 17th International Conference on II-VI Compound, 13-18 september, Paris, 2015, Mo-P48, P.202.
43. M.L. Sadovnikova, F.F. Sizov, A.B. Smirnov, S.A. Mulenko Magnetoresistivity of nanometric films based on iron and chromium oxides Int. research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials", 26-29 August 2015, Lviv, Ukraine, p. 304.
44. R. S. Udovitska, A. B. Smirnov Nano-heterostructures based on solid solution HgCdTe obtained using silver ion implantation 2015 OPTICS + PHOTONICS, 9558: Nanostructured Thin Films VIII, 9-13 August, 2015, USA, CA, San Diego, 2015 - P. 215.
45. A.B. Smirnov, S. A.Mulenko, N. Stefan, T.G.Kryshtab Light-induced phenomena in nanometric films based on iron and chromium oxides ($\text{Fe}_2\text{O}_{3-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) and $\text{Cr}_{3-x}\text{O}_{3-y}$ ($0 \leq x \leq 2$; $0 \leq y \leq 2$)) E-MRS Spring Meeting, Symposium T, Strasbourg, France, - May 22-

26, 2017.

46. Dobrovolsky, V. N., Sizov, F. F., Kamenev, Y. E., Gumenjuk-Sichevska, J. V., & Smirnov, A. B. (2007, June). Millimeter and submillimeter semiconductor hot electron bolometer. In *2007 International Kharkov Symposium Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW)* (Vol. 1, pp. 198-200). IEEE.

47. Є.В. Малий, О.Б. Смірнов, Р.К. Савкіна, Д.П. Стратілат *DLC/Cd(Zn)Te X/гамма-детектор з високопродуктивними можливостями для моніторингу навколишнього середовища IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-9, Ужгород, Україна, 22-26 травня 2023 р. Тези доповідей*, с. 261-262 (2023)

48. О. Б. Смірнов, Р.К. Савкіна, Є.В. Малий, Д.П. Стратілат *Перспективи використання алмазоподібних покриттів у CdZnTe-детекторах для радіаційного контролю безпеки та довкілля // IV Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», 28-29 вересня 2023 року, м. Київ, Україна. Збірник тез*, с. 98-100

АНОТАЦІЯ

Смірнов О.Б. Радіаційно-пучкові процеси модифікації функціональних матеріалів CdHgTe, CdZnTe та оксидів перехідних металів (Fe, Cr) - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.- Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, 2025.

Дисертацію присвячено встановленню закономірностей формування наноструктур та нанокомпозитів на основі CdHgTe CdZnTe, оксидів перехідних металів (Fe, Cr)/Si і фундаментальних взаємозв'язків їх атомної та електронної будови, структури та фазового складу з контрольованими функціональними властивостями.

У дисертаційній роботі запропоновано нові, науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, сукупність яких є досягненням у розвитку іонного наноструктурування, саморганізації та модифікації потрібної сполуки HgCdTe. Це дозволяє створювати н/п матеріали з певними функціональними властивостями для мультиспектральних ІЧ, ТГц приладів.

Підвищенням ефективності детекторного матеріалу присвячена сукупність результатів, які дозволили використовувати пасивування поверхні CdZnTe X/гамма детекторів та оптичне просвітлення HgCdTe ІЧ - детекторів плазмо-хімічним нанесенням (PE-CVD метод) мікрокомпозитних алмазоподібних вуглецевих плівок α -C:H:N (DLC). У цій роботі отримано принципово нові результати з формування комбінованих нанокомпозитних структур на основі оксидів перехідних металів (заліза та хрому). Методи та режими імпульсного лазерного напилення (RPLD метод) сприяють розвитку уявлень про різноманітність їх магнітних, електричних та фотоелектричних характеристик, що дало можливість у дослідженні спрогнозувати створення нових високоякісних плівкових та

нанокомпозитних матеріалів для мікроелектроніки, мікро-та нанофотоніки.

Прикладом є збирання дарової енергії за рахунок поєднанням фото- і термоелектричних властивостей та функції суперконденсатору в єдиній гібридній н/п системі оксидів перехідних металів (Fe, Cr) та функції суперконденсатору, сприятиме максимально ефективному перетворенню сонячної енергії цим новим функціональним матеріалом.

Ключові слова: імплантація, лазер, модифікація, нанокомпозит, н/п, плазма, самоорганізація, суперконденсатор, функціональним матеріал

SUMMARY

Smirnov O.B. Radiation - beam modification processes of functional materials CdHgTe, CdZnTe and transition metal oxides (Fe, Cr) - Manuscript.

Doctor of Science Thesis in Physics and Mathematics (specialty 01.04.07 - Solid State Physics). - V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to establishing the regularities of the formation of nanostructures and nanocomposites based on CdHgTe CdZnTe, transition metal oxides (Fe, Cr)/Si and the fundamental relationships of their atomic and electronic structure, structure and phase composition with controlled functional properties.

The dissertation work proposes new, scientifically substantiated theoretical and experimental results, the totality of which is an achievement in the development of ionic nanostructuring, self-organization and modification of the ternary compound HgCdTe. This allows creating novel materials with certain functional properties for multispectral IR, THz devices. The set of results that allowed using the passivation of the surface of CdZnTe X/gamma detectors and optical illumination of HgCdTe IR detectors by plasma-chemical deposition (PE-CVD method) of microcomposite diamond-like carbon films a-C:H:N (DLC) is devoted to increasing the efficiency of the detector material.

In this work, fundamentally new results were obtained on the formation of combined nanocomposite structures based on transition metal oxides (iron and chromium). Methods and modes of pulsed laser sputtering (RPLD method) contribute to the development of ideas about the diversity of their magnetic, electrical and photoelectric characteristics, which made it possible to predict the creation of new high-quality film and nanocomposite materials for microelectronics, micro- and nanophotonics.

An example is the harvesting of free energy by combining photo- and thermoelectric properties and supercapacitor function in a single hybrid n/p system of transition metal oxides (Fe, Cr) and supercapacitor function, which will contribute to the most efficient conversion of solar energy by this new functional material.

Keywords: antenna, charge carriers, implantation, laser, magnetoresistance, modification, nanocomposite, semiconductor, plasma, self-organization, supercapacitor