

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

ЦИБРІЙ ЗІНОВІЯ ФЕДОРІВНА



УДК 621.315.592; 621.383.522; 538.958; 535.11

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБЛЕННЯ
HgCdTe-ПРИЙМАЧІВ ІЧ ТА ТГ_ц ДІАПАЗОНІВ
І ЕЛЕМЕНТІВ БЛОКУВАННЯ ІЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

**Науковий
Консультант:** член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних
наук, професор **Сизов Федір Федорович**
завідувач відділу фізики і технології низьковимірних систем
Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

**Офіційні
опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор
Іжнін Ігор Іванович, заступник начальника відділу Науково-
виробничого підприємства «Карат», професор кафедри
напівпровідникової електроніки Національного університету
«Львівська політехніка»

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних
наук, професор **Притула Ігор Михайлович**,
директор Інституту монокристалів НАН України

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних
наук, професор **Одулов Сергій Георгійович**,
головний науковий співробітник відділу оптичної квантової
електроніки Інституту фізики НАНУ.

Захист відбудеться “8” вересня 2021 р. о 16 год. 15 хв. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.199.01 при Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України (03028, Київ - 28, пр. Науки, 41).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (03028, Київ - 28, пр. Науки, 45).

Автореферат розіслано “4” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.199.01
доктор фізико-математичних наук



О.Б. Охрімєнко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прогрес в області напівпровідникової фотоелектроніки пов'язаний із розробкою нових технологій формування приймачів інфрачервоного (ІЧ, 1 – 25 мкм) та терагерцового (ТГц, 0,1 – 10 ТГц) діапазонів спектра, а також багатоспектральних приймальних пристроїв, які призначені для одержання інформаційних даних з різних спектральних ділянок в умовах складного динамічного фону. Беручи до уваги вимоги та потреби сьогодення, важливим і актуальним є проведення наукових досліджень в сфері безпеки, біомедицини, телекомунікацій, контролю якості продуктів та виявлення небезпечних речовин, тощо, з якими будуть пов'язані розробки високотехнологічних продуктів у галузі мікро- та нанотехнологій і, зокрема, отримання приймачів ІЧ та ТГц випромінювання. Особливо це стосується розвитку власне технології формування напівпровідникових тонкоплівкових структур для створення пристроїв активного та пасивного бачення для вказаних спектральних діапазонів.

Потрійна напівпровідникова сполука $HgCdTe$ (кадмій-ртуть-телур, КРТ) завдяки своїм фізичним властивостям (можливість варіації складу, концентрації носіїв, рухливості носіїв заряду, типу провідності) є одним із найкращих ІЧ матеріалів для спектральних діапазонів у вікнах прозорості атмосфери 1-2,5 мкм, 3-5 мкм, 8-14 мкм. Детектори на її основі можуть функціонувати з граничними параметрами в режимі, обмеженому фоновим випромінюванням. Не дивлячись на велику кількість досліджень і прогресу, досягнутому у виробництві детекторів на основі $HgCdTe$, технологічні аспекти, як власне, і самі детектори за рахунок можливості їх подвійного призначення не є загальнодоступними і відкритими.

ТГц технології останніми десятиліттями викликають цікавість для можливого їх застосування з науковою та комерційною метою. Наприклад, за рахунок розташування у цьому діапазоні коливальних спектрів багатьох молекул ТГц приймачі можуть бути використані для ідентифікації біологічних речовин, наркотиків та вибухових речовин, для систем візуалізації, безпеки, тощо. На цей час однією з проблем створення ТГц систем є практична відсутність неохолоджуваних приймачів ТГц випромінювання, які б дозволили розробляти комерційно привабливі системи бачення, спектроскопії, безпеки та зв'язку з великим об'ємом передачі інформації, для чого потрібні чутливі та швидкодіючі детектори випромінювання. Для широкого використання цих технологій важливим є розробка та формування неглибоко охолоджуваних детекторів як ІЧ, так і ТГц діапазонів спектра, які б дозволили створювати вказані системи, які працюють у реальному масштабі часу.

Вищеописана проблематика обумовила необхідність розроблення топології, елементів технології, виготовлення експериментальних зразків ІЧ та ТГц приймачів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ та дослідження їх електрофізичних характеристик з метою аналізу механізмів функціонування вказаних приймачів для подальшого вдосконалення їх робочих параметрів. У дисертаційній роботі при використанні різних фізичних механізмів показана можливість реалізації двох- чи багатодіапазонних приймачів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ в ІЧ (при застосуванні матеріалу з різним хімічним складом, за рахунок міжзонного

поглинання) та ТГц (на основі розігріву електронного газу в біполярному напівпровіднику) діапазонах спектра.

Актуальною на сьогоднішній час є проблема не тільки детектування ІЧ випромінювання, але і захист від нього. Придушення ІЧ образів об'єктів, що випромінюють, є одним з найактуальніших завдань як у цивільних, так і у військових галузях. Блокування паразитного фонового ІЧ випромінювання є необхідним для реалізації роботи високо охолоджуваних ТГц детекторних системи з граничними параметрами та зниження шуму в них, наприклад, для астрофізичних досліджень. З цією метою було проведено розроблення елементів селективних фільтрів на основі композитних структур *AlN*, *MgO* / полімерна підкладка, блокуючих ІЧ та прозорих у видимому та ТГц діапазонах спектра.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі «Фізики і технології низьковимірних систем» Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України згідно з планами відомчих науково-дослідницьких тем та конкурсних проєктів:

- Бюджетна тема № 42 «Комплексні дослідження електронних явищ в матеріалах та структурах інфрачервоної мікрофотоелектроніки» (№ держреєстрації 0102U001678), 2002 – 2006 рр.
- Бюджетна тема №III-7-06 «Фізико–технологічні дослідження напівпровідникових матеріалів та низьковимірних структур для ІЧ мікрофотоелектроніки» (№ держреєстрації 0106U002053), 2006 – 2010 рр.
- Державна цільова науково-)технічна програма «Розробка і освоєння мікроелектронних технологій, організація серійного випуску приладів і систем на їх основі на 2008-2011 роки», тема №54 «Створення приладів інфрачервоної мікроелектроніки» (№ держреєстрації 0108U003162), 2008 – 2011 рр.
- Бюджетна тема №III-41-07 «Фізичні та фізико-технологічні аспекти створення і характеристики напівпровідникових матеріалів і функціональних структур сучасної електроніки» (№ держреєстрації 0106U000657), 2007 – 2011 рр.
- НДР «Надшвидкі транзистори з керованою лавинною ударною іонізацією та міжзонним тунелюванням» відповідно конкурсу спільних наукових проєктів НАН України – CNRS та на підставі Розпорядження Президії НАН України від 19.04.2009 р., № 284; дог № 3 (№ держреєстрації 0109U004982), 2009 – 2011 рр.
- НДР «Створення фото- та газочутливих нанокompозитів на основі напівпровідникових оксидів, що сенсibiliзовані квантовими точками A_2B_6 » дог. № М/310-2012 від 26.07.2012р., дог. № М/270-2013 від 18.06.2013р., (за лотом №1, з Держагенством) (№ держреєстрації 0112U006104), 2012 – 2013 рр.
- НДР № 11/10-Н «Фізичні процеси детектування випромінювання терагерцового/субміліметрового діапазону за допомогою польових нанотранзисторів» (№ держреєстрації 0110U005698), 2010 – 2014 рр.
- Бюджетна тема № III-41-11 «Фізичні та фізико-технологічні аспекти створення сучасних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано і оптоелектроніки» (№ держреєстрації 0112U002349), 2011 – 2012 рр.
- Бюджетна тема № III-7-11 «Дослідження, розробка та діагностика напівпровідникових пристроїв мікрохвильової та ІЧ нанофотоелектроніки» (№ держреєстрації 0111U002515), 2011 – 2015 рр.

- НДР «Многоспектральный фотоприемник для регистрации излучения в ИК и ТГц областях спектра на основе CdHgTe» відповідно до конкурсу спільних наукових проектів НАН України та Сибірського Відділення РАН 2012 року та розпорядження Президії НАН України від 25.01.2013 № 43, 2013 – 2014 рр.
- Бюджетна тема № III-10-12 «Розробка сучасних напівпровідникових матеріалів і структур для опто-, мікро- і сенсорної електроніки» (№ держреєстрації 0112U002102), 2012 – 2014 рр.
- Бюджетна тема № III-41-12 «Фізичні та фізико-технологічні аспекти створення сучасних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано- і оптоелектроніки» (№ держреєстрації 0112U002349), 2012 – 2016 рр.
- Проект SPS #984544 «Uncooled Terahertz Arrays for Imaging Explosives» за програмою НАТО «Наука для миру і безпеки», 2014 – 2016 рр.
- Цільова науково-технічна програма НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», Тема ІФН-2015/1 «Розробка маскуючих композиційних покриттів для зменшення потенційного виявлення об'єктів в ІЧ діапазоні спектру» (№ держреєстрації 0115U005095), 2015 – 2016 рр.
- Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій», проект № 11/15-Н «Терагерцові властивості напівпровідникових наноструктур з високою рухливістю носіїв з метою створення детекторів випромінювання» (№ держреєстарції 0115U005017), 2015 – 2019 рр.
- Відомча тематика ВФА НАНУ № III-7-16 «Дослідження, розробка та діагностика напівпровідникових пристроїв мікрохвильової та ІЧ нанофотоелектроніки» (№ держреєстрації 0116003696), 2016 – 2020 рр.
- Відомча тематика ВФА № III-10-18 НАНУ «Розробка нових методів формування функціональних напівпровідникових матеріалів і приладових структур» (№ держреєстрації 0115U000380), 2018 – 2020 рр.
- Цільова відомча тематика ВФА НАНУ № III-41-17 «Пошук та створення перспективних напівпровідникових матеріалів і функціональних структур для нано- та оптоелектроніки» (№ держреєстрації), 2017 – 2021 рр.
- Цільова науково-технічна програма НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», Тема ІФН-2017/3 «Дводіапазонний багатоелементний приймач інфрачервоного випромінювання на основі епітаксійних шарів CdHgTe для розпізнавання і супроводження рухомих об'єктів» (№ держреєстрації 0117U002931), 2017 – 2018 рр.
- Цільова науково-технічна програма НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», Тема № 49/15-18 «Дослідження оптичних, спектральних характеристик іонно-плазмових конденсатів в інфрачервоному, субтерагерцовому і міліметровому діапазонах спектра» (№ держреєстрації 0118U006099с), 2018 р.
- Цільова науково-технічна програма НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», Тема № 50/15-18 «Розробка експериментальної методики аналізу розподілу теплових полів з

надвисокою роздільною здатністю у багатошарових плівкових структурах» (№ держреєстрації 0118U006100с), 2018 р.

- Цільова науково-технічна програма НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», Тема № 54/8.2-19 «Дослідження спектральних характеристик функціональних елементів на основі іонно-плазмових конденсатів в інфрачервоному, суб-терагерцовому і міліметровому діапазонах спектра» (№ держреєстрації 0119U102678), 2019 р.
- Проект «Optoelectronic and transport phenomena in narrow gap semiconductor structures for terahertz detection», supported by Volkswagen Foundation, 2016 – 2019 pp.
- Пріоритетна програма 80-18Н «Високоєфективні детектори терагерцового випромінювання на основі кадмій-ртуть-телур наноструктур», 2018 р.
- Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень НАН України «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Відділення фізики і астрономії НАН України». Тема №20/1-П8 «Мультиспектральні приймачі випромінювання для ІЧ та мікрохвильового діапазонів спектра на основі епітаксійних шарів CdHgTe», 2020 – 2021 pp.

Мета і завдання дисертації. Метою дисертаційної роботи є розроблення базових фізичних засад/принципів побудови високоєфективних приладових структур для детекторів ІЧ та ТГц діапазонів на основі напівпровідникових плівок *HgCdTe* та технологічних циклів їх виготовлення, а також принципів створення селективних фільтрів, які блокують ІЧ випромінювання і є прозорими у видимому та ТГц спектральних діапазонах.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні **наукові завдання**:

1) Дослідити основні технології епітаксійного вирощування шарів *HgCdTe*, вивчити оптичні, механічні та електрофізичні характеристики і провести порівняльний аналіз якості вирощених епітаксійних шарів для подальшого формування на їх основі приймачів ІЧ та ТГц діапазонів спектра.

2) Розробити конструкцію і технологічний маршрут виготовлення дискретних і матричних фотодіодних приймачів для середньохвильового і довгохвильового ІЧ спектральних діапазонів. Встановити низькотемпературні режими нанесення пасиваційного покриття *CdTe* з високим ступенем адгезії до епітаксійних шарів *HgCdTe*, дослідити його морфологічні, структурні та діелектричні властивості.

3) Вивчити особливості інтерфейсу метал / *HgCdTe* з дірковим та електронним типом провідності. Визначити можливість формування омичних контактів за низькотемпературних технологічних умов їх нанесення до ділянок *n*- і *p*-типу в одному технологічному циклі, що значно спростить технологію виготовлення ІЧ фотоприймачів на основі напівпровідникової сполуки *HgCdTe*.

4) Дослідити електричні і фотоелектричні характеристики виготовлених у різній топології матричних і дискретних фотодіодів на основі *HgCdTe* для середнього і довгохвильового ІЧ діапазонів спектра і оцінити їх здатність функціонувати у режимі, обмеженому фоновим випромінюванням.

5) Розробити конструкцію і технологію виготовлення неохолоджуваних чи слабо охолоджуваних болометрів на гарячих носіях на основі епітаксійних шарів *HgCdTe*, інтегрованих з приймальною антеною, дослідити їх чутливість до ТГц

випромінювання у діапазоні частот 28 – 279 ГГц і перевірити можливість їх застосування у ТГц системах візуалізації. Продемонструвати можливість реалізації двох- чи багатодіапазонних приймачів випромінювання на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ в ІЧ та ТГц діапазонах спектра за рахунок різних фізичних механізмів їх функціонування.

б) Дослідити морфологічні, структурні, оптичні властивості і елементний склад композитних структур AlN (MgO) / полімерна плівка, які, завдяки розташуванню смуги залишкових променів в області 11 – 26 мкм і високій теплопровідності AlN (що дає змогу відводити паразитне тепло), можуть слугувати елементами селективних фільтрів, які блокують ІЧ випромінювання і є прозорими у видимому і ТГц спектральних діапазонах.

Об'єктом дослідження є фізичні процеси, що відбуваються в об'ємі епітаксійних шарів $HgCdTe$ і на гетероінтерфейсах $CdTe$ / $HgCdTe$, метал / $HgCdTe$ при виготовленні та функціонуванні ІЧ та ТГц детекторів на їх основі, а також фізичні процеси, що протікають у композитних структурах AlN (MgO) / полімерна плівка при їх взаємодії з електромагнітним випромінюванням.

Предметом дисертаційної роботи є технологія формування чутливих в ІЧ, ТГц діапазонах спектру приймачів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$, дослідження їх електрофізичних та спектральних характеристик для досягнення граничних робочих параметрів; оптичні, морфологічні і структурні властивості тонких шарів AlN , MgO нанесених на полімерні підкладки майлару (тефлону).

Методи досліджень. Напівпровідникові епітаксійні шари $HgCdTe$, які досліджувались у даній роботі були вирощені у співпраці з університетом Мадриду (методом сублімації у замкненому просторі), у співпраці з ЗЧМ, м. Світловодськ та SMI Lab Ltd, Україна (рідкофазною епітаксією), а також отримані для досліджень від ІФН СВ РАН (вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії). Пасиваційні шари $CdTe$ вирощувались методом «гарячої стінки». Синтез композитних структур AlN , MgO / полімерна підкладка здійснювався колегами з Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ.

Для дослідження оптичних властивостей і фононних станів у напівпровідникових плівках використовувався метод ІЧ Фур'є спектроскопії та спектроскопії КРС. Морфологія поверхні досліджуваних об'єктів та розміри наноструктур вивчалась за допомогою атомно-силової, електронної та оптичної мікроскопії. Елементний склад структур визначався за допомогою енергодисперсійного рентгенівського аналізу. Дослідження електричних характеристик напівпровідникових плівок проводилось методом вимірювання ефекту Холла та кінетики фотопровідності.

Для виготовлення чутливих в ІЧ та ТГц діапазонах приймачів застосовувались технологічні прийоми з використанням хімічної обробки, оптичної фотолітографії, вакуумного нанесення металів. Параметри виготовлених ІЧ фотодіодних структур та болометрів ТГц діапазону спектра визначались шляхом вимірювання вольт-амперних характеристик, спектральних залежностей фотовідгуку та вимірюванням чутливості до ТГц випромінювання.

Блокуючі характеристики ІЧ фільтрів на основі AlN , MgO / полімерна підкладка контролювались за допомогою високочутливої тепловізійної камери.

Наукова новизна роботи

1) На основі послідовних систематичних досліджень електро-фізичних і оптичних характеристик вихідних епітаксійних шарів $HgCdTe$ було обґрунтовано використання ростових технологій рідкофазної і молекулярно-променевої епітаксії (при заданих технологічних режимах) для отримання матеріалу монокристалічної якості і з параметрами, придатними для подальшого формування на його основі фоточутливих структур для ІЧ та ТГц діапазонів спектра.

2) Встановлено умови довготривалої експлуатації фоточутливих структур на основі КРТ: виявлено негативний вплив температурних (>100 °С) та механічних навантажень на епітаксійні шари $HgCdTe$. На основі досліджень наноіндентування вперше доведено наявність ліктеподібної поведінки на кривих навантаження-зміщення і навіть розрив цієї залежності у епітаксійних шарах $HgCdTe / CdZnTe$, вирощених методом рідкофазної епітаксії, що пояснюється можливими структурними фазовими переходами поблизу гетеромержі. Це обумовлює необхідність ретельного контролю температурних режимів і механічних впливів при виготовленні приймачів на основі $HgCdTe$.

3) Розроблено нову топологію і елементи технології дискретних і матричних фотодіодних приймачів ІЧ діапазону спектра на основі $HgCdTe$. Встановлено низькотемпературні режими осадження і оптимальну товщину шарів $CdTe$ ($T_{дж.} = 650$ К, $T_{підкл.} = 373$ К, $d \geq 300$ нм), фізичні властивості яких задовольняють вимогам до пасиваційного покриття. Вперше запропоновано та практично реалізовано низькотемпературне формування омичних двошарових контактів (адгезивний шар Cr , Mo або Ti / контактний шар In чи Au) до n - і p -областей КРТ в одному технологічному циклі. Омичний характер контактів пояснюється піннінгом рівня Фермі в інтерфейсному шарі метал / $HgCdTe$.

4) Отримано довгохвильові фотодіоди на основі $HgCdTe$, виявлювальна здатність яких $D^* = 2,67 \cdot 10^{10}$ см \cdot Вт $^{-1}$ ·Гц $^{1/2}$ на рівні теоретичної межі обумовленої флуктуаціями фонового випромінювання (BLIP-режим). Виміряні при нульовому зміщенні значення $R_0 A_d \approx (0,57 - 1,08) \cdot 10^5$ Ом \cdot см 2 для дискретних фотодіодів КРТ середньохвильового ІЧ діапазону спектра (3-5 мкм) свідчать про те, що вони можуть функціонувати в режимі обмеженому флуктуаціями фонового випромінювання (BLIP-режим).

5) Розроблено конструкцію (з різною топологією чутливого елемента та інтегрованої до нього приймальної антени) і технологію виготовлення неохолоджуваних чи слабо охолоджуваних приймачів ТГц діапазону болометричного типу на основі $HgCdTe$, яка дозволяє досягти значення еквівалентної шуму потужності $NEP_{300K} \approx 4,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц $^{1/2}$ і $NEP_{78K} \approx (2,5 - 5) \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц $^{1/2}$ в залежності від типу приймача і частоти випромінювання у діапазоні 28 – 270 ГГц.

6) Вперше запропонована та експериментально доведена можливість реалізації двох- чи багатодіапазонних приймачів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$, які функціонують на основі різних фізичних механізмів: за рахунок міжзонного поглинання в ІЧ та на основі розігріву електронного газу в біполярному напівпровіднику в ТГц діапазоні спектра, відповідно.

7) Вперше обґрунтовано механізми функціонування новітніх селективних фільтрів на основі композитних структур AlN (MgO) / полімерна плівка, які блокують ІЧ

випромінювання і є прозорими у видимому і ТГц діапазонах спектра. Доведено, що покращені експлуатаційні можливості обумовлені розширенням смуги залишкових променів для AlN в межах 10,5 – 17 мкм, що пов'язано з їх полікристалічною наноструктурованою будовою. Експериментально доведено їхню функціональність.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено та опрацьовано карту технологічного циклу виготовлення дискретних і матричних фотодіодних структур на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ для середньохвильового і довгохвильового ІЧ діапазонів спектра, яка на сьогоднішній день відсутня в Україні. Виготовлено експериментальні зразки фотодіодів різного формату, з яких матриця КРТ 128x128 елементів була реалізована у складі фотоприймального пристрою для тепловізійної камери.

2. Розроблені і виготовлені приймачі ТГц діапазону спектра болометричного типу з інтегрованими приймальними антенами. Експлуатаційні параметри продемонстрували чутливість до ТГц випромінювання при кімнатній температурі та при охолодженні до температури рідкого азоту. Приймачі використані для формування лінійок та імплементовані у системі ТГц бачення для візуалізації захованих предметів (робота в рамках проекту НАТО SPS #984544 «Uncooled Terahertz Arrays for Imaging Explosives»). Отримано Патент на винахід №98524 «Напівпровідниковий приймач ТГц/суб-ТГц випромінювання з вбудованим $p-n$ переходом».

3. Розроблено та отримано Патент на корисну модель №108104 «Дводіапазонний напівпровідниковий приймач випромінювання для ІЧ та ТГц/суб-ТГц діапазонів спектра на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ ».

4. Функціональність селективних фільтрів AlN (MgO) / полімерна плівка, які блокують ІЧ випромінювання і є прозорими у видимому і ТГц діапазонах спектра підтверджено систематичними випробуваннями з допомогою тепловізійної камери. Отримано Патент на винахід UA 118901 C2 «Маскувальні покриття із селективними властивостями», який нагороджено дипломом 1-го ступеню у Всеармійському конкурсі «Кращий винахід року» (2019 р.) та дипломом Всеукраїнського конкурсу «Винахід 2020».

Особистий внесок здобувача. Мета, завдання, наукові положення та висновки дисертаційної роботи сформульовані дисертантом особисто і підтверджені оригінальними дослідженнями, представленими у дисертаційній роботі. Постановка завдань на конкретних етапах роботи також належить авторові. Автором здійснювалось планування та контроль технологічних процесів виготовлення приймачів, а також частина проведених експериментальних досліджень (вимірювання спектральних залежностей ІЧ пропускання та відбивання, вимірювання EDX спектрів, дослідження з наноіндентування, оптична мікроскопія, частково дослідження спектральних залежностей фотовідгуку та вольт-амперних характеристик).

У всіх опублікованих роботах автор приймав участь у постановці проблеми та інтерпретації експериментальних результатів. Обговорення результатів більшості наукових праць здійснено автором спільно з науковим консультантом Сизовим Ф.Ф., а наступних праць – спільно із співавторами: [5, 20, 23, 42] – з В.В. Тетьоркіним, [8] – з О.Г. Голенковим, [43, 47] – з І.О. Лисюком, [19, 44] – з М.В. Вуйчиком, [46] – з

В.П. Ревою, [10, 11, 25] – з В.В. Забудським, [31, 34] – з І.В. Короташем, [14] – з Е. Dieguez, [15] – з С.А. Дворецьким, [36, 41] – з Ж.В. Гуменюк-Сичевською, [52] – з К.В. Свеженцовою. Основна роль у написанні наукових робіт [3, 4, 6, 7, 12, 16 – 18, 29, 30, 33, 37, 39, 40, 45, 50 – 51] належить авторові. Статті [1, 2, 13, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 32, 35, 48, 49] написано спільно з Ф.Ф. Сизовим.

Достовірність отриманих результатів забезпечувались використанням загальноновизнаних апробованих експериментальних методик, що доповнювали одна одну і були проведені на сучасному технологічному і вимірювальному обладнанні. Отримані результати були відтворюваними і добре узгоджуються з загальноприйнятою фізичною картиною досліджуваних ефектів та явищ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження було оприлюднено як усні та стендові доповіді на наступних наукових конференціях: *VIII Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок* (Івано-Франківськ, Україна, 2001), *XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII Междунар. научно-техн. конф. по фотозлектронике и приборам ночного видения* (Москва, Росія, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012), *Sixth intern. Conf. “Material sciences and material properties for infrared optoelectronics”* (Київ, Україна, 2002), *1-а Українська наукова конф. з фізики напівпровідників* (Одеса, Україна, 2002), *International conference on solid state crystals* (Zakopane, Poland, 2002), *IX, X, XI, XII, XVII Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок* (Івано-Франківськ, Україна, 2003, 2005, 2007, 2009, 2019), *E-MRS 2003 Annual Meeting “Development of methods for characterizing the microstructure of novel materials”* (Warsaw, Poland, 2003), *Міжнар. Науково-техн. конф. „Сенсорна електроніка і мікросистемні технології”* (Одеса, Україна, 2004), *П'ятий міжнародний російсько-український семінар “Нанозфізика и нанозлектроника”* (Санкт-Петербург, Росія, 2004), *The fourteenth international conference on crystal growth in conjunction with the 12 intern. conf. on vapor growth and epitaxy* (Grenoble, France, 2004), *12TH Intern. conf. on II-VI compounds* (Warsaw, Poland, 2005), *III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-3* (Одеса, Україна, 2007), *Третя міжнар. науково-практична конференція „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології”* (Кременчук, Україна, 2008), *Всеукраїнська конф. з міжнародною участю, присвячена 90-річчю Національної академії наук України „Хімія, фізика та технологія поверхні наноматеріалів”* (Київ, Україна, 2008), *VI, VII, VIII Міжнар. школа-конф. “Актуальні проблеми фізики напівпровідників”* (Дрогобич, Україна, 2008, 2010, 2013), *П'ята міжнародна науково-практичної конференція* (Полтава, Україна 2009), *Всеукраїнська конф. «Хімія, фізика та технологія модифікування поверхні»* (Київ, Україна, 2009), *E-MRS 2009 Fall Meeting* (Warsaw, Poland, 2009), *IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-4* (Запоріжжя, Україна, 2009), *Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defense and Security NATO SET Specialists Meeting* (Vilnius, Lithuania, 2010), *IRMMW-THz 2010* (Rome, Italy, 2010), *2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves* (Kharkov, Ukraine, 2010), *SPIE Optical Systems Design, Conference 8167B* (Marseille, France, 2011), *Російська конференція и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники, ФОТОНИКА* (Новосибірск, Росія, 2011), *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Лазерні технології»*.

Лазери та їх застосування» (Трускавець, Україна, 2011, 2015), *V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-5* (Ужгород, Україна, 2011), *International Meeting CNM-3* (Uzhorod, Ukraine, 2012), *7th Terahertz Days and GDR-I Workshop* (Cargese, Corsica, France, 2013), *NATO Advanced Research Workshop (ARW) “Detectors, Sources and Associated Electronics for THz Applications”* (Kyiv, Ukraine, 2013), *VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-6»* (Чернівці, Україна, 2013), *X International conf. “Electronics and applied physics”* (Kyiv, Ukraine, 2014), *8th THz Days* (Areches, France, 2015), *SPIE DSS Conference 9483: Terahertz Physics, Devices, and Systems IX: Advanced Applications in Industry and Defense* (Baltimore, USA, 2015), *XV Int. Conf. “ICPTTFN-XV”* (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2015), *Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Хімія, фізика та технологія поверхні»* (Київ, Україна, 2015), *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials NANO-2015* (Lviv, Ukraine, 2015), *Ukrainian–German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology* (Kyiv, Ukraine, 2015), *Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG5)* (Bologna, Italy, 2015), *Інформаційно-комунікативний захід «Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України»* (Київ, Україна, 2015), *VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-8* (Ужгород, Україна, 2018), *2018 IEEE 8th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”* (Zatoka, Ukraine, 2018), *EMN Amsterdam Meeting 2019 “Energy Materials Nanotechnology”* (Amsterdam, Holland, 2019), *2019 IEEE 9th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”* (Odesa, Ukraine, 2019).

Публікації. Результати дисертаційної роботи представлені у **116** наукових працях, з яких **4** монографії і розділи монографій, **45** оригінальні статті, **3** патенти і **64** тези доповідей на конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 308 сторінок, з яких 275 становлять основний текст дисертації. Робота містить 133 рисунки, з яких 129 вмонтовані у текст і 4 розміщені на окремих сторінках, а також 13 таблиць і список використаних джерел із 310 найменувань на 33 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** приведено загальну характеристику роботи та обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і наукові завдання досліджень. Висвітлено основні положення наукової новизни роботи та практичного значення одержаних результатів, вказується особистий внесок дисертантки у виконаних зі співавторами роботах. Наведено дані щодо апробації результатів дослідження та вказано кількість публікацій автора за темою дисертації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто основні фізичні властивості епітаксійних плівок $HgCdTe$ як матеріалу для формування приймачів ІЧ та ТГц діапазонів спектра. Високоякісний напівпровідниковий матеріал для виготовлення ІЧ детекторів з граничними параметрами повинен мати низьку концентрацію дефектів, великий розмір пластин, з однорідними і відтворюваними характеристиками. У даній роботі досліджувались епітаксійні шари $HgCdTe$,

вирощені методами рідкофазної (РФЕ, $T_{\text{росту}} = 376 - 726$ °С, у співпраці з ЗЧМ та Smilab LTD, м. Світловодськ), молекулярно-променевої (МПЕ, $T_{\text{росту}} \approx 180$ °С, ІФН СВ РАН), парофазної епітаксії (ПФЕ, $T_{\text{росту}} = 500 - 550$ °С, у співпраці з університетом Мадриду) на різних підкладках (CdZnTe , GaAs), тому проведено аналіз особливостей їх вирощування вказаними методами. На основі комплексних досліджень електрофізичних, структурних і оптичних характеристик вихідних епітаксійних шарів HgCdTe та підкладок CdZnTe було виявлено вплив типу та концентрації домішок у вихідних компонентах на густину дислокацій у плівках, вирощених методом рідкофазної епітаксії. Для реалізації режиму, обмеженого фоном випромінюванням (VLIP режим), для матеріалу HgCdTe необхідно, щоб густина дислокацій не перевищувала значення $N_D < 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Молекулярно-променева епітаксія має переваги при вирощуванні шарів зі складною структурою для багатодіапазонних приймачів чи фотодіодів з лавинним множенням. Ця технологія забезпечує ріст КРТ при нижчих у порівнянні з РФЕ температурах (160 – 200 °С), в умовах надвисокого вакууму, контроль хімічного складу, інтерфейсних профілів та рівня легування, вирощування шарів більшої площі. Однак, якість шарів КРТ, вирощених методом МПЕ досі поступається шарам, вирощеним методом РФЕ. Крім того, для шарів РФЕ останнім часом спостерігається прогрес, також, і в плані збільшення площі. При гетероепітаксії КРТ на підкладці GaAs основні проблеми виникають за рахунок сильної відмінності в параметрах ґратки шарів (~13,6%), різної природи хімічного зв'язку підкладки та плівки і низької швидкості дисоціації та перевипаровування молекул двохатомного телуру. Це призводить до погіршення структурної якості і збільшення густини дислокацій в КРТ, вирощеного МПЕ приблизно на 1 – 2 порядки у порівнянні з об'ємними кристалами. Основними причинами утворення дефектів у вирощуваній плівці є наявність механічних напружень і неправильне упорядкування атомів у ґратці в процесі кристалізації. В обох випадках (РФЕ і МПЕ) епітаксійні шари КРТ характеризувались монокристалічною структурною якістю.

Осадження з парової фази плівок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ проводилось методом сублимації у замкненому просторі (СЗП) на підкладки CdZnTe . Для вивчення впливу умов вирощування епітаксійних шарів КРТ методом СЗП змінювались такі технологічні параметри як температура і тиск. Експерименти з вирощування шарів проводились в атмосфері аргону при низькому тиску (6 мБар, 1 мБар=100 Па) і при атмосферному тиску (1013 мБар) при температурах 450 – 650 °С. Було встановлено ефект покращення структури плівок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, осаджених при вищому тиску аргону та найбільш оптимальний температурний інтервал 500 – 550 °С. При вказаних технологічних режимах формувались полікристалічні епітаксійні шари КРТ, структурна якість, хімічний склад та оптичні властивості яких не задовольняють вимогам до детекторних матеріалів для ІЧ та ТГц діапазонів спектра.

Проведено дослідження і порівняльний аналіз механічних властивостей епітаксійних гетероструктур кадмій-ртуть-телур, вирощених методами молекулярно-променевої епітаксії та рідкофазної епітаксії за допомогою наноіндентування для виявлення можливих фазових переходів поблизу гетеромежі. Криві навантаження-зміщення при наноіндентуванні гетероструктур на основі КРТ, вирощених методом МПЕ на підкладках GaAs з буферними шарами ZnTe/CdTe показали характерну

„ліктеподібну” поведінку ділянок кривих при відсутності навантаження. У гетероструктурах КРТ, вирощених методом РФЕ на підкладках $ZnCdTe$ чіткіше виражений згин на аналогічних кривих та навіть спостерігається розрив залежностей, який в обох випадках (МПЕ та РФЕ) ймовірно пов’язаний із структурними фазовими переходами поблизу гетеромежі. Визначені значення нанотвердості і модуля Юнга як у шарах КРТ, так і поблизу інтерфейсів.

У першому розділі також зроблено аналіз основних принципів детектування випромінювання детекторами на основі КРТ в ІЧ та ТГц діапазонах спектра. Окреслено їх переваги і обмеження, а також обґрунтовано підходи для розробки новітніх систем реєстрації ІЧ та ТГц випромінювання.

У **другому розділі** дисертаційної роботи описані технологічні основи створення приймачів ІЧ діапазону спектра різного формату на основі напівпровідникових плівок $HgCdTe$. Зокрема, проведено ґрунтовний аналіз фізико-хімічних процесів, які відбуваються при формуванні приймачів ІЧ діапазону спектра на основі $HgCdTe$. Це дозволило вивчити, оптимізувати та обґрунтувати режими ключових технологічних етапів їх виготовлення і, в кінцевому рахунку, розробити технологічні прийоми виготовлення інфрачервоних КРТ приймачів. А саме:

- Розроблено топологію лінійок ІЧ фотодіодів формату 2×64 (4×288) елементів (з розміром чутливого елемента 30 мкм), матриць формату 128×128 елементів (з розміром чутливого елемента 25 мкм), матриць з невеликим числом елементів 3×3 (з розміром чутливого елемента 50 мкм) та $4+2$ (з розмірами чутливих елементів $100 \text{ мкм} \times 40 \text{ мкм}$ та $210 \text{ мкм} \times 40 \text{ мкм}$, відповідно), а також дискретні фотодіоди з діаметром 1 мм та 1,5 мм. На рис. 1 показано фотографію виготовленої фотодіодної матриці формату 128×128 елементів на основі $HgCdTe$.

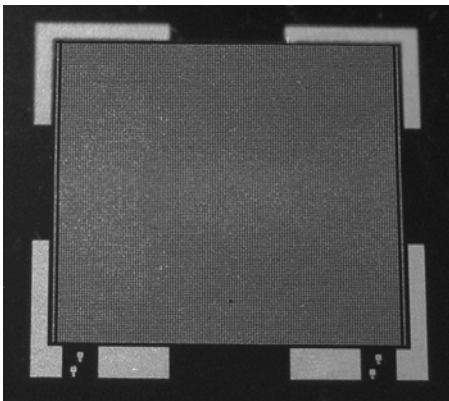


Рис. 1. Фотографія матриці КРТ, формату 128×128 елементів для спектрального діапазону 3-5 мкм.

- Відпрацьовано елементи технологічного процесу виготовлення приймачів ІЧ діапазону спектра на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$, включаючи режими проведення фотолітографії, хімічної обробки, способи і режими нанесення металізації.

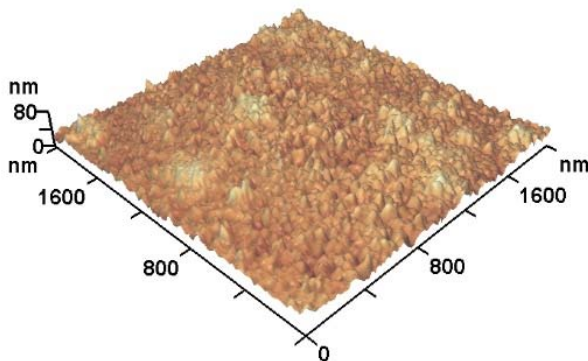
- Поверхнева пасивація є важливою технологічною операцією при виготовленні як фотопровідних так фотодіодних приймачів на основі $HgCdTe$. Вона відіграє визначальну роль у роботі детекторів і у їх довгочасовій стабільності. Через чутливість вузькощілинного напівпровідника $HgCdTe$ до температур вище $100 \text{ }^\circ\text{C}$, необхідно застосовувати методи росту захисних шарів, які б не погіршували характеристик $HgCdTe$, а власне захисні шари були б прозорими в ІЧ чи ТГц діапазонах спектра. Поверхнева пасивація не повинна також погіршувати

термічну і хімічну стабільність ІЧ детекторів, сприяючи появі поверхневих станів, зменшенню часу життя нерівноважних носіїв і не повинна призводити до додаткових струмів втрат, які погіршують імпеданс детекторів. У даній роботі запропоновано метод «гарячої стінки» та встановлено низькотемпературні параметри осадження $CdTe$ ($T_{\text{дж.}} = 650 \text{ K}$, $T_{\text{нідкл.}} = 373 \text{ K}$ і час росту 60 хв.) на поверхні епітаксійних шарів

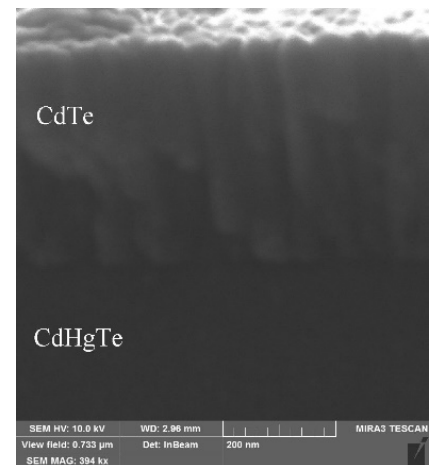
HgCdTe, вирощених рідкофазною епітаксією на підкладках *CdZnTe*, при яких плівка є оптимальною в якості захисного покриття при використанні для функціональних елементів ІЧ та ТГц фотоелектроніки. Отримані шари *CdTe* характеризуються властивостями, що задовольняють вимогам до пасиваційних покриттів, а саме:

– вирощені шари *CdTe* мають високий ступінь адгезії до *HgCdTe*, що підтверджується термоцикуванням виготовлених ІЧ-фотодіодів з використанням пасивації *CdTe* в діапазоні температур 300К – 77К – 300К, а їх вольт-амперні характеристики демонструють відсутність поверхневих струмів витоку;

– аналіз морфології поверхні *CdTe* не виявив тріщин, пагорбів, ям та інших дефектів (рис. 2, а). На рис. 2,б показано фотографію зі скануючого електронного мікроскопа (СЕМ), де спостерігається стовпчастий ріст шарів *CdTe*. Стовпчасті мікроструктури є характерними ознаками епітаксійних матеріалів і зазвичай спостерігаються в матеріалах, осаджених із парової фази. Потенційні причини стовпчастого росту тонкоплівкових структур можуть бути різними, однак, у нашому випадку низькотемпературного осадження плівок *CdTe* спостерігається зернистий епітаксійний ріст на поверхні *HgCdTe* із середньоквадратичною шорсткістю <3 нм і приблизно на порядок більшим значенням нерівності бічної поверхні, що може бути однією з причин стовпчастого росту;



а)



б)

в)

| Спектр | Zn | Cd | Te | Hg | Разом |
|----------|-----|-------|-------|------|-------|
| (CdTe) | | 44.41 | 51.67 | 3.92 | 100. |
| (CdHgTe) | | 12.94 | 41.46 | 45.6 | 100. |
| (CdZnTe) | 1.7 | 45.96 | 52.35 | | 100. |

Рис. 2. Тривимірне зображення на поверхні *CdTe*, отримане за допомогою атомно-силової мікроскопії (а), СЕМ фотографія сколу структури *CdHgTe/CdZnTe* з пасиваційним шаром *CdTe*, товщиною 360 нм (б) та хімічний склад (ат. %) шарів у різних частинах структури *CdTe/CdHgTe/CdZnTe* (в).

–аналіз хімічного складу, отриманий за допомогою енерго-дисперсійного рентгенівського аналізу (EDX) у різних частинах сколу структури $CdTe/CdHgTe/CdZnTe$ (рис. 2, в) показав відсутність домішкових хімічних елементів і дещо збільшену кількість телуру по відношенню до кількості кадмію в пасиваційній плівці $CdTe$. Цей результат можна пояснити тим, що компоненти парової фази кадмію та телуру (Te_2), що утворюються в реакторі під час випаровування джерела, мають різні коефіцієнти поверхневої адсорбції та різні значення тиску парів при однаковій температурі. Це призводить до різниці в швидкості осадження та в характеристиках пасиваційного покриття. Однак, як видно з таблиці (рис. 2, в), при використаних у нашій роботі параметрах пасивації $CdTe$ ця різниця незначна, що свідчить про оптимізацію технології росту;

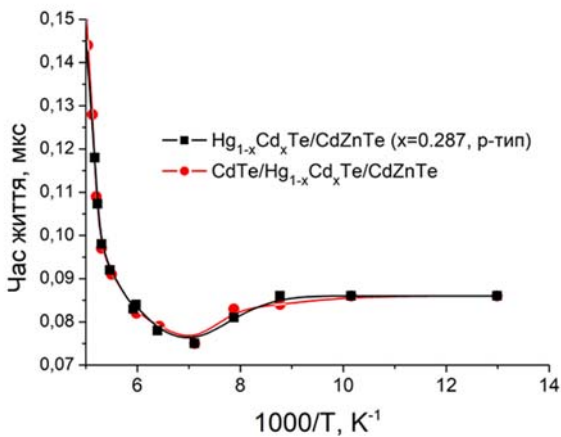


Рис. 3. Температурні залежності часу життя, виміряні в структурі $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdZnTe$ ($x = 0.287$) без пасивації та з пасивацією $CdTe$.

залежності часу життя в одній із структур $Hg_{1-x}Cd_xTe / CdZnTe$ ($x = 0,287$) як із шаром $CdTe$, так і без нього, показані на рис. 3, з якого видно, що температурні залежності τ однакові для $HgCdTe$ без шару $CdTe$ та з ним. Виконані оцінки показують, що в низькотемпературному діапазоні $T < 170$ К як процес Оже-7 для p -типу $HgCdTe$, так і механізми Шоклі – Ріда – Холла є основними механізмами рекомбінації носіїв заряду. При температурах $T > 170$ К переважаючим механізмом є процес Оже-7. Випромінювальна рекомбінація практично не грає жодної ролі при будь-яких температурах;

–вольт-фарадні характеристики демонструють добре визначену зміну ємності від напруги, що свідчить про керованість областю просторового заряду, а розрахункове значення густини поверхневих станів ($4,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) у структурах $CdTe / Si$ вказують на високі захисні властивості шарів $CdTe$.

- У другому розділі також проаналізовано способи формування n - p -переходів для ІЧ фотодіодів на основі КРТ і застосовано метод іонної імплантації іонів B^+ з

–як пасиваційне покриття для $HgCdTe$, більш широкозонний матеріал $CdTe$ ($E_g(CdTe) \gg E_g(HgCdTe)$) забезпечує прозорість структури в ІЧ та ТГц спектральних діапазонах;

–низькотемпературне осадження пасиваційних шарів $CdTe$ не змінює часу життя неосновних носіїв заряду в КРТ. Час життя τ нерівноважних носіїв є важливим параметром, який характеризує якість матеріалу КРТ (в n - або p -шарах або n - p та p - n ІЧ-діодах), та визначає механізми рекомбінації, які проявляються залежно від температури або концентрації дефектів та вільних носіїв. Це важливо для роботи пристроїв на основі $HgCdTe$. Температурні

енергіями 80 – 100 кеВ та дозами $(1 - 3) \cdot 10^{13}$ см⁻². Такий вибір зумовлений наявними технологічними можливостями та особливостями B^+ , атоми якого мають невелику масу, утворюючи при імплантації в ґратці $HgCdTe$ менше структурних дефектів, ніж важчі елементи; крім того, бор є нетоксичним матеріалом у порівнянні, напр., з берилієм.

У **третьому розділі** представлені результати з розроблення низькотемпературних ($T_{\text{підкл.}}=20-25$ °С) методів формування двошарових омічних контактів для епітаксійних плівок $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) як n -, так і p -типу провідності, в основі яких є осадження шарів металів Cr , Mo , Ti , які мають високу адгезію і можуть блокувати інтердифузію на межі «метал- $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ».

Надійна робота детекторів на основі $HgCdTe$ з високими пороговими характеристиками є важливим завданням, тісно пов'язаним з проблемою омічних контактів, що є важливою частиною ІЧ-детекторів $HgCdTe$. Формування омічних контактів до $HgCdTe$ та їх тривала стабільність впливають на фотовідгук детекторів та надійність їх функціонування. У даній роботі розроблена технологія нанесення тонких ($d \approx 20-30$ нм) плівок металів Cr , Mo , Ti при температурі $T \approx 300$ К, оскільки вони, як правило, забезпечують високу адгезію до шарів КРТ. Au та In ($d \approx 800$ нм) були використані верхнім шаром на контактних площадках для проведення ультразвукового розварювання або мікропайки золотим провідником. Без перехідних шарів Cr , Mo , Ti , індій виступає донорною легуючою домішкою в $HgCdTe$, і через мале значення роботи виходу, може бути використаний як металічний контакт до матеріалу n -типу. Au має велике значення роботи виходу, але воно є акцепторною домішкою в $HgCdTe$ і часто використовується як металічний контакт до p - $HgCdTe$. Наші дослідження показали, також, що золото як контактний шар має дуже погану адгезію до шарів КРТ. Такі метали як In , Mo , Cr і Ti мають відносно високу теплоту формування сполук з Te . Отже, вони є високореактивними матеріалами до напівпровідника $HgCdTe$. Їхня хімічна взаємодія з $HgCdTe$ сильно залежить від температури. Для запобігання твердотільних реакцій між In , Au та $HgCdTe$, проміжні шари (Mo , Cr , Ti) осаджені на низькотемпературні підкладки $HgCdTe$ ($T_{\text{підкл.}} \approx 300$ К) були використані для контактів до $HgCdTe$. Вибрані у даній роботі Cr , Mo та Ti для контактів з $HgCdTe$ спричиняють хімічні реакції на інтерфейсі, особливо в напівпровіднику з такою низькою термодинамічною стабільністю як $HgCdTe$, збіднюючи Hg та Cd міжфазну область, але швидкість збіднення Hg є більшою. Дефекти, що виникають на межі розділу між металом і $HgCdTe$, відповідають за дифузію контактного металу в матеріал і дифузію напівпровідникових компонентів з матеріалу в метал. Це змінює хімічний склад напівпровідника поблизу інтерфейсу. Низькі температури осадження металів можуть сповільнити такі реакції.

З експериментальних вольт-амперних характеристик (ВАХ), отриманих у цій роботі (вимірювання були проведені між парами контактних площадок з розмірами 80×80 мкм²), видно, що контакти з Cr , Mo , Ti демонструють задовільну омічну або близьку до омічної поведінку (Рис. 4, а) структур метал / n -КРТ ($x \approx 0,3$), яка може бути пояснена моделлю Шоттки-Мотта.

Однак, для контактів Cr , Mo , Ti до шарів p - $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0.304$), які досліджувались у даній роботі, ВАХ також демонструють омічну чи близьку до

омічної поведінку, як показано на рис. 4, б. Через реакції обміну на інтерфейсі метал / КРТ, відносно товстий (до декількох моношарів) порушений та інтердифузний шар може бути сформований у напівпровіднику $HgCdTe$. У цьому випадку, атоми металу з високою теплою формування сполук з Te і відмінностями у сталих ґратки (напр., Cr , Mo , Ti) заміняють атоми Hg і частково атоми Cd , що призводить до формування інтерфейсних шарів, що закріплюють рівень Фермі. Отже, рівень Фермі на поверхні напівпровідника буде фіксованим, і робота виходу металу та електронна спорідненість напівпровідника повинні слабо впливати на контактні властивості. Тут

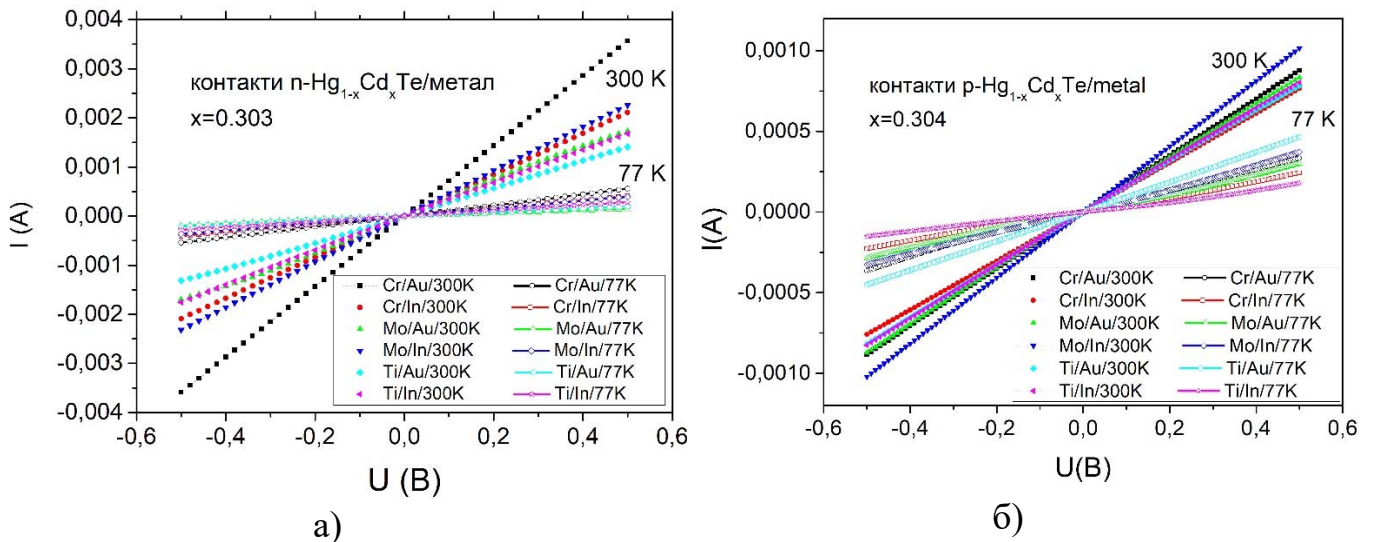


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики контактів Cr , Mo , Ti на $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0.303$), рис. (4, а): $N_{78} \approx 1.9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu_{78} = 17000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $d_{KPT} = 8.1 \text{ мкм}$, $\tau_{78} \approx 20\text{--}24 \text{ нс}$, $\tau_{298} \approx 2.6\text{--}2.9 \text{ нс}$ та до $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0.304$) (рис. 4, б): $P_{77} = 5.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu_{77} = 407 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $d_{KPT} = 18 \text{ мкм}$, $\tau_{77} \approx 8.5 \times 10^{-8} \text{ с}$, $\tau_{298} \approx 1.4 \times 10^{-7} \text{ с}$.

ідеальна модель Шотткі-Мотта не застосовуватиметься. Дефекти на порушеному інтерфейсі напівпровідника метал / $HgCdTe$, спричинені осадженням металу, можуть сильно впливати на транспорт електронів через контактні матеріали. Причинами поширення інтерфейсних дефектів, які закріплюють хімічний потенціал (рівень Фермі) далеко від ідеальної моделі Шотткі-Мотта, є низькотемпературні твердотільні реакції через утворення сполук Mo , Ti , Cr з Te та різниці констант ґратки та коефіцієнтів теплового розширення металів та $HgCdTe$. З вимірних ВАХ видно, що для всіх досліджених нами металів (Cr , Mo , Ti) опір контактів метал/напівпровідник є омичним і зменшується зі зростанням температури. Це підтверджує той факт, що основним механізмом у переносі струму є термоіонна емісія.

Енерго-дисперсійний аналіз був проведений для визначення елементного складу поверхні структури фотодіодного чіпу на основі $CdZnTe / HgCdTe$ (n^+p -фотодіоди) з пасиваційним шаром $CdTe$ та металічними площадками $Mo-Au$ (рис. 5, а). Ми перевірили вплив металічних площадок на можливий хімічний склад поблизу меж ділянок під час виготовлення чіпу. На рис. 5, б показано результати EDX аналізу поверхні чіпу в області контактів $Mo-Au$.

Аналіз результатів EDX аналізу контактних шарів Au/Mo до поверхні КРТ (рис. 5, б) демонструють типову картину дифузії компонент КРТ в адгезивний шар

молібдену: $\sim 11\%$ *Te*, $\sim 6\%$ *Hg* в адгезивному шарі *Mo* з товщиною $d \approx 60$ nm. Молібден має вищу теплоту утворення з телуrom порівняно з *Cr* чи *Ti*. Схожі результати стосовно вмісту елементів у тонкому адгезивному шарі *Mo* були отримані з EDX аналізу контактів *In / Mo*.

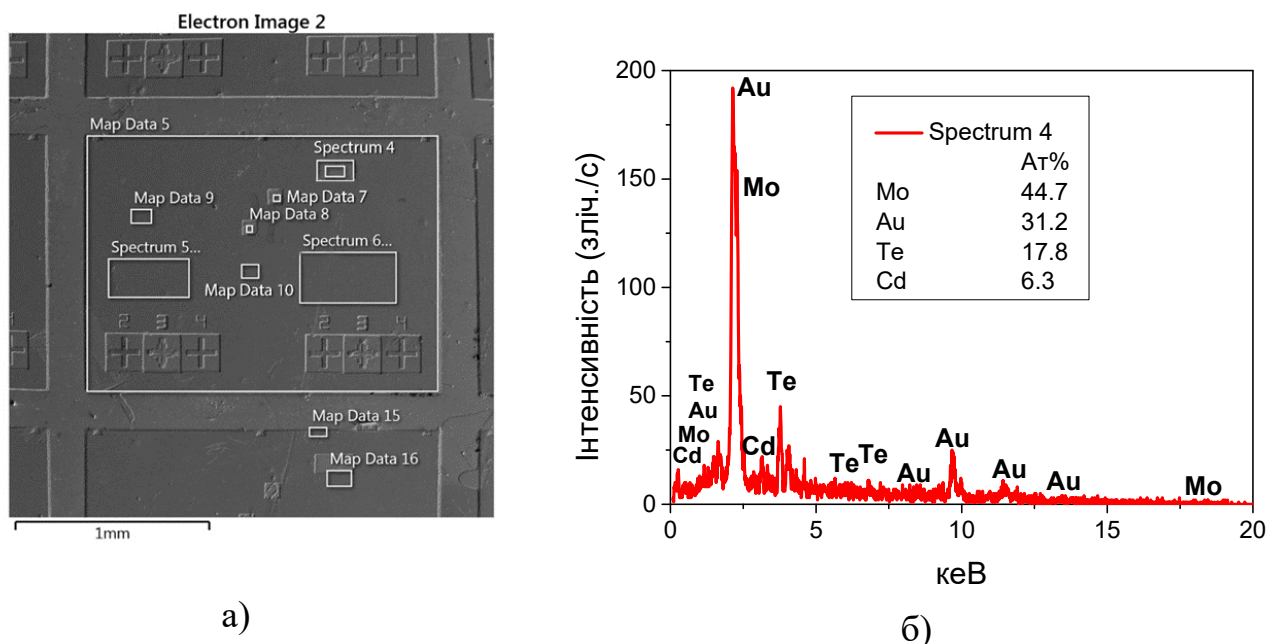


Рис. 5. СЕМ зображення детекторного чіпу після процесів фотолітографії та металізації (а) та EDX аналіз однієї із гетероструктур *CdZnTe/HgCdTe* з контактами *Mo/Au* до *HgCdTe*. Аналіз було зроблено на ділянці “Spectrum 4”, показаний на рис.а на поверхні контакту до *p*-типу *HgCdTe* з вікном у пасивації *CdTe*.

Для оцінки питомого опору контактів метал / КРТ ρ_c застосовували метод лінії передачі (TLM – transmission line method) для контактів *Ti / HgCdTe* при $T = 300\text{K}$ і 77K , який дорівнює $\rho_c = 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ та $\rho_c = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, відповідно. Встановлено, що контактний опір R_c омичних контактів *Cr*, *Mo*, *Ti* набагато менший у порівнянні з опором *n-p* переходу в *HgCdTe* R_0 [$R_c A (< 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2) \ll R_0 A (> 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2)$], де R_0 – опір діода при нульовому зміщенні, A – площа фотодіода. Отримані результати за даних технологічних умов формування контактів метал / КРТ дають можливість наносити омичні контакти до ділянок *n*- і *p*-типу в одному технологічному циклі, що значно спрощує технологію виготовлення ІЧ фотоприймачів на основі напівпровідникової сполуки *HgCdTe*.

У четвертому розділі представлені дослідження електричних і фотоелектричних характеристик виготовлених у різній топології матричних і дискретних фотодіодів на основі *HgCdTe* для середнього і довгохвильового ІЧ діапазонів спектра, які дозволили оцінити їхню функціональність і стабільність роботи.

В даній роботі зроблені оцінки порогових характеристик для ІЧ фотодіодів на основі КРТ. Для фотодіодів середньохвильового і довгохвильового діапазонів спектра граничні значення виявлювальної здатності (D^* або D -Джонса – це відношення сигнал/шум, що стосується смуги пропускання 1 Гц, нормоване на

квадратний корінь з площі детектора і виміряно за певних умов, зазвичай для ПЧ детекторів з використанням абсолютно чорного тіла (АЧТ) з температурою 500 чи 800 К і модуляцією сигналу)

$$D^* = (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / NEP = S_I \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / I_{ш}, \quad (1)$$

визначаються шумом, пов'язаним з флуктуаціями потоку фотонів фонового випромінювання. Тут A_d - площа фоточутливого елемента, Δf - ширина смуги підсилюючого тракту і $NEP = I_{ш}/S_I$ (noise equivalent power) - еквівалентна шуму потужність. Остання визначається як середньоквадратична потужність випромінювання $P = (\langle P^2 \rangle)^{1/2}$, що падає на детектор і генерує середньоквадратичний вихідний сигнал $S = (\langle S^2 \rangle)^{1/2}$, що дорівнює середньоквадратичному рівню шуму $N = (\langle N^2 \rangle)^{1/2}$ (N - струм шуму $I_{ш}$ або напруга шуму $U_{ш}$). NEP - це рівень сигналу S , який створює відношення сигнал/шум $S/N=1$.

$$NEP = \frac{I_{ш}}{S_{I\lambda}} = \frac{\langle I_{ш}^2 \rangle^{1/2}}{S_{I\lambda}} = h\nu \cdot \sqrt{\frac{2N_{\phi}}{\eta}} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f} = \sqrt{\frac{2h\nu}{\eta}} \cdot W_{\lambda,T} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f}, \quad (2)$$

де $I_{ш}$ - шумовий струм детектора, N_{ϕ} - число падаючих на детектор фотонів, $W_{\lambda,T}$ - густина потужності випромінювання при даній температурі і довжині хвилі.

Значення NEP визначається і іншими шумами фотоприймача. Іншим шумом в ПЧ фотодіодах невисокої якості є тепловий шум (шум Джонсона-Найквіста) I_T , який визначається динамічним темновим опором $R_0 = - [dI/dU(U)]^{-1}_{U=0} = \beta k_B T / q I_0$ фотодіодів, де U - напруга зміщення, β - коефіцієнт неідеальності діода.

Для цих двох видів шумів шумовий струм буде визначатися виразом

$$\langle I_{ш}^2 \rangle = U_I \cdot \Delta f = 2 \cdot q \cdot (I_{\phi} + I_T) \cdot \Delta f = (2 \cdot q^2 \cdot \eta \cdot N_{\lambda,T} \cdot A_d + 4k_B T / R_0) \cdot \Delta f. \quad (3)$$

Тут k_B - стала Больцмана, шумовий струм, зумовлений флуктуаціями потоку фотонів фонового випромінювання $\langle I_{\phi} \rangle^2 = 2 \cdot q^2 \cdot \eta \cdot A_d \cdot N_{\phi} \cdot \Delta f$, тепловий шум $I_T = (4k_B T / R_0) \cdot \Delta f$, а густина потоку фонового випромінювання

$$N_{\phi} = \frac{\Omega_i}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_{co}} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot [\exp(\frac{hc}{k_B T \cdot \lambda}) - 1]} \cdot d\lambda, \quad (4)$$

де c - швидкість світла, λ_{co} і λ_1 визначають область спектральної чутливості фотоприймача (наприклад, для середньохвильового діапазону $\lambda_{co} = 5$ мкм і $\lambda_1 = 3$ мкм), $\Omega_i = \pi \cdot \sin^2(\theta_i/2)$, Ω - просторовий кут зору, який визначається холодною діафрагмою приймача випромінювання і θ_i - плоский кут зору. Для $\Omega_i = 1.57$ ср ($\theta_i = 90^\circ$) фоновий потік для середньохвильового діапазону спектра 3 – 5 мкм становить $N_{\phi} \approx 6.5 \cdot 10^{15}$ см⁻²·с⁻¹ при температурі фону $T = 300$ К, а для $\Omega_i = 0.21$ ср ($\theta_i = 30^\circ$) $N_{\phi} \approx 8.8 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹. Для цих двох видів шумів із (1) для ідеального фотодіода впливає

$$D_{\lambda_{co}}^* = \frac{\eta q \lambda_{co}}{hc} \cdot \left[\frac{4k_B T}{R_0 A_d} + 2q^2 \eta N_{\phi} \right]^{-1/2}. \quad (5)$$

В VLIP режимі для цих кутів зору виявлювальна здатність при $\lambda_{co} = 5$ мкм складає відповідно $D_{\lambda_{co}}^* \approx 1.5 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}/Вт і $D_{\lambda_{co}}^* \approx 4.2 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}/Вт, а питомі виявлювальні здатності для спектрального діапазону $\lambda = 3-5$ мкм $D^* \approx 2 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт і $D^* \approx 5.5 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт, відповідно. Згідно із законом зміщення Віна, максимум спектральної залежності густини потужності випромінювання АЧТ зсувається в бік коротших довжин хвиль. Відповідно, виявлювальна здатність $D_{\lambda_{co}}^*$ зменшується зі збільшенням довжини хвилі для фотодіодів на спектральний діапазон 8-10,5 мкм.

При зроблених вище оцінках потоку фонових фотонів для середньохвильового діапазону спектра ефективно фонове навантаження для таких потоків складає $W_{сф} \approx 3.3 \cdot 10^{-4}$ Вт/см² і $4.4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², відповідно. Для забезпечення функціонування фотодіодів середньохвильового ІЧ діапазону ($\lambda \approx 3 - 5$ мкм) в VLIP режимі для вказаних кутів зору з (5) впливає вимога до параметра $R_0 A_d \geq 5 \cdot 10^3$ Ом·см². Для довгохвильових фотодіодів вимога до параметра $R_0 A_d \geq 1$ Ом·см².

На рис. 6 приведені експериментальні і розрахункові дослідження електричних характеристик довгохвильових ІЧ фотодіодів $n^+p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te} / \text{CdZnTe}$ ($x=0,22$), сформованих імплантацією B^+ на епітаксійних шарах, вирощених методом РФЕ, з масиву фотодіодних лінійок 2x64 елементи з розміром чутливих елементів 30 мкм (рис. 7). При розрахунках темного струму враховувались такі його складові, як об'ємний дифузійний струм, генераційний струм у збідненій області і струм

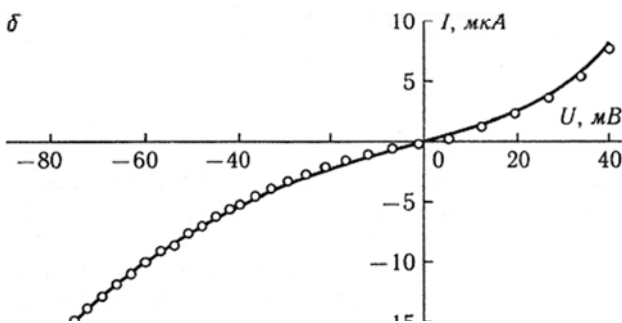
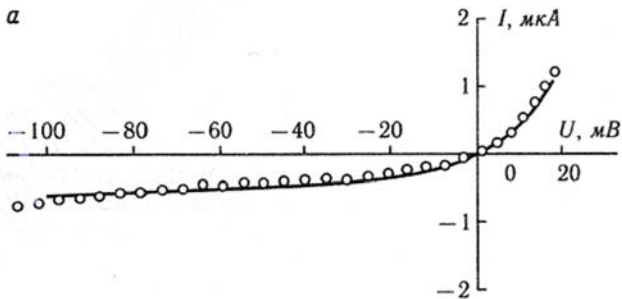


Рис. 6. Експериментальні (точки) і розрахункові (суцільні лінії) ВАХ фотодіодів при 77 К. Розрахунки зроблені для глибоких центрів з енергією $E_t=0,72E_g$, яка відраховується від стелі валентної зони, концентрація $N_t=1,2 \cdot 10^{13}$ см⁻³ (а) і $N_t=4,8 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (б).

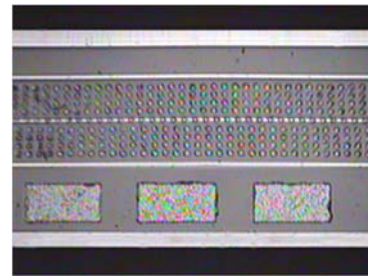


Рис. 7. Мікрофотографія фрагменту матриці фотодіодів КРТ, формату 4x288 елементів.

тунелювання через глибокі центри у забороненій зоні. При обчисленні тунельного струму припускалось, що переходи із валентної зони на глибокі дефектні рівні у забороненій зоні відбуваються шляхом термічних закидів і тунелювання. Переходи носіїв із глибоких рівнів у зону провідності є тунельними. Струм міжзонного тунелювання не приймався до уваги, оскільки вимірювання проводились при малих зворотних

зміщеннях ($U \leq 100$ мВ). Поверхневі струми втрат вважались нехтовно малими.

Із рис. 6 видно, що досліджені діоди мають різний характер ВАХ. У фотодіода із малим значенням зворотних струмів (рис. 6, а) прослідковується тенденція до їх насичення при зворотному зміщенні. Величина $R_0A = 1,5 - 7$ Ом·см². У діода зі значенням $R_0A < 1$ Ом·см² вольт-амперна характеристика при зворотних зміщеннях не насичувалась (рис. 6, б). Попередні дослідження вказують на те, що розкид значень R_0A по лінійці фотодіодів зумовлений, насамперед, протяжними дефектами (дислокаціями). Точкові дефекти (вакансії ртуті, міжвузлові атоми) мають менший вплив на параметр R_0A .

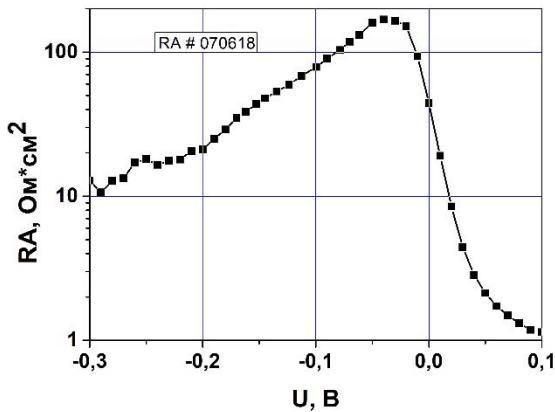


Рис. 8. Залежність параметра $R \cdot A$ від напруги зміщення для зразка дискретного довгохвильового КРТ фотодіода при $T=80$ К.

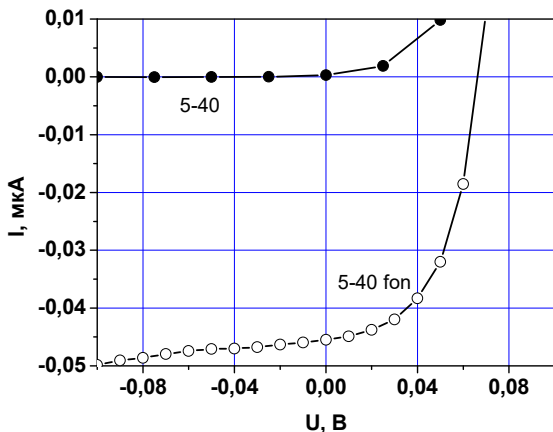


Рис. 9. Темнова (темні символи) та виміряна при фоновому освітленні (світлі символи) вольт-амперна характеристика фотодіода з масиву матриці, формату 128×128 елементів, виготовлена на основі шарів $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$), вирощених методом рідкофазної епітаксії.

Залежності параметра $R \cdot A$ ($A_d = 0,4 \cdot 10^{-4}$ см², R – диференційний опір) для досліджених довгохвильових дискретних фотодіодів показують розкид значень $R_0 \cdot A$ від 1 до 45 Ом·см². У кращих зразках фотодіодів, виготовлених нами на основі МПЕ шарів КРТ значення $R_0 \cdot A$ сягало $\sim 40-100$ Ом·см², а темнові струми при робочій напрузі зміщення -50 мВ становили $-3,7 \cdot 10^{-8}$ А (рис. 8).

Фотодіоди середньо-хвильового ІЧ діапазону спектра ($3 - 5$ мкм) на основі епітаксійних шарів КРТ були виготовлені у топології багатоелементних матриць формату 128×128 елементів, а також у вигляді дискретних приймачів. Електричні параметри виготовлених фотодіодів контролювались за допомогою вимірювання вольт-амперних характеристик мікрозондовим методом при температурах рідкого азоту. Для порівняння багатоелементні матриці формату 128×128 елементів були виготовлені на епітаксійних шарах $HgCdTe$, вирощених методами РФЕ і МПЕ. В обох випадках було отримано фотодіоди з низькими темновими струмами, величина яких при зворотному зміщенні -50 мВ була у межах від ~ 10 до 50 нА (рис. 9). Для дискретних середньохвильових ІЧ фотодіодів КРТ з площею чутливих елементів $A_d = 0,84 \cdot 10^{-4}$ см² виміряні значення $R_0A_d \geq 9 \cdot 10^3$ Ом·см², що свідчить про те, що досліджені діоди можуть функціонувати у VLIP режимі.

У даному розділі також була досліджена часова і температурна стабільність КРТ ІЧ-фотодіодів. З експериментальних досліджень спектральних залежностей фотовідгуку встановлено відповідність між довгохвильовою межею фотовідгуку фотодіодів n^+p -типу (λ_{CO}), виміряною при азотній температурі та хімічним складом неперервного твердого розчину $Hg_{1-x}Cd_xTe$, знайденим із вимірювань оптичного пропускання при кімнатній температурі.

Розділ п'ять присвячений розробленню приймачів ТГц діапазону спектра на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ та дводіапазонних детекторів для ІЧ та ТГц діапазонів спектра з метою збільшення інформативності детектованих сигналів. Цікавість до ТГц частотного діапазону викликає той факт, що у ньому проявляються різні фізичні явища, і це часто потребує спеціальних мультидисциплінарних знань. Тому, інструментальні можливості для ТГц області спектру все ще відстають у порівнянні, наприклад, з можливостями ІЧ-систем. У цій роботі основна увага була зосереджена на застосуванні вузькощілинних напівпровідників $HgCdTe$ при розробці неохолоджуваних чи помірно охолоджуваних ТГц приймачів випромінювання з прямим детектуванням сигналу, здатних працювати у широкому спектральному діапазоні 0,070-3 ТГц і приймати ТГц сигнали як від неперервних, так і від імпульсних джерел випромінювання з метою збільшення і покращення якості отриманої інформації. Такі приймачі можуть використовуватись для ТГц комунікаційних систем, контролю якості продуктів, виявлення прихованих об'єктів тощо.

В даній роботі розроблено топологію та відпрацьовано технологію формування приймачів ТГц діапазону спектра на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ болометричного типу (рис. 10) з різною конструкцією приймальної антени (симетричною метеликоподібною, спіралевидною, асиметричною) та різним розміром чутливого елемента, а також ТГц приймача з вбудованим $n-p$ -переходом. Усі виготовлені структури продемонстрували чутливість до ТГц випромінювання при кімнатній та при азотній температурах (рис. 11). Досліджено експериментально ТГц відгук КРТ приймачів болометричного типу в діапазоні частот 28 – 270 ГГц. Для досліджених детекторів з $\nu = 140$ ГГц, найкращі виміряні значення вольт-ватної чутливості дорівнювали $R \approx 600$ В/Вт при зміщенні 0,5 мА ($T = 300$ К) і $R \approx 20 - 160$ В/Вт при зміщенні 0,4 – 0,5 мА ($T = 78$ К). Відповідно, еквівалентна шуму потужність складала $NEP_{300K} \approx 4,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} і $NEP_{78K} \approx (2,5 - 5) \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2} в залежності від типу приймача.

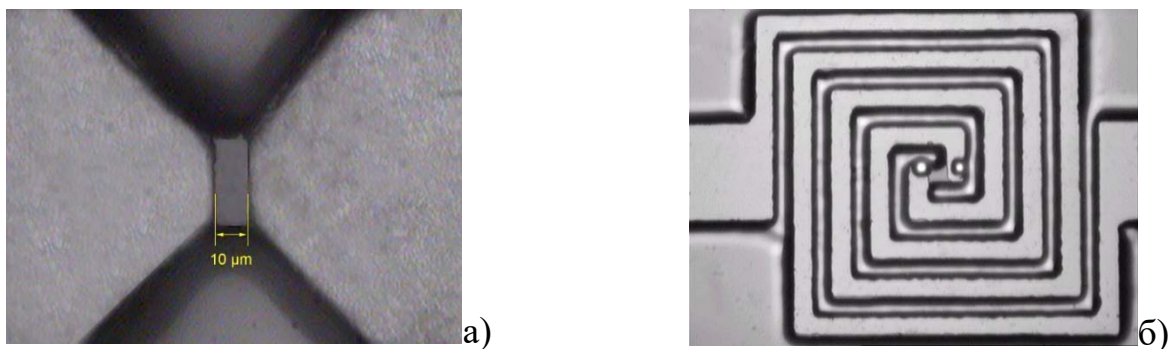


Рис. 10. Мікрофотографії ТГц приймачів з метеликоподібною антеною і розміром чутливого елемента 10x50 мкм (а) та зі спіралевидною антеною з розміром чутливого елемента 18x18 мкм (квадрат у центрі структури) (б).

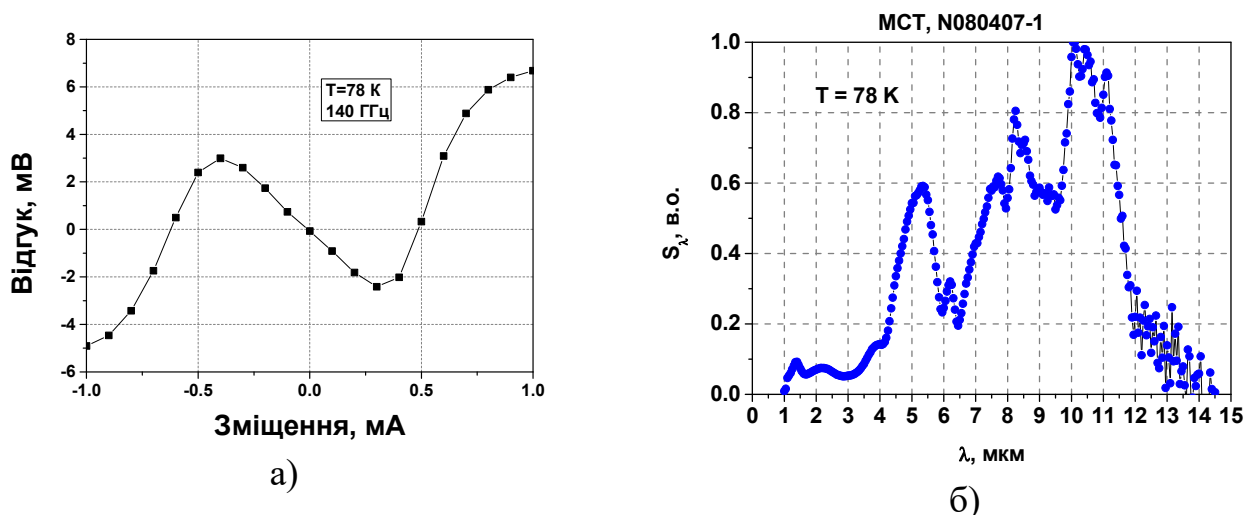


Рис. 11. Залежність чутливості одного з КРТ детекторів з розміром чутливого елемента $\sim 12 \times 25$ мкм² і метеликоподібною антеною від струму зміщення під дією випромінювання з частотою 140 ГГц при $T=78$ К (а) та спектральна залежність фотовідгуку даного КРТ детектора на основі n - $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0.201$) в ІЧ області спектра, виміряна при $T = 78$ К.

Рис. 11 демонструє можливість реалізації дводіапазонних детекторних структур з мікроантенами на основі епітаксійних шарів $Hg_{1-x}Cd_xTe$, що здатні функціонувати у тарагерцовому та ІЧ діапазонах спектра. Дводіапазонні приймачі на основі болометрів КРТ з металічними антенами, які продемонстрували відгук до ТГц випромінювання (рис. 11, а) (на основі розігріву електронного газу в біполярному напівпровіднику) є чутливими також в ІЧ діапазоні (за рахунок міжзонного поглинання) з довгохвильовою межею чутливості, яка відповідає їх хімічному складу (рис. 11, б).

Приклад достатньої спектральної роздільної здатності суб-ТГц системи візуалізації з двох-координатним механічним скануванням та асферичними лінзами, що дозволяють отримати дифракційно обмежену пляму для випромінювання з частотою $\nu \approx 270$ ГГц та з використанням 8-елементної лінійки ТГц приймачів болометричного типу на основі КРТ показано на рис. 12. Для візуалізації зображення з 8-елементною лінійкою приймачів необхідно було забезпечити індивідуальне зміщення струмом кожного елемента з подальшим підсиленням їхнього вихідного сигналу до рівня, який може бути оцифрований зовнішнім аналогово-цифровим перетворювачем. Система працює при кімнатній температурі. Показане на рис. 12 зображення було зроблене з використанням КРТ суб-ТГц детекторів при кімнатній температурі. Фрагмент органічного скла з дефектом також був схований у непрозорому конверті.

Отримана за допомогою такої ТГц системи інформація може бути використана для ідентифікації предметів, контролю якості харчових продуктів на предмет включень, вмісту вологості, для отримання інформації про рівень гідратації рослин в умовах кліматичних змін і т.д.

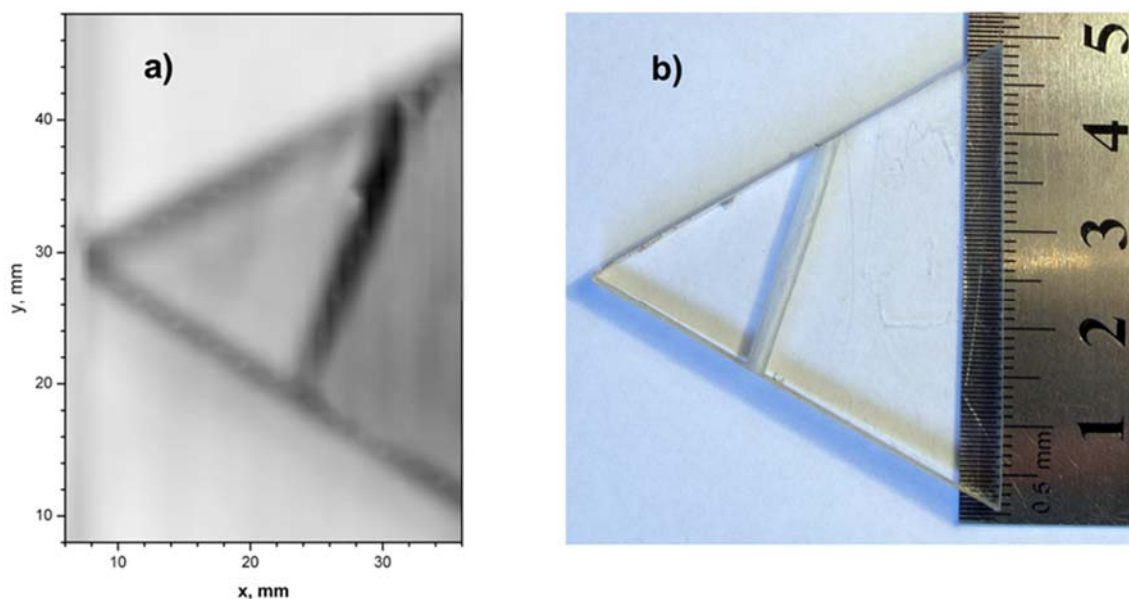


Рис. 12. Зображення фрагменту органічного скла у непрозорому конверті, $\nu \approx 270$ ГГц (ліворуч) і видиме зображення (праворуч). Потужність неперервного джерела випромінювання $P \approx 80$ мВт.

У шостому розділі представлені результати з розроблення елементів селективних фільтрів на основі композитних структур AlN , MgO / полімерна підкладка, блокуючих ІЧ та прозорих у видимому та ТГц діапазонах спектра. Важливим завданням для багатьох застосувань є значне зменшення ІЧ-видимості об'єктів, коли їхні температури близькі або трохи перевищують середню температуру Землі за нічних та денних умов. Слід також зазначити зростаючий попит на «стелс» технології, щоб уникнути виявлення та відстеження об'єктів сучасними системами ІЧ-спостереження. Придушення ІЧ образів об'єктів, що випромінюють, є одним з найактуальніших завдань у цивільних та військових галузях. Важливою вимогою до багатосмугових фільтрів є можливість блокування випромінювання, що створює шум в певних областях довжини хвиль при проходженні через фільтр, і той же час пропускати випромінювання з іншою довжиною хвилі.

В даній роботі запропоновано обґрунтування механізмів функціонування таких селективних фільтрів на полімерних підкладках з майлару чи тефлону з нанесеними на них покриттями AlN та MgO (рис. 13). Фізичні властивості полікристалічних та нанокристалічних тонких шарів AlN та MgO на тонкоплівкових підкладках з майлару та тефлону досліджувались для можливості їх використання як гнучких ІЧ-блокуючих фільтрів, які одночасно є прозорими у видимому, мікрохвильовому та ТГц спектральних діапазонах. Висока ефективність селективних фільтрів з покриттями AlN і MgO на тонких гнучких органічних підкладках, що блокують ІЧ випромінювання, обумовлена спектральним розміщенням їхньої смуги залишкових променів в області ІЧ спектра, де сконцентрована максимальна кількість потужності випромінювання АЧТ при $T=300$ К (рис. 14). Крім того, AlN має високий коефіцієнт теплопровідності, що важливо для відводу тепла на периферію. Виявлено уширення смуги залишкових променів для AlN в межах 10,5 – 17 мкм, що пов'язано з їх полікристалічною наноструктурованою будовою.

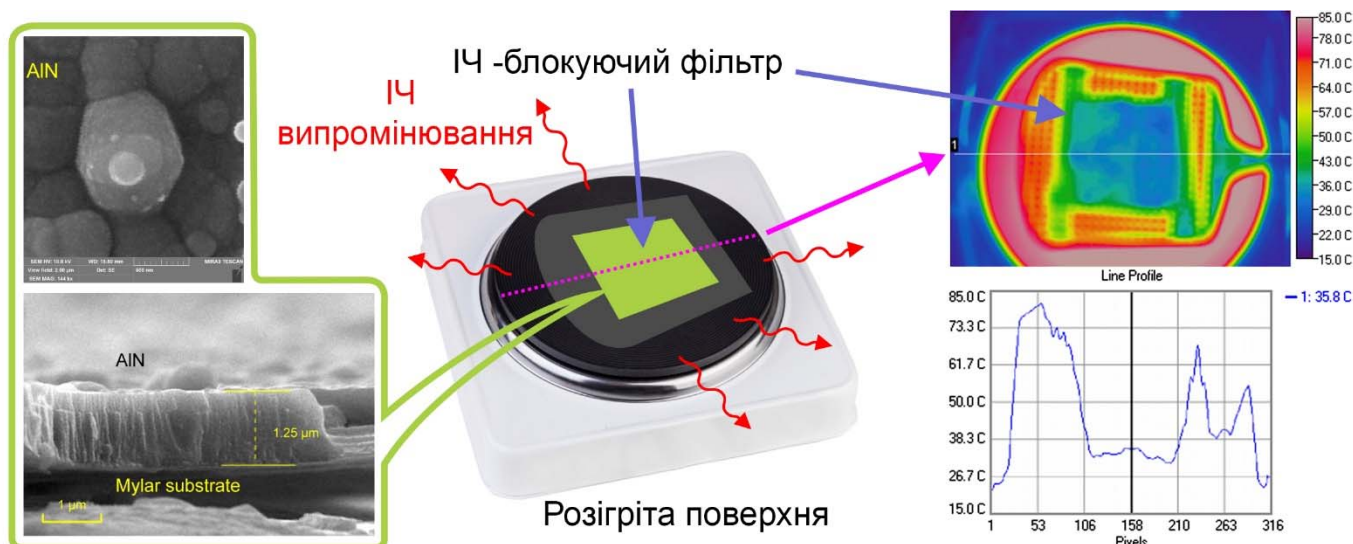


Рис. 13. ІЧ блокуючий фільтр на гнучкій полімерній підкладці майлару з наноструктурованим покриттям AlN , розміщений на розігрітій поверхні (в центрі); СЕМ фотографія структури (зліва) і тепловізійне зображення об'єкта, розігрітого до температури $T_{\text{eff}} = 78^\circ\text{C}$ з маскуванням ІЧ випромінювання за допомогою структури AlN /майлар (зправа) з розподілом ефективної температури вздовж лінії 1. Тепловізійна камера «Mikron M7800», $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, $d_{AlN} = 1.25$ мкм.

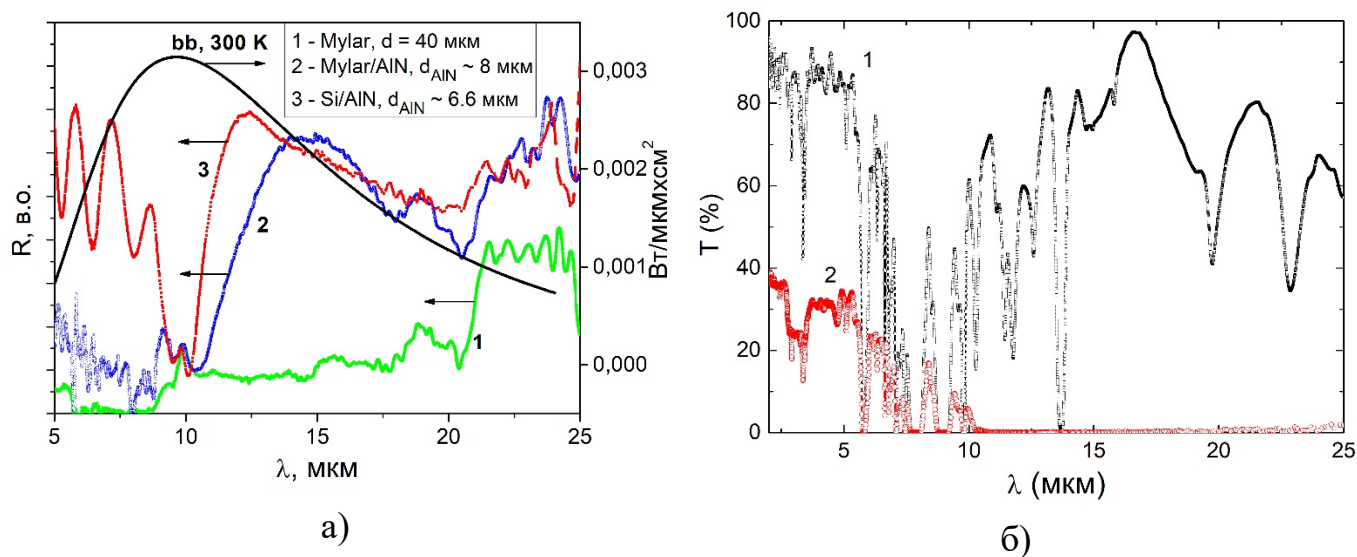


Рис. 14. Спектральні залежності ІЧ відбивання вихідної майларової плівки (крива 1) та майларової плівки і кремнію з тонкими наноструктурованими покриттями AlN (криві 2 і 3, відповідно). Крива “bb” описує спектральну випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла при $T = 300$ К (рис. а). Спектральні залежності ІЧ пропускання майларової підкладки, товщиною $d = 40$ μm (1) та вирощеного на цій підкладці полікристалічного шару AlN , товщиною $d \sim 15$ мкм (2) (рис. б).

Якість шарів AlN та MgO була підтверджена за допомогою елементного аналізу (EDX) зразків AlN / майлар та MgO / Al , який показав, що шари AlN мають елементний склад, близький до стехіометричного. Також проведено дослідження спектрів комбінаційного розсіювання світла (КРС) тонких шарів AlN на майларових підкладках, які виявили слабкі лінії, що спостерігались на 612 , 670 та 888 cm^{-1} і

можуть бути пов'язані із спектрами КРС поперечних та поздовжніх фононів, типовими для гексагональної (в'юрцитової) структури в тонких плівках *AlN*. Гексагональна структура шарів *AlN* підтвердилась даними зі скануючого електронного мікроскопа (рис. 13).

В роботі експериментально доведено та підтверджено систематичними випробуваннями з допомогою тепловізійної камери ($\lambda = 8...14$ мкм) ефективність зниження теплового випромінювання при застосуванні структур *AlN* / майлар як фільтрів, які блокують ІЧ-випромінювання від об'єктів, нагрітих до температури, вищої за кімнатну (рис. 13). Було встановлено, що ефективна температура може бути зменшена на $\Delta T \approx 8...13$ °С для живих об'єктів, що знаходяться при кімнатній температурі, коли об'єкт і тонкоплівкова гетероструктура розділені повітряним зазором. Для предметів, нагрітих до $T \approx 80$ °С, ефективна температура може бути зменшена на $\Delta T \approx 30...40$ °С, коли між об'єктом та структурою *AlN* / майлар є прошарок повітря товщиною кілька мм.

Доведено, що тонкі плівки *AlN* з високою теплопровідністю на майларових або тефлонових тонких гнучких підкладках характеризуються високим коефіцієнтом прозорості $\tau \approx 85...90\%$ в міліметровому та ТГц спектральному діапазоні, а також є прозорими для видимого випромінювання. Вони безумовно є одним з найкращих матеріалів для формування фільтрів, наприклад, для придушення ІЧ-випромінювання у фоновому режимі, що впливає на граничні характеристики низькотемпературних високочутливих детекторів ТГц та суб-ТГц випромінювання в ТГц приладах для спектроскопії та візуалізації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

За результатами виконання дисертаційної роботи вирішено важливу наукову проблему фізики приладів, елементів і систем, а саме встановлені основні технологічні процеси, які обмежують порогові параметри і характеристики фотоприймачів на основі вузькощілинних напівпровідників *HgCdTe* і досліджена їх фізична природа, що дозволило вперше в Україні розробити основи технології виготовлення дискретних та багатоелементних двоспектральних ІЧ та ТГц фотоприймачів випромінювання 3-го покоління. Отримані наступні основні результати:

1. На основі комплексних досліджень електрофізичних, структурних і оптичних характеристик вихідних епітаксійних шарів *HgCdTe* та підкладок *CdZnTe* було виявлено вплив типу та концентрації домішок у вихідних компонентах на густину дислокацій у плівках, вирощених методом рідкофазної епітаксії. Оцінено ефективність застосування перспективних технологій рідкофазної і молекулярно-променевої епітаксії ($T_{\text{росту}} \approx 376 - 726$ °С та 180 °С, відповідно) для вирощування шарів *HgCdTe*, придатних для створення на їх основі фоточутливих структур для ІЧ та ТГц діапазонів спектра з прогнозованими параметрами.

2. Визначені максимально допустимі значення температурних та механічних навантажень на епітаксійні шари *HgCdTe*, які повинні враховуватись в технології виготовлення приймачів на основі *HgCdTe*. Методом наноіндентування показано, наявність ліктеподібної поведінки на кривих навантаження-зміщення (300 – 500 мкН)

і навіть розрив цієї залежності у епітаксійних шарах $HgCdTe/CdZnTe$, вирощених методом рідкофазної епітаксії, що пояснюється можливими структурними фазовими переходами поблизу гетеромежі. Визначені значення нанотвердості і модуля Юнга як у шарах КРТ, так і поблизу інтерфейсів.

3. Розроблено топологію і елементи технології матричних ІЧ фотодіодів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$, формату 2×64 елементів (розмір чутливого елемента 30 мкм), матриць формату 128×128 (розмір чутливого елемента 25 мкм), 3×3 (розмір чутливого елемента 50 мкм) та 4×2 (розмір чутливих елементів $100 \text{ мкм} \times 40 \text{ мкм}$ та $210 \times 40 \text{ мкм}$, 274 відповідно), а також дискретні фотодіоди з діаметром чутливої області 1 мм та 1,5 мм. Відпрацьовані основні технологічні операції, включаючи фотолітографію, хімічну обробку поверхні, способи і режими нанесення металізації та пасивації, які мають критичний вплив на порогові параметри приймачів на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$.

4. Встановлені режими низькотемпературного осадження пасиваційних шарів $CdTe$ методом «гарячої стінки» на поверхню епітаксійних шарів $HgCdTe$, вирощених рідкофазною епітаксією на підкладках $CdZnTe$ ($T_{ож.} = 650 \text{ К}$, $T_{відкл.} = 373 \text{ К}$, товщина $\sim 300 \text{ нм}$). При вказаних режимах осадження шари $CdTe$ характеризуються адгезивними, морфологічними, структурними, діелектричними, стресовими властивостями і хімічним складом, що задовольняють вимогам до пасиваційних покриттів для фотоприймачів ІЧ та ТГц фотоелектроніки.

5. Розроблений метод формування омичних контактів при температурах близьких до кімнатної ($T_{відкл.} = 20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$) для епітаксійних плівок $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) як n-, так і p-типу провідності, в основі якого є осадження шарів металів Cr , Mo , Ti , які мають високу адгезію і можуть блокувати інтердифузію на межі «метал- $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ». Омичність контактів зумовлена утворенням збагаченого основними носіями приповерхневого шару внаслідок піннінгу рівня Фермі. Методом TLM визначено питомий контактний опір $Ti/p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) при $T = 300 \text{ К}$ і 77 К , який дорівнює $\rho_c = 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ та $\rho_c = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, відповідно, і який набагато менший у порівнянні з опором n-p переходу в $HgCdTe$.

6. Аналіз результатів проведеної метрологічної атестації електричних і спектральних характеристик виготовлених зразків ІЧ фотодіодів КРТ з різною топологією показав, що отримані при нульовому зміщенні значення $R_{0A} \approx (0.57\text{--}1.08) 10^5 \text{ Ом см}^2$ у фотодіодах для середньохвильового ІЧ діапазону спектра (3-5 мкм) свідчать про можливість їх роботи в режимі, обмеженому флуктуаціями фонового випромінювання (BLIP-режим). Можливість працювати у BLIP-режимі також підтверджена для довгохвильових діодів вимірами виявлювальної здатності ($D^* = 2,67 \cdot 10^{10} \text{ см Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$). BLIP-режим реалізований за рахунок зменшення поверхневої складової струму, а також об'ємної складової тунельної природи, з якою пов'язаний рівень власного ($1/f$) шуму фотоприймачів.

7. Розроблена топологія та виготовлені прототипи приймачів ТГц діапазону спектра на основі епітаксійних шарів $HgCdTe$ болометричного типу з різною конструкцією приймальної антени та розміром чутливого елемента, які функціонують при кімнатній температурі чи помірно охолодженні. Із досліджень їх чутливості в залежності від температури та струму зміщення встановлено, що у частотному діапазоні 28 – 270 ГГц еквівалентна шуму потужність становить $NEP_{300\text{К}}$

$\approx 4,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} і $NEP_{78K} \approx (2,5 - 5) \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2} в залежності від типу приймача і частоти випромінювання. Вказані параметри відповідають вимогам до приймачів, які застосовуються у системах активного ТГц бачення.

8. Експериментально показано можливість застосування приймачів болометричного типу на основі епітаксійних шарів *HgCdTe* у системах ІЧ та ТГц бачення. Реалізовані багатоспектральні приймачі для ІЧ та ТГц діапазонів спектра, функціонування яких ґрунтується на різних фізичних механізмах. Дводіапазонні приймачі на основі болометрів КРТ інтегровані з металічними антенами, які продемонстрували відгук до ТГц випромінювання (на основі розігріву електронного газу в біполярному напівпровіднику), є чутливими також в ІЧ діапазоні (за рахунок міжзонного поглинання) з довгохвильовою межею чутливості, яка відповідає їх хімічному складу.

9. Вперше показана можливість реалізації селективних фільтрів на основі композитних структур *AlN*, *MgO* / полімерна плівка, блокуючих ІЧ та прозорих у видимому та ТГц діапазонах спектра. Виявлено уширення смуги залишкових променів для *AlN* в межах 10,5 – 17 мкм, що пов'язано з їх полікристалічною наноструктурованою будовою. В комбінації з *MgO* область сильного відбивання буде в межах 10,5 – 26 мкм, де зосереджено >50% від загальної густини потужності абсолютно чорного тіла на всіх довжинах хвиль. Крім того, *AlN* має високий коефіцієнт теплопровідності, що важливо для відводу тепла на периферію з метою уникнення нагрівання фільтра і повторного перевипромінювання.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії і розділи монографій:

1. Sizov, F., Sakhno, M., Golenkov, A., Petryakov, V., Tsybrii, Z., Reva, V., and Zabudsky, V. (2014). Uncooled Rectification and Bolometer Type THz/Sub-THz Detectors. In: Corsi Carlo and Sizov Fedir (eds.), *THz and Security Applications- Detectors, Sources and Associated Electronics for THz Applications* (ch. 3, pp.53-73), Springer.
2. Sizov, F., Tsybrii, Z., Korotash, I., Rudenko, E. (2018). *IR blocking and transparent in visible and THz filters*. Lambert Academic publishers, Riga.
3. Tsybrii, Z., Sizov, F., Vuichyk, M., Svezhentsova, K., Rudenko, E., Korotash, I., Polotskiy, D. (2019). Functional Selective Nanostructured Coatings Synthesized by Low-Temperature Ion-Plasma Method on Polymeric Substrates. In book Alexander D. Pogrebnyak, Valentine Novosad, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (pp. 235-247). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_24.
4. Tsybrii, Z., Sizov, F., Korotash, I., Rudenko, E., Svezhentsova, K., Vuichyk, M. and Polotskiy, D. (2020). Nanostructured Magnesium Oxide Layers Synthesized on Flexible Substrates for Filtering Elements. In book Alexander D. Pogrebnyak, Oleksandr Bondar *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)* (ch. 21, pp. 227-234). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_21.

Статті першого та другого квартилів (Q1 та Q2) за класифікацією SCImago:

5. Ivasiv, Z.F., Tetyorkin, V.V., Sizov, F.F. (2001). Optical and photoelectrical properties of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ epitaxial films with graded band gap. *Infrared Phys. & Technol.*, 42, 61-67.
6. Tsybrii-Ivasiv, Z.F., Darchuk-Korovina, L.O., Sizov, F.F., Golenkov, O.G., Bilevych, Ye.O., Sidorov, Yu.G., Varavin, V.S. (2004). Investigation and characterization of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayers. *J. Alloys and Compounds*, 382, 288-291.
7. Bilevych, Ye., Soshnikov, A., Darchuk, L., Apatskaya, M., Tsybrii, Z., Vuychyk, M., Boka, A., Sizov, F., Boelling, O., Sulkio – Cleff, B. (2005). Influence of substrate materials on the properties of CdTe thin films grown by hot-wall epitaxy. *J. Cryst. Growth*. 275, Is.1-2, e1177-e1181. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.11.207>.
8. Golenkov, A.G., Sizov, F.F., Tsybrii, Z.F., Darchuk, L.A. (2006). Spectral sensitivity dependencies of backside illuminated planar MCT photodiodes. *Infrared Phys. & Technol.*, 47, 213 – 219. doi:10.1016/j.infrared.2004.12.001.
9. V.D.Popovych, I.S. Virt, F.F. Sizov, V.V. Tetyorkin, Z.F. Tsybrii (Ivasiv), L.O. Darchuk, O.A. Parfenjuk, M.I. Ilashchuk. The effect of chlorine doping concentration on the quality of CdTe single crystals grown by the modified physical vapor transport method // *Journal of Crystal Growth*.- 2007.- Vol. 308.- P.63-70.
10. Zabudsky, V., Sizov, F., Momot, N., Tsybrii, Z., Sakhno, N., Bunchuk, S., Michailov, N., and Varavin, V. (2012). THz/sub-THz direct detection detector on the base of electrons/holes heating in MCT layers. *Semicond. Sci. Technol.*, 27, N4, 045002 (8 pp.).
11. Sizov, F., Zabudsky, V., Dvoretiskii, S., Petryakov, V., Golenkov, O., Andreyeva, K., Tsybrii, Z. (2015). Two-color detector: Mercury-Cadmium-Telluride as a terahertz and infrared detector. *Applied Physics Letters*, 106, 082104-1 – 182104-4. doi: 10.1063/1.4913590.
12. Sizov, Fedir, Tsybrii, Zinoviia, Zabudsky, Vyacheslav, Golenkov, Oleksandr, Petryakov, Volodymyr, Dvoretzky, Sergey, Michailov, Nikolai, Shevchik-Shekera, Anna, Lysiuk, Ihor, Dieguez, Ernesto. (2015). Mercury–cadmium–telluride thin layers as subterahertz and infrared detectors. *Optical Engineering*, 54 (12), 127102-1 – 127102-8. doi:10.1117/1.OE.54.12.127102.
13. Rudenko, E., Tsybrii, Z., Sizov, F., Korotash, I., Polotskiy, D., Skoryk, M., Vuichyk, M., Svezhentsova, K. (2017). Infrared blocking, microwave and terahertz low-loss transmission AlN films grown on flexible polymeric substrates. *J. Appl. Phys.*, 121, 135304. <https://doi.org/10.1063/1.4979858>.
14. Rubio, Sandra, Sochinskii, Nikolai, Repiso, Eva, Tsybrii, Zinoviia, Sizov, Fiodor, Plaza, Jose Luis, Dieguez, Ernesto. (2017). $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ vapor deposition on CdZnTe substrates by Closed Space Sublimation technique. *Journal of Crystal Growth*, 457, 211–214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.02.035>.
15. Dvoretzky, S.A., Mikhailov, N.N., Remesnik, V.G., Sidorov, Yu.G., Shvets, V.A., Ikusov, D.G., Varavin, V.S., Yakushev, M.V., Gumenjuk-Sichevska, J.V., Golenkov, A.G., Lysiuk, I.O., Tsybrii, Z.F., Shevchik-Shekera, A.V., Sizov, F.F., Latyshev, A.V., Aseev, A.L. (2019). MBE-grown MCT hetero- and nanostructures for IR and THz detectors. *Opto-Electronics Review*, 27, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.07.002>.

16. Tsybrii, Zinoviia, Bezsmolnyy, Yuriy, Svezhentsova, Kateryna, Vuichyk, Mykola, Lysiuk, Ihor, Apatska, Mariia, Smolii, Mariia, Dmytruk, Nadiia, Bunchuk, Svitlana, Andreeva, Kateryna, Sizov, Fedir. (2020). HgCdTe/CdZnTe LPE epitaxial layers: From material growth to applications in devices. *Journal of Crystal Growth*, 529 (2020) 125295. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125295>.
17. Sizov, F., Tsybrii, Z., Apats'ka, M., Dmytruk, N., Slipokurov, V., Bunchuk, S., Bezsmolnyy, Yu., Popovych, V., Wiertel, M., Mikhailov, N. (2020). Ohmic metal / Hg_{1-x}Cd_xTe (x ≈ 0.3) contacts. *Semicond. Sci. Technol.*, 35, 125030 (12pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abc0f7>.
18. Tsybrii, Z., Sizov, F., Vuichyk, M., Korotash, I., Rudenko, E. (2020). AlN and MgO thin-layer coatings on the bendable polymeric substrates as selective filters for IR and THz spectral ranges. *Infrared Phys and Tech.*, 107, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103323>.
19. Sizov, F., Vuichyk, M., Svezhentsova, K., Tsybrii, Z., Stariy, S., Smolii, M. (2021). CdTe thin films as protective surface passivation to HgCdTe layers for the IR and THz detectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **124**, 105577 (7 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105577>.
- Статті третього та четвертого кuartилів (Q3 та Q4) за класифікацією SCImago:**
20. Ivasiv, Z.F., Sizov, F.F., Tetyorkin, V.V., Andreeva, E.V. (2002). Nondestructive band gap profile determination of HgCdTe LPE grown layers. *J. Infrared Millim. Waves*, 21, N2, 81-86.
21. Sizov, F., Richter, A., Bilevych, Ye., Tsybrii, Z., Kubica, K., Ries, R., Sidorov, Yu. (2006). Nanoindentation features in HgCdTe heterostructures. *Intern. J Nanotechnology*, 3, N1, 131 – 139.
22. Сизов, Ф.Ф., Апатская, М.В., Гуменюк-Сычевская, Ж.В., Забудский, В.В., Момот, Н.И., Смолий, М.И., Цыбрий, З.Ф., Дворецкий, С.А., Михайлов, Н.Н., Сахно, Н.В. (2011). Многоэлементные приемники терагерцового излучения на CdHgTe. *Прикладная физика*, №2, 61-66.
- Інші публікації в українських і міжнародних наукових виданнях, що індексуються базами даних Web of Science Core Collection та Scopus:**
23. Ivasiv, Z. F. and Tetyorkin, V. V. (2001). Photoelectrical properties of Hg_{1-x}Cd_xTe epitaxial films and photodiodes with composition grading. *Proc. SPIE*, 4355, 108–112.
24. Sizov, F., Richter, A., Bilevych, Ye., Tsybrii, Z., Kubica, K., Ries, R., Sidorov, Yu. (2005). Nanoindentation - induced phase transformations in HgCdTe epitaxial heterostructures. *УФЖ*, 50, N 1, 47 – 52.
25. Momot, N., Zabudsky, V., Tsybrii, Z., Apats'ka, M., Smolii, M., Dmytruk, N. (2010). Zero bias terahertz and subterahertz detector operating at room temperature. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 13, N 2, 166-169.
26. Sizov, F.F., Dobrovolsky, V.N., Zabudsky, V.V., Momot, N.I., Kamenev, Yu.Y., Tsybrii, Z.F. (2010). *Mm/sub-mm bolometer with free carriers heating in bipolar semiconductor waveguide*. IEEE Proc. of “2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves”, June 21-26, 2010, Ukraine, Kharkov, D-9 (3 pp.). DOI: [10.1109/MSMW.2010.5546133](https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546133).
27. Sizov, F., Zabudsky, V., Dobrovolsky, V., Momot, N., Tsybrii, Z., Apats'ka, M., Smolii, M., Dmytruk, N., Bunchuk, S., Mikhailov, N., Varavin, V. (2011). THz/sub-

- THz detector based on electrons and holes heating by electromagnetic wave propagating along Hg_{1-x}Cd_xTe layer. *Proc. SPIE*, 8167B-85. DOI: 10.1117/12.896580.
28. Sizov, F., Zabudsky, V., Golenkov, A., Petriakov, V., Dvoretzky, S., Tsybrii, Z. (2012). Mm-wave hybrid narrow-gap hot-carrier and Schottky diodes detector arrays. *Proc. SPIE*, 8850, 8850-89. doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.979768> (2012).
 29. Бабенцов, В., Сизов, Ф., Franc, J., Лученко, А., Свеженцова, Е., Цибрий З. (2013). Атомно-силовая микроскопия и фотолюминисценция наноструктурированного CdTe. *ФТП*, 47, вып. 9, 1210-1214.
 30. Sizov, Fiodor F., Zabudsky, Vyacheslav V., Dvoretzky, Sergey A., Petryiakov, Vladimir A., Golenkov, Aleksandr G., Andreyeva, Katerina V., Tsybrii, Zinoviia F., Shevchik-Shekera, Anna V., Dieguez, Ernesto. (May 13, 2015). MCT as sub-terahertz and infrared detector. *Proc. SPIE*, 9483, 94830V; doi: 10.1117/12.2176854.
 31. Руденко, Е.М., Короташ, І.В., Шаповалов, А.П., Цибрій, З.Ф., Білоголовський, М.О., Полоцький, Д.Ю., Шлапак, Ю.В., Чміль, В.М., Глушеченко, Е.М., Чміль, В.В., Пилипенко, А.М., Сизов, Ф.Ф. (2015). Теплофізичні та спектральні характеристики квазіоптичних фільтруючих пристроїв для кріоелектронних приймальних систем. *Доповіді НАНУ*, №12, 49-56.
 32. Sizov, F., Golenkov, A., Sakhno, M., Zabudsky, V., Tsybrii, Z., Dvoretzky, S., Mikhailov, N. (14 – 15 September 2015). *Uncooled rectifying and resistive type sub-THz direct detection detectors. Upper limit performance*. Proc. of 8th UK, Europe, China Conference on Millimeter Waves & Terahertz Technologies, Cardiff, UK, pp.14–17.
 33. Sizov, F., Tsybrii, Z., Zabudsky, V., Sakhno, M., Shevcik-Shekera, A., Smoliy, M., Dieguez, E., Dvoretzky, S. (2015). *Possibility of the detection in IR and sub/THz spectral region using MCT thin layer receivers: design of the chip, optical elements and antenna pattern*. Proc. of IEEE MMS 2015, Lecce (Italy), pp. 49–52.
 34. Shapovalov, A.P., Korotash, I.V., Rudenko, E.M., Sizov, F.F., Dubyna, D.S., Osipov, L.S., Polotskiy, D.Yu., Tsybrii, Z.F., Korchovyi, A.A. (2015). Structure and optical properties of AlN films obtained using the cathodic arc plasma deposition technique. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 18, N 2, 117-122. doi: 10.15407/spqeo18.02.117.
 35. Sizov, F., Dobrovolski, V., Tsybrii, Z., Zabudsky, V., Dvoretzky, S., Mikhailov N. (May 2016). *Narrow-gap MCT as THz detector*. Proc. of IEEE MIKON 2016, Krakow, Poland, 3 pages.
 36. Gumenjuk-Sichevska, J., Golenkov, O., Lysjuk, I., Melezhik, E., Sakhno, M., Shevchik-Shekera, A., Tsybrii, Z., Zabudsky, V., Sizov, F. Dvoretzky, S., Mikhailov, N. (2016). *Two-color arrays for sub-terahertz/infrared imaging*. Proc. of IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), Odessa, pp. 225–227. doi: 10.1109/CAOL.2016.7851436.
 37. Sizov, F., Tsybrii, Z., Zabudsky, V., Sakhno, M., Shevchik-Shekera, A., Dukhnin, S., Golenkov, A., Dieguez, E., Dvoretzky, S. (2016). Detection of IR and sub/THz radiation using MCT thin layer structures: design of the chip, optical elements and antenna pattern. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 19, N 2, 149–155. doi: 10.15407/spqeo19.02.149.

38. Tsybrii, Z., Vuichyk, M., Svezhentsova, K., Sizov, F., Korotash, I., Rudenko, E., Polotskiy, D. (2018). *Nanostructured Functional Film Coatings Formed by Helicon-Arc Ion-Plasma Method on the Polymeric Substrates*. Proc. of NAP-2018, 2018 IEEE 8th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”, Zatoka, Ukraine, September 9–14, 2018, Part 3, pp. 03TFNMC37-1 - 03TFNMC37-4. DOI: 10.1109/NAP.2018.8915365.
39. Цибрій, З.Ф. (2019). Особливості технології формування металічних контактів до дискретних ІЧ та ТГц приймачів випромінювання на основі епітаксійних шарів CdHgTe. *Доповіди НАНУ*, №9, 34-40. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.09.034>.
40. Tsybrii, Z.F., Sizov, F.F., Golenkov, A.G. (2020). Infrared blocking materials. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.* 2, pp. 24—28. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.02.024>.
41. Tsybrii, Z., Gumenjuk-Sichevska, J., Danilov, S., Dvoretzky, S., Bunchuk, S., Zabudsky, V., Mikhailov, N., Sizof, F. (2020). *Wide Band THz Detectors Based on HgCdTe Epitaxial Films*. Proc. of 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), pp. 921-924. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252813.
- Публікації у наукових виданнях з Переліку наукових фахових видань України:**
42. Андреева, Е.В., Ивасив, З.Ф., Тетеркин, В.В. (2002). Исследование темнового тока и $1/f$ шума в фотодиодах CdHgTe n^+ -р-типа. *Фотоэлектроника*, 11, 9–11.
43. Лисюк, І.О., Сизов, Ф.Ф., Апатська, М.В., Гуменюк-Сичевська, Ж.В., Смолій, М.І., Цибрій, З.Ф. (2008). Статистика впливу низькотемпературного відпалу на струми у фотодіодних структурах на основі КРТ. *Нові технології*, №2 (20), 35 – 38.
44. Цибрій, З.Ф., Вуйчик, М.В., Сизов, Ф.Ф. (2008). Захисні та просвітляючі властивості тонких шарів телуриду кадмію, вирощених методом «гарячої стінки». *Нові технології*, №2 (20), 21-24.
45. Сизов, Ф.Ф., Цибрій, З.Ф., Вуйчик, М.В., Білевич, Є.О., Апатська, М.В., Смолій, М.І., Лисюк, І.О., Андреева, К.В., Михайлов, М.М. (2009). Формування багатоелементних ІЧ-фоточутливих матриць фотоприймачів, формату 128x128 елементів на основі CdHgTe. *SEMT*, 4, 38 – 43.
46. Рева, В. П., Голенков, А. Г., Забудский, В. В., Цибрий, З.Ф., Коринец, С. В., Гуменюк-Сычевская, Ж. В., Бунчук, С. Г., Апатская, М. В., Лысюк, И. А., Смолий, М. И. (2010). Тепловизор на основе матричного фотоприемного устройства из 128×128 CdHgTe-фотодиодов. *ТКЭА*, 4, 24 – 28.
47. Сизов, Ф.Ф., Лисюк, І.О., Гуменюк-Сичевська, Ж.В., Цибрій, З.Ф., Андреева, К. В. (2011). Вплив низькотемпературного відпалу на струми у фотодіодних структурах на основі КРТ. *SEMT*, 2 (8) 1, 59 – 64.
48. Sizov, F., Tsybrii, Z., Vuichyk, M., Andreyeva, K., Apatska, M., Bunchuk, S., Dmytruk, N., Smolii, M. (2016). HgCdTe photodiodes for infrared mid-wavelength region. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 13, № 1, 49 – 55.
49. Цибрий, З.Ф., Андреева, Е.В., Апатская, М.В., Бунчук, С.Г., Вуйчик, Н.В., Голенков, А.Г., Дмитрук, Н.В., Забудский, В.В., Лысюк, И.А., Свеженцова, Е.В., Смолий, М.И., Сизов, Ф.Ф. (2017). Дискретные фотоприемники средневолнового ИК диапазона спектра на основе HgCdTe. *ТКЭА*, 6, 8 – 13. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЭА2017.6.08>.

Патенти:

50. Сизов Ф.Ф., Добровольський В.М., Цибрій З.Ф., Забудський В.В., Андреева К.В., Апатська М.В., Бунчук С.Г., Смолій М.І., Дмитрук Н.В. (опубл. 25.05.2012, Бюл.№10). Напівпровідниковий приймач ТГц/суб-ТГц випромінювання з вбудованим *p-n* переходом. Патент на винахід №98524.
51. Сизов Ф.Ф., Цибрій З.Ф., Петряков В.О., Забудський В.В., Голенков О.Г., Андреева К.В., Бунчук С.Г., Смолій М.І. (Опубл. 11.07.2016, Бюл.№13). Двodiaпазонний напівпровідниковий приймач випромінювання для ІЧ та ТГц/суб-ТГц діапазонів спектра. Патент на корисну модель №108104.
52. Сизов, Ф.Ф., Цибрій, З.Ф., Вуйчик, М.В., Свеженцова, К.В., Короташ, І.В., Руденко, Е.М., Полоцький, Д.Ю. (Опубл. 25.03.2019, Бюл. №6). Маскувальні покриття із селективними властивостями. Патент на винахід UA 118901 C2.

Матеріали конференцій та наукових семінарів:

53. Ivasiv, Z. F., Tetyorkin, V.V. (2001). *Investigation of Photo-electrical Spectra in Epitaxial Films and Heterojunction Structures of Narrow-Gap HgCdTe and PbSnTe Ternary Compounds*. VIII Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок, Івано-Франківськ, 2001, С. 167-168.
54. Андреева, Е.В., Гуменюк-Сычевская, Ж.В., Коровина, Л.А., Цибрий, З.Ф. (2002). *Исследование электрофизических свойств фотодиодных линеек HgCdTe*. XVII Междунар. научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, тезисы докладов, Москва, С.147-148.
55. Andreeva, K.V., Gumenjuk-Sichevska, J.V., Darchuk (Korovina), L.A., Tsybrij, Z.F. (2002). *Epitaxial MCT photovoltaic detectors*. Sixth intern. Conf. "Material sciences and material proper-ties for infrared optoelectronics" (22-24 may 2002, Kyiv, Ukraine), Abstracts, P.54.
56. Tetyorkin, V.V., Tsybrij, Z.F. and Sizov, F.F. (2002). *Noise mechanisms in Hg_{1-x}Cd_xTe photodiodes*. 1-а Українська наукова конф. з фізики напівпровідників, Одеса, 2002, тези доповідей, т.1, С.126.
57. Tetyorkin, V.V., Ivasiv, Z.F., Gumenyuk-Sychevskaya, J.V. and Sizov, F.F. (2002). *Noise mechanisms in MWIR and LWIR HgCdTe photodiodes*. International conference on solid state crystals, Zakopane, Poland, 2002, Programme and abstracts, P. 63.
58. Дарчук, Л.О., Сизов, Ф.Ф., Цибрій, З.Ф., Смірнова, Н.А., Денисов, І.А. (2003). *Визначення якості епітаксійних плівок HgCdTe*. IX Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок, Івано-Франківськ, 2003, Матеріали конференції, т.І, С.140-141.
59. Tsybrij-Ivasiv, Z.F., Darchuk, L.O., Sizov, F.F. (2003). *The Hg_{1-x}Cd_xTe Epilayers Investigation and Characterization*. E-MRS 2003 Annual Meeting "Development of methods for characterizing the microstructure of novel materials", Warsaw, (Poland), P. 88.
60. Сизов, Ф., Билевич, Е., Цибрий, З., Сидоров, Ю., Рихтер, А., Рис, Р., Кубика, К. (2004). *Исследование механических свойств гетеро-структур HgCdTe методом наноиндендирования*. XVIII Международная конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25-28 мая 2004, Москва, Россия. Тезисы докладов, С. 168.

61. Sizov, F., Richter, A., Bilevych, Ye., Tsybrii, Z., Sidorov, Yu., Varavin, V. (2004). *Nanoindentation in application to HgCdTe/CdTe/ZnTe MBE heterostructures*. Міжнар. Науково-техн. конф. „Сенсорна електроніка і мікросистемні технології”, 1-5 червня 2004 р., Одеса, Україна. Тези доповідей, С. 123.
62. Darchuk-Korovina, L.O., Tsybrii, Z.F., Virt, I.S. (2004). *The investigation of LPE and MBE Hg_{1-x}Cd_xTe layers*. Міжнар. Науково-техн. конф. „Сенсорна електроніка і мікросистемні технології”, 1-5 червня 2004 р., Одеса, Україна. Тези доповідей, С. 131.
63. Сизов, Ф.Ф., Билевич, Е.О., Васильев, В.В., Голенков, А.Г., Гуменюк-Сычевская, Ж.В., Дворецкий, С.А., Забудский, В.В., Захарьяш, Т.И., Клименко, А.Г., Марчишин, И.В., Овсюк, В.Н., Рева, В.П., Сидоров, Ю.Г., Талипов, Н.Х., Цибрий, З.Ф. (2004). *Гетероструктурные гибридные ФПУ*. Пятый меж-дународный российско-украинский семинар “Нанофизика и нанoeлек-троника”, 17-19 июня 2004 г., Санкт-Петербург, Россия. Тезисы докладов, С.29-30.
64. Bilevych, Ye., Soshnicov, A., Darchuk, L., Apatskaya, M., Tsybrii, Z., Vuychuk, M., Voka, A., Sizov, F., Boelling, O., Sulkio – Cleff, B. (2004). *The influence of substrate materials to the properties of CdTe thin films grown by HWE*. The fourteenth international conference on crystal growth in conjunction with the 12 intern. conf. on vapor growth and epitaxy, Grenoble 2004, P. 312.
65. Вірт, І.С., Сизов, Ф.Ф., Білик, І.С., Івасів, З.Ф., Колек, А. (2005). *Нерівноважні процеси в епітаксійних плівках Hg_{1-x}Cd_xTe*. Матеріали Ювілейної Х Міжнар. Конф. „Фізика і технологія тонких плівок”, Україна, Івано-Франківськ, 2005, С. 240-241.
66. Popovych, V.D., Virt, I.S., Tsutsura, D.I., Tsybrij (Ivasiv), Z.F. and Sizov, F.F. (2005). *Characterization of the Vapor Grown CdTe Crystals for High Energy Radiation Detectors*. 12TH Intern. conf. on II-VI compounds, Warsaw, Poland, 12-16 september, 2005, P.68.
67. Андреева, Е.В., Апатская, М.В., Билевич, Е.О., Вуйчик, Н.В., Дарчук, Л.А., Сарсембаева, А.З., Сизов, Ф.Ф., Цибрий З.Ф. (2006). *Формирование пассивационного покрытия на основе теллурида кадмия для ИК-фоточувствительной матрицы HgCdTe*. XIX Международная научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 2006. Москва, Россия, С.108.
68. Вуйчик, М.В., Білевич, Є.О., Апатська, М.В., Смолій, М.І., Цибрій, З.Ф., Сизов, Ф.Ф. (2007). *Формування напівпровідникових низькорозмірних структур на основі сполук типу II-VI та IV-VI методом „гарячої стінки”*. XI Міжнародна конференція „Фізика і технологія тонких плівок та наносистем” Україна, Івано-Франківськ, 2007, т.1, С. 16-17.
69. Сизов, Ф.Ф., Апатська, М.В., Цибрій, З.Ф., Білевич, Є.О., Дарчук, Л.О., Смолій, М.І., Вуйчик, М.В. *Формування багатоелементних матриць фотоприймачів за допомогою тонкоплівкової технології на HgCdTe*. III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-3, Україна, Одеса, 17-22 червня 2007 р., С.328.
70. Попович, В.Д., Вірт, І.С., Білик, М.Ф., Ротера, Р., Цибрій, З. Ф., Сизов, Ф.Ф. (2007). *Вплив концентрації легуючої домішки на оптичні спектри пропускання монокристалів CdTe:Cl, вирощених методом сублімації*. III Українська наукова

- конференція з фізики напівпровідників УНКФН-3, Україна, Одеса, 17-22 червня 2007 р., С.426.
71. Цибрій, З.Ф., Вуйчик, М.В., Сизов, Ф.Ф. (2008). *Захисні та просвітляючі властивості тонких шарів телуриду кадмію, вирошених методом «гарячої стінки»*. Третя міжнар. науково-практична конференція „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології”, Україна, Кременчук, 21-23 травня 2008 р., С. 188-189.
 72. Лисюк, І.О., Апатська, М.В., Гуменюк-Сичевська, Ж.В., Смолій, М.І., Цибрій, З.Ф. (2008). *Результати статистичної обробки низькотемпературного відпалу фотодіодних структур на основі КРТ*. Третя міжнар. науково-практична конференція „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології”, Україна, Кременчук, 21-23 травня 2008 р., С. 173-174.
 73. Цибрій, З.Ф., Вуйчик, Н.В., Білевич, Е.О., Апатская, М.В., Смолий, М.И., Андреева, Е.В., Лысюк, И.А. (2008). *Формирование многоэлементных ИК-фоточувствительных матриц фотоприемников, формата 128x128 элементов на основе CdHgTe*. XX Междунар научно-техн. конференция по фото-электронике и приборам ночного видения, Россия, Москва, 27-30 мая 2008 г., С. 122-123.
 74. Вуйчик, М.В., Цибрій, З.Ф., Білевич, Є.О., Свеженцова, К.В., Сизов, Ф.Ф. (2008). *Вплив термічної активації на формування низькорозмірних структур методом „гаряча стінка”*, Всеукраїнська конф. з міжнародною участю, присвячена 90-річчю Національної академії наук України „Хімія, фізика та технологія поверхні наноматеріалів”, Київ, 28-30 травня 2008 р, С. 122.
 75. Вуйчик, М.В., Цибрій, З.Ф., Свеженцова, К.В., Бунчук, С.Г., Сизов, Ф.Ф. (2008). *Особливості ІЧ-спектроскопії тонких шарів CdTe та PbTe, вирошених методом „гарячої стінки”*. VI Міжнар. школа-конф. “Актуальні проблеми фізики напівпровідників”, Дрогобич, Україна, 23-26 вересня 2008 р., С.152.
 76. Цибрій, З.Ф., Вуйчик, М.В., Сизов, Ф.Ф. (2009). *Вплив пасиваційного покриття вирошеного методом «гарячої стінки» на властивості епітаксійних шарів CdHgTe*. Матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції, Полтава, Україна 2009, Том 8.С. 49-52.
 77. Цибрій, З.Ф., Момот, Н. І., Забудський, В.В., Бунчук, С.Г. (2009). *Приймачі міліметрового та субміліметрового діапазонів спектра на основі тонких плівок КРТ*. XII Міжнар. конф. «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем», Івано-Франківськ, Україна, 18-23 травня 2009 р, Т.1, С.401-403.
 78. Вуйчик, М.В., Цибрій, З.Ф., Свеженцова, К.В., Євменова, А.З., Сизов, Ф.Ф. (2009). *Технологічні прийоми вирощування пасиваційного покриття та дослідження його впливу на властивості CdHgTe*. Всеукраїнська конф. «Хімія, фізика та технологія модифікування поверхні», Київ, Україна, 20-22 травня 2009 р., С.315.
 79. Virt, Ihor S., Bilyk, Igor S., Sizov, Fedir F., Tsybriy, Zenoviya F., Golenkov, Aleksandr G. (2009). *Electrical and optical properties of HgTe/CdTe superstructures*. E-MRS 2009 Fall Meeting, Warsaw (Poland) 14-18 September 2009, Book of Abstracts, P.93.
 80. Вуйчик, М.В., Свеженцова, К.В., Євменова, А.З., Цибрій, З.Ф., Білевич, Є.О., Лученко, А.І., Одарич, В.А., Городничий, О.П. (2009). *Дослідження фізичних властивостей тонких плівок CdTe/BaF₂ вирошених методом «гарячої стінки»*. IV

- Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-4, 15-19 вересня 2009 р., Запоріжжя, Україна, Тези доповідей, Т.2. С.48.
81. Сизов, Ф.Ф., Цибрій, З.Ф., Забудський, В.В., Каменєв, Ю. Є., Бунчук, С.Г., Момот, Н. І. (2009). *Використання вузькозонного $Cd_xHg_{1-x}Te$ для створення приймачів терагерцового діапазону спектра*. IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-4, 15-19 вересня 2009 р., Запоріжжя, Україна, Тези доповідей, Т.2. С.87.
 82. Вірт, І.С., Білик, І.С., Голенков, О.Г., Сизов, Ф.Ф., Цибрій, З. Ф. (2009). *Електричні та оптичні властивості надструктур $HgTe/CdTe$* . IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-4, 15-19 вересня 2009 р., Запоріжжя, Україна, Тези доповідей, Т.2. С. 84.
 83. Sizov, F., Dobrovolsky, V., Zabudsky V., Momot, N. and Tsybrii, Z. (2010). *THz/sub-THz Bolometer with Free Carriers Heating in the Semiconductor Waveguide*. Proc. of Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defense and Security NATO SET Specialists Meeting, 3-4 may, 2010, Lithuania, Vilnius, RTO-MP-SET-159-17-1.
 84. Sizov, F., Dobrovolsky, V., Zabudsky, V., Momot, N., Dvoretiskii, S, Michailov, N., Tsybrii, Z. (2010). *Warm electron mm/sub-mm bolometer*. Proceed. Proc. of IRMMW-THz 2010, 5-10 September, 2010, Italy, Rome, We-P.22.
 85. Sizov, F.F., Dobrovolsky, V.N., Zabudsky, V.V., Momot, N.I., Kamenev, Yu.Y., Tsybrii, Z.F. (2010). *Mm/sub-mm bolometer with free carriers heating in bipolar semiconductor waveguide*, “2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” June 21-26, 2010, Ukraine, Kharkov, P. D-9.
 86. Сизов, Ф.Ф., Апатская, М.В., Гуменюк-Сычевская, Ж.В., Дворецкий, С.А., Забудский, В.В., Михайлов, Н.Н., Момот, Н.И., Сахно, М.В., Смолий, М.И., Цибрий, З.Ф. (2010). *Многоэлементные приемники терагерцового излучения на основе $CdHgTe$* . XXI Международная научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25-28 мая 2010, Москва, Россия, Тезисы докладов, С.123-124.
 87. Вуйчик, М.В., Цибрій, З.Ф., Євменова, А.З., Лученко, А.І., Свеженцова, К.В., Сизов, Ф.Ф. (2010). *Вплив товщини пасиваційного покриття на оптичні властивості епітаксійних шарів на основі $CdHgTe$* . VII Міжнар. школа-конф. «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», 28 вересня-1 жовтня 2010 р., Дрогобич, Україна, Тези доповідей, С. 101-102.
 88. Sizov, F., Zabudsky, V., Tsybrii, Z., Mikhailov, N., Varavin, V. (2011). *Multispectral MCT detectors for THz/sub-THz region*. SPIE Optical Systems Design, Conference 8167B, 5–8 September 2011, Marseille, France, P. 21.
 89. Сизов, Ф. Ф. , Забудский, В.В., Цибрий, З. Ф., Бунчук, С. Г., Момот, Н. И. , Михайлов, Н. Н. , Дворецкий, С. А. (2011). *Регистрация ТГц/суб-мм излучения структурами с квантовыми ямами на основе КРТ*. Российская конференция и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники, ФОТОНИКА 2011, 22 - 26 августа 2011 Новосибирск, С.46.
 90. Сизов, Федір, Цибрій, Зіновія, Забудський, В'ячеслав, Апатська, Марія, Смолий, Марія, Бунчук, Світлана, Дмитрук, Надія. (2011). *Розробка приймачів ТГц/суб-мм діапазону спектра на основі тонких плівок $CdHgTe$* . Всеукраїнська науково-

- технічна конференція «Лазерні технології. Лазери та їх застосування», 21-24 червня 2011 р., Трускавець, Україна, С.123.
91. Цибрій, З.Ф., Забудський, В.В., Вуйчик, М.В., Кухтарук, Н.І., Апатська, М.В., Смолій, М.І., Дмитрук, Н.В., Бунчук, С.Г., Андрєєва, К.В. (2011). *Приймачі випромінювання ТГц/суб-ТГц діапазону спектра на основі CdHgTe*. V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-5, 9-15 жовтня 2011 р., Ужгород, Україна, С.325.
 92. Вуйчик, Н.В., Цибрій, З.Ф., Билевич, Е.О., Евменова, А.З., Лученко, А.И., Свеженцова, К.В., Сизов, Ф.Ф. (2012). *Влияние слоя пассивации на работу сенсорных приборов с активным элементом на основе CdHgTe*. XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, Москва, Россия, С. 208-210.
 93. Забудский, В.В., Цибрий, З.Ф., Сизов, Ф.Ф., Апатская, М.В., Бунчук, С.Г., Дмитрук, Н.В., Смолий, М.И., Михайлов, Н.Н., Дворецкий, С.А. Приемники ТГц/суб-ТГц излучения на основе эпитаксиальных слоев CdHgTe с прямым детектированием сигнала. XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, Москва, Россия, С. 213-215.
 94. Babentsov, V., Beketov, G., Tsybrii, Z., Vuichyk, M., Svezhentsova, K. (2012). *Growth and characterization of CdTe nanostructured layers for nanovoltaic devices*. International Meeting CNM-3, Uzhorod, Ukraine, 14-17 October 2012, P.130.
 95. Tsybrii, Z., Andreeva, K., Apats'ka, M., Bunchuk, S., Vuichyk, M., Dmytruk, N., Sizov, F., Smoliy, M. (2013). *320x240 MCT photodiodes arrays for 3-5 μm spectral region*. VIII Int. school-conf. "Actual problems of semiconductor physics", 25-28 June, 2013, Drohobych, Ukraine, P.116.
 96. Sizov, Fedir, Petriakov, Volodymyr, Dobrovolsky, Valentin, Golenkov, Olexandr, Zabudsky, Vyacheslav, Tsybrii, Zenovija, Sakhno, Mykola. (2013). *THz/sub-THz-wave hybrid detector arrays with narrowgap hot-electron bolometers and GaAs Schottky diodes*. 7th Terahertz Days and GDR-I Workshop, March 25th-27th 2013, Cargese, Corsica, France.
 97. Sizov, F., Golenkov, A., Sakhno, N., Reva, V., Tsybrii, Z., Gumenjuk-Sychevska, J., Zabudsky, V. (2013). *Problems in formation of large format THz/sub-THz arrays*. NATO Advanced Research Workshop (ARW) "Detectors, Sources and Associated Electronics for THz Applications", May 26-29, 2013, Kyiv, Ukraine.
 98. Андрєєва, К.В., Апатська, М.В., Бунчук, С.Г., Вуйчик, М.В., Дмитрук, Н.В., Сизов, Ф.Ф., Смолій, М.І., Цибрій, З.Ф. (2013). *Формування ІЧ фотодіодів з великою площею чутливого елемента на основі епітаксійних шарів CdHgTe*. VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-6», 30 вересня – 4 жовтня 2013, Чернівці, Україна, С.380-381.
 99. Vuichyk, M., Lavoryk, S., Lytvyn, P., Rashkovetskyi, L., Svezhentsova, K., Evmenova, A., Tsybrii, Z., Chizhov, A. (2013). *Investigation of the absorption edge in CdZnTe thin films grown by "hot wall" epitaxy*. VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-6», 30 вересня – 4 жовтня 2013, Чернівці, Україна, С. 459-460.

100. Dubyna, D., Polotskiy, D., Korotash, I., Rudenko, E., Shapovalov, A., Tsybrii, Z. (2014). *Optical properties of AlN films obtained by cathodic arc plasma deposition technique*. X International conf. "Electronics and applied physics", 22-25 October 2014, Kyiv, Ukraine, P.218-219.
101. Sizov, F., Zabudsky, V., Dvoretiskii, S., Petryakov, V., Golenkov, O., Tsybrii, Z., Dieguez, E., Repiso, E. (2015). *Mercury-Cadmium-Telluride thin layers as sub-THz and IR detectors*. 8th THz Days, 31 March – 2 April 2015, Areches, France, P. 135.
102. Sizov, Fiodor F., Zabudsky, Vyacheslav V., Dvoretzky, Sergey A., Petryiakov, Vladimir A., Golenkov, Aleksandr G., Andreyeva, Katerina V., Tsybrii, Zinoviia F., Shevchik-Shekera, Anna V., Dieguez, Ernesto. (2015). *MCT as sub-terahertz and infrared detector*. SPIE DSS Conference 9483: Terahertz Physics, Devices, and Systems IX: Advanced Applications in Industry and Defense, 20-24 April 2015, Baltimore, USA, P. 310.
103. Vuichyk, M., Tsybrii, Z., Svezhentsova, K., Smirnov, O., Bilevych, O., Sizov, F. (2015). *The photosensitivity nanostructures based on II-VI semiconductors*. XV Int. Conf. "ICPTTFN-XV", 11-16 May 2015, Ivano-Frankivsk, Ukraine, P. 311.
104. Вуйчик, М.В., Лученко, А.І., Свеженцова, К.В., Смірнов, О.Б., Цибрій, З.Ф. (2015). *Сенсибілізація фоточутливих пліткових нанокмпозитів квантовими точками на основі напівпровідників A_2B_6* . Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «Хімія, фізика та технологія поверхні», 13-15 травня 2015 р., Київ, Україна, С.96.
105. Sizov, Fedir, Tsybrii, Zinoviia, Zabudsky, Vyacheslav, Golenkov, Oleksandr, Petryakov, Volodymyr, Dvoretiskii, Sergei. (2015). *MCT thin layers as sub-terahertz and infrared bi-color detector*. Int. Scient. And tech. conf. "Laser technologies. Lasers and their application", 17-19 June 2015, Truskavets, Ukraine, P.98-100.
106. Shapovalov, A., Korotash, I., Rudenko, E., Osipov, L., Polotskiy, D., Tsybrii, Z., Golenkov, A., Sizov, F. (2015). *AlN nanostructured films on thermolabile polymeric films for protecting coatings from IR radiation*. International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials NANO-2015, 26 –29 August 2015 Lviv, Ukraine, P.313.
107. Rudenko, E., Shapovalov, A., Korotash, I., Osipov, L., Polotskiy, D., Belogolovskii, M., Tsybrii, Z., Golenkov, A., Sizov, F. (2015). *Fabrication of infrared filtering systems on the base of composite structures AlN film - polymer substrate*. Ukrainian–German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology, 21-21 September, 2015, Kyiv, Ukraine, P. 54.
108. Repiso, Eva, Corrochano, Álvaro, Rubio, Sandra, Plaza, Jose, Luis, Tsybrii, Zinoviia, Vuichyk, Mykola, Dieguez, Ernesto. (2015). *Range of the Temperature gradients and the growth rate values in the growth of CdZnTe bulk crystals from the melt*. Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG5), 9-11 September 2015, Bologna, Italy.
109. Repiso, E., Corrochano, A., Rubio, S., Plaza, J. L., Tsybrii, Z., Vuichyk, M., Diéguez, E. (2015). *Effect of crucible geometry and fixed heat exchangers in the solid-liquid interface for growing CdZnTe bulk crystals using a Vertical Gradient Freeze technique*. Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG5), 9-11.09.2015, Bologna, Italy.

110. Сизов, Ф.Ф., Руденко, Е.М., Цибрій, З.Ф., Свеженцова, К.В., Голенков, О.Г., Вуйчик, М.В., Короташ, І.В., Шаповалов, А.П., Полоцький, Д.Ю., Білоголовський, М.О., Осіпов, Л. (2015). *Маскуючі та фільтруючі тонкі шари наноструктурованих композиційних структур для ІЧ та суб-ТГц діапазонів спектру*. Матеріали інформаційно-комунікативного заходу «Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України», 22-23 вересня 2015 р., Київ, Україна.
111. Андрєєва, К.В., Апатська, М.В., Бунчук, С.Г., Вуйчик, М.В., Дмитрук, Н.В., Лисюк, І.О., Свеженцова, К.В., Смолій, М.І., Цибрій, З.Ф. (2018). *Мультиспектральні приймачі інфрачервоного випромінювання на основі епітаксійних шарів CdHgTe*. VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-8, 2-4 жовтня 2018 р., Ужгород, Україна, книга 1, С. 211-212.
112. Tsybrii, Z., Svezhentsova, K., Vuichyk, M., Rudenko, E., Korotash, I., Polotskiy, D. and Sizov, F. (2018). *Terahertz low-loss transmission filters based on AlN film/polymer substrates structures for navigation, positioning and telecommunication systems*. VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-8, 2-4 жовтня 2018 р., Ужгород, Україна, книга 1, С. 272.
113. Tsybrii, Z., Vuichyk, M., Svezhentsova, K., Sizov, F., Korotash, I., Rudenko, E., Polotskiy, D. *Nanostructured Functional Film Coatings Formed by Helicon-Arc Ion-Plasma Method on the Polymeric Substrates*. 2018 IEEE 8th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”, Zatoka, Ukraine, September 9–14, 2018, Part 3, pp. 03TFNMC37.
114. Vuichyk, M.V., Svezhentsova, K.V., Tsybrii, Z.F. (2019). *CdTe thin films as passivation to CdHgTe photodiodes*. XVII International Freik conference on physics and technology of thin films and nanosystems, May 20-25, 2019, Ivano-Frankivsk, P.295.
115. Sizov, F., Golenkov, A., Tsybrii, Z., Mikhailov, N., Lysyuk, I. (2019). *Narrow-gap semiconductors for IR and THz detection*. EMN Amsterdam Meeting 2019 “Energy Materials Nanotechnology”, June 17-21, Amsterdam, Holland, abstract 45.
116. Tsybrii, Z., Sizov, F., Korotash, I., Rudenko, E., Svezhentsova, K., Vuichyk, M., Polotskiy, D. (2019). *Nanostructured magnesium oxide layers syntesized on flexible substrates for filtering elements*. 2019 IEEE 9th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”, Odesa, Ukraine, September 15–20, 2019, Part 1, p. 01TFC09.

АНОТАЦІЯ

Цибрій З.Ф. Фізико-технологічні основи розроблення HgCdTe -приймачів ІЧ та ТГц діапазонів і елементів блокування ІЧ випромінювання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, 2021

Дисертацію присвячено встановленню основних технологічних процесів, які обмежують порогові параметри і характеристики фотоприймачів на основі вузькощілинних напівпровідників *HgCdTe* і дослідженню їх фізичної природи, що дозволило вперше в Україні розробити основи технології виготовлення дискретних

та багатоелементних двоспектральних ІЧ та ТГц фотоприймачів випромінювання 3-го покоління. Проведено ґрунтовний аналіз фізико-хімічних процесів, які відбуваються при формуванні приймачів ІЧ діапазону спектра на основі $HgCdTe$. Зокрема, визначені гранично можливі значення температурних та механічних навантажень на епітаксійні шари $HgCdTe$, які повинні враховуватись в технології виготовлення приймачів на основі $HgCdTe$; розроблені низькотемпературні режими формування захисних покриттів $CdTe$, фізичні властивості яких задовольняють вимогам до пасиваційних покриттів; вивчено фізико-хімічні процеси на інтерфейсі метал/ $HgCdTe$, що відбуваються при розроблених низькотемпературних режимах формування двошарових омичних контактів до епітаксійних шарів $HgCdTe$, як з електронним, так і з дірковим типом провідності, омична поведінка яких не залежить від типу металу, що свідчить про збагачення носіями приповерхневого шару, що зумовлено піннінгом рівня Фермі. Запропоновані і розроблені дводіапазонні приймачі на основі болометрів КРТ інтегровані з металічними антенами, які продемонстрували відгук до ТГц випромінювання (на основі розігріву електронного газу в біполярному напівпровіднику), є чутливими також в ІЧ діапазоні (за рахунок міжзонного поглинання).

Вперше показана можливість реалізації селективних фільтрів на основі композитних структур AlN , MgO / полімерна плівка, блокуючих ІЧ та прозорих у видимому та ТГц діапазонах спектра.

Ключові слова: епітаксійний шар $HgCdTe$, інфрачервоний, терагерцовий, фотодіод, вольт-амперна характеристика, селективний фільтр, $AlN(MgO)$ /майлар (тефлон).

SUMMARY

Tsybrii Z.F. Physical and technological grounds of IR and THz $HgCdTe$ -detectors and IR blocking elements development.

Doctor of Science Thesis in Physics and Mathematics (speciality 01.04.01 – Physics of Devices, Elements and Systems). - V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the determination of the main technological processes that limit the threshold parameters and characteristics of photodetectors based on narrow-gap $HgCdTe$ semiconductors and the study of their physical nature, which allowed for the first time in Ukraine to develop the basics of technology for discrete and multi-element two-color IR and THz detectors of third generation. A thorough analysis of physical and chemical processes that occur during the formation of IR detectors based on $HgCdTe$ was carried out. This allowed to study, optimize and substantiate the modes of key technological stages of their formation and to develop unique technological methods of manufacturing IR and THz MCT detectors. The structure of the work reflects its evolution from the study and choice of the best growth technique (liquid - phase technique, molecular beam epitaxy) of the initial material $HgCdTe$ to the development and fabrication of IR and THz detectors and

two-color structures through the comprehension of main physical mechanisms that occur in different technological process.

The topologies of IR multielement photodiode arrays with different format and size of sensitive elements based on MCT epitaxial layers, as well as discrete photodiodes, were developed. The technological process of IR detectors manufacturing based on epitaxial layers of *HgCdTe*, including modes of photolithography, chemical treatment, methods and modes of metallization and passivation has been worked out. The limit values of temperature and mechanical loads on the epitaxial layers of *HgCdTe*, which should be taken into account in the technology of manufacturing detectors based on *HgCdTe* were established; low-temperature modes of formation of protective *CdTe* coatings were developed, the physical properties of which meet the requirements for passivation coatings; physical and chemical processes at the metal / *HgCdTe* interface were studied, which occur at the developed low-temperature modes of formation of two-layer ohmic contacts to *HgCdTe* epitaxial layers, with both electronic and hole type conductivity, whose ohmic behavior does not depend on the type of metal and that indicates about enrichment by carriers of the near-surface layer, due to the pinning of the Fermi level. Mid-wave and long-wave IR photodiodes of MCT with different topology were fabricated and their electrical and photoelectrical characteristics were investigated. The obtained experimental values of *HgCdTe* mid-wave and long-wave IR photodiodes detectivity indicate their functionality in modes close to those limited by background radiation.

Manufactured THz hot electron bolometers based on MCT were used to form an 8-element linear array for application in the sub-THz ($\nu \approx 140$ GHz) imaging system. The obtained THz images of the packaged items demonstrated satisfactory spectral resolution of the sub-THz imaging system.

The possibility of realization of two- or multiband detectors based on epitaxial layers of *HgCdTe* in the IR and THz spectral range was shown. Dual-band detectors based on MCT hot electron bolometers integrated with metal antennas, which have demonstrated a response to THz radiation (based on electron gas heating in a bipolar semiconductor) are also sensitive in the IR range (due to interband absorption) with a cutoff wavelength, which corresponds to chemical composition of *HgCdTe*.

For the first time, the possibility of selective filters implementation based on composite structures of *AlN*, *MgO* / polymeric film, blocking IR and transparent in the visible and THz spectral ranges was realized. This combination of *AlN* and *MgO* materials as coatings for thin flexible organic substrates for use as selective filters that block IR radiation is due to the spectral location of their Reststrahlen band in the IR spectral range (11 - 26 μm), and *AlN* has a high thermal conductivity, which is important for heat transfer to the periphery.

Key words: *HgCdTe* epitaxial layer, infrared, terahertz, photodiode, current-voltage characteristic, selective filter, *AlN* (*MgO*) / Mylar (Teflon).