

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

ГАЛОЧКІН ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 631.383.52, 631.383.53

**РОЗРОБКА РАДІАЦІЙНО-СТІЙКИХ ФОТОСТРУКТУР НА
ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКІВ A^2B^6 ТА $A_2^3B_3^6$**

05.27.01 – твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Чернівці – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики напівпровідників і наноструктур та кафедрі комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук
Ушенко Юрій Олександрович,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних приладів
Стахіра Павло Йосипович,
Національний університет «Львівська політехніка»

кандидат технічних наук,
заступник директора з наукової роботи
Рюхтін В'ячеслав Васильович,
акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро «Ритм», м. Чернівці

Захист відбудеться “___” грудня 2021 р. о 14.³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К76.051.09 при Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58004, м. Чернівці, вул. Сторожинецька, 101 (корпус 9, аудиторія 1).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (58002, м. Чернівці, вул. Лесі Українки, 23).

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: Ученому секретарю спецради К76.051.09, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58002.

Автореферат розіслано “___” листопада 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Г.І. Ластівка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нові тенденції у світовій ядерній промисловості та ситуація із необхідністю збільшення безпеки на атомних об'єктах ведуть до пошуку матеріалів, які здатні витримувати велику дозу X -, γ -, β - радіації. Тому значна увага приділяється твердим розчинам A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$, що володіють високою радіаційною стійкістю. Завдяки особливості своєї структури кристали $In_2Hg_3Te_6$ (МІТ), створені на основі In_2Te_3 , є одними з провідних з точки зору радіаційної стійкості. Стехіометричні вакансії (СВ) в цих кристалах призводять до того, що вони можуть тривалий час знаходитись під дією іонізуючого електромагнітного випромінювання.

Розробка фотодетекторів на напівпровідниках (НП) групи A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$ вимагає одержання вихідних матеріалів з високоякісними фізичними параметрами по відношенню до чистоти (малий рівень фонових домішок), кристалічній досконалості, стабільності характеристик впродовж усього терміну дії пристрою.

Крім радіаційно-стійких матеріалів необхідні прилади, які були б здатні працювати в радіаційних умовах. Відомі роботи по створенню мікропроцесорів на кремнії, що витримували декілька годин роботи в умовах помірної радіації з подальшим термічним відпалом для «лікування» кристалу. Ці недоліки можна усунути, якщо створити пасивні та активні прилади на основі тонкоплівкових структур, що здатні керувати електричним струмом.

В даній дисертаційній роботі представлені результати досліджень, які проведені для вирішення вище наведених проблем: вдосконалені технології вирощування кристалів A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$; виготовлені фотоструктури із заданими властивостями на їх основі; вдосконалені методики створення омичних контактів до цих структур; досліджені явища переносу заряду у фотоструктурах на базі напівпровідників $CdTe$, $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $In_2Hg_3Te_6$; проведені розрахунки, що пояснюють причину збільшенню кількості згенерованих пар електрон-дірка в тонкій структурі, яка знаходиться в сильному електричному полі; розроблені прилади, які працюють на структурах $A_2^3B_3^6$ і здатні витримувати високу дозу іонізованого електромагнітного випромінювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з робочими планами науково-дослідних робіт кафедри фізики напівпровідників і наноструктур Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за темами: «Фізичні основи технології створення низькорозмірних і об'ємних напівпровідникових структур з екстремальними параметрами, їх електричні властивості, фотоелектронні і оптичні ІЧ-прилади на них»

(номер державної реєстрації 0100U005493), “Розроблення технології і конструкції напівпровідникових фотодіодів для конкурентноспроможних вітчизняних прищезійних пристроїв вимірювання параметрів радіаційного випромінювання” (номер державної реєстрації 0107U007098); “Розроблення придатних для промислового виробництва напівпровідникових радіаційно-стійких фотоприймачів ІЧ-діапазону, Х-, гамма-, бета-, нейтронного випромінювання, матеріалів для них” (номер державної реєстрації 0107U007098) та наукових грантів, наданих Українським науково-технічним центром: № 1440 “Нові напівмагнітні напівпровідники: технологія, фізика, пристрої” (2000-2004), NN36 “Розробка космічної технології отримання матеріалів методом направленої кристалізації” (2004), Фондом цивільних досліджень і розвитку США: “Створення та досягнення ефективних оптикорелрактивних кристалів CdTe:Ge”.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка фотоелектричних пристроїв широкого спектрального діапазону на основі телуридів кадмію та індію, здатних витримувати високу дозу радіаційного випромінювання. Вивчення впливу лазерного опромінення на морфологію поверхні напівпровідникових зразків CdTe та твердих розчинів на його основі для створення поверхнево-бар’єрних фотоструктур. Вдосконалення методів вирощування структурно однорідних напівпровідникових монокристалів A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання:**

1. Провести аналіз властивостей радіаційно-стійких напівпровідників (A^2B^6 та $A^2B^6-A_2^3B_3^6$) та розроблених на їх основі фотопристроїв.
2. Розробити модель радіаційно-стійких фотодіодів Шотткі Cr/In₂Hg₃Te₆ та фототранзисторів на базі напівпровідника In₂Hg₃Te₆.
3. Вивчити вплив розподілу потенціалу на прикладі власного напівпровідника, що розташований у сильному електричному полі для створення підсилюючого пристрою електричних сигналів в умовах високої радіації.
4. Визначити оптимальні умови вирощування кристалів для одержання структурно досконалих монокристалів A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$, які будуть використані для виготовлення радіаційно-стійких ФДШ та фототранзисторів.
5. Дослідити властивості поверхні зразків A^2B^6 , що зазнали дії лазерного випромінювання.

Об’єктом дослідження є поверхнево-бар’єрні структури різного типу на основі НП групи A^2B^6 , що одержані лазерною перекристалізацією

поверхні. Кристали твердих розчинів A^2B^6 , $A^2B^6-A_2^3B_3^6$, одержані в різних технологічних умовах. Фотодіоди Шоттки на основі $In_2Hg_3Te_6$ з металевою плівкою хрому, фототранзистори на основі $In_2Hg_3Te_6$.

Предметом дослідження є вплив явища седиментації на структурну досконалість вихідних кристалів в процесі росту, дія лазерного опромінення на морфологію і склад епітаксійних шарів монокристалічних зразків A^2B^6 ($CdTe$, $Cd_{1-x}Zn_xTe$, $Cd_{1-x}Mn_xTe$), вплив радіаційного опромінення на параметри фотодіодів на базі $In_2Hg_3Te_6$.

Методи дослідження. Під час розв'язання поставлених завдань у роботі використовувались методи диференційно-термічного аналізу, мікроструктурного аналізу, електронної мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу, рентгено топографічного аналізу, виміри електропровідності, дослідження оптичних параметрів структур, виміри вольт-амперних характеристик, електронна Оже-спектроскопія, дослідження радіаційної стійкості матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведені математичні розрахунки, які пояснюють явище генерування додаткових електронно-діркових пар у зовнішньому електричному полі (коли товщина напівпровідника $L \approx l_d$ – довжині Дебая), що базується на ефекті Зенера. Кількість додатково згенерованих пар носіїв заряду при напрузі на пластині конденсатора $V_0=1$ В для власного напівпровідника складає $\Delta N/N_0 \approx 3 \cdot 10^4$. Розрахунки можуть бути використані для створення моделі підсилюючого елементу, який працює в умовах підвищеної радіації.
2. Вперше запропоновано використовувати Cr в якості металевої плівки в ФДШ на базі $In_2Hg_3Te_6$, що дозволяє підвищити радіаційну стійкість таких приладів при дії на них γ -опромінення дозами до $2 \cdot 10^8$ бер.
3. Вперше розроблена методика створення стабільних в часі омичних контактів до напівпровідників A^2B^6 із використанням попередньої підготовки підконтактних ділянок лазерною обробкою поверхні зразка з попередньо нанесеною плівкою міді.
4. Виконано теоретичні розрахунки та експериментально визначено залежність глибини проплаву поверхневого шару зразків $CdTe$ і $Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te$ від густини енергії лазерного випромінювання на $\lambda=0,694$ мкм. Оцінені значення густин енергій опромінення, при яких процес випаровування речовини стає істотним і впливає на глибину проплавленого шару.

Практичне значення роботи

1. Розроблені фотоструктури на базі $Cr/In_2Hg_3Te_6$: ФДШ, координатно-чутливий ФДШ та фототранзистор, які здатні працювати в умовах високих доз γ -опромінення $\sim 10^8$ бер. Вони чутливі у спектральному діапазоні $0,6 \div 1,7$ мкм, мають величину струмової монохроматичної чутливості

(0,43 А/Вт на довжині хвилі 1,55 мкм) та нелінійність енергетичної характеристики менше 2 %.

2. Виготовлені випрямляючі поверхнево-бар'єрні структури методом лазерної проплавки поверхні зразків CdTe та $Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te$ з коефіцієнтом випрямлення $k \approx 10^4$ та $k \approx 30$, відповідно. Структури характеризуються фоточутливістю в області спектру $0,5 \div 0,91$ мкм, висота потенціального бар'єру ϕ_0 для структур на CdTe дорівнює 0,9 еВ, а максимальна чутливість $S=0,38$ А/Вт.

3. Проведена оптимізація та теоретичні розрахунки процесів спрямованої кристалізації та зонної плавки в системі розплав-кристал в умовах дії гравітаційної сили різної величини та запропоновано технологічний метод і устаткування для вирощування радіально однорідних кристалів A^2B^6 (MnHgTe, MnHgZnTe), $A^2B^6-A^3_2B^6_3$ [$In_2Hg_3Te_6$].

4. Встановлені оптимальні технологічні умови вирощування текстурованих плівок $Cr_xHg_{1-x}Se$, $Cd_xHg_{1-x}Se$ методом лазерного напilenня мілісекундним неодимовим лазером.

5. Розрахована і експериментально підтверджена залежність глибини проплавленого шару поверхні зразків CdTe та $Cd_xMn_{1-x}Te$ при їх опроміненні імпульсами розфокусованого лазерного пучка рубінового лазера «ГОР-100 М» в діапазоні густин енергії $3 \div 30$ Дж/см².

Особистий внесок здобувача полягає в підборі, систематизації та аналізі літературних даних з фізико-хімічних властивостей та методів вирощування напівпровідникових сполук CdTe, твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x}Zn_xTe$ і $In_2Hg_3Te_6$. Автором разом з науковим керівником сформульовано науковий напрямок, мету роботи, постановку задач, вибрано об'єкт досліджень, методики досліджень, проведено аналіз та узагальнення отриманих результатів, здійснена їх презентація та публікація. В працях, виконаних у співавторстві [1,2] дисертант виконував комп'ютерне моделювання процесів генерації додаткових електронно-діркових пар у напівпровіднику, що знаходиться в сильному електричному полі. В працях [3-5,7,11,13,17-23, 27] – виконував лазерну обробку поверхні напівпровідників з метою одержання поверхнево-бар'єрних структур на напівпровідниках A^2B^6 , проводив дослідження компонентного складу опроміненої поверхні, систематизацію та аналіз отриманих експериментальних результатів. В працях [6, 9, 14] здобувач приймав участь в проведенні синтезу та вирощування вихідних сполук та твердих розчинів, проведенні електрофізичних та фізико-хімічних досліджень (диференційно-термічного аналізу, мікроструктурного аналізу, вимірювання електрофізичних характеристик). В працях [10, 12, 15, 16, 24-26, 28-30] брав участь у напilenні плівок Cr на структури $In_2Hg_3Te_6$, виготовленні конструкцій ФДШ, дослідженні електричних і спектральних характеристик одержаних структур.

Апробація роботи. Основні результати досліджень, викладених у дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на конференціях і семінарах: ІХ міжнародна конференція Фізика і технологія тонких плівок (ФТТП-ІХ) (Івано-Франківськ, Україна, 2003); Fourth international young scientist conference Problems of optical and High Technology Material science SPO, (Kyiv, Ukraine, 2003.); ІІ Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (Чернівці-Вижниця, Україна, 2004); E-MRS Conference (Stroudsburg, France, 2005); Х Міжнародна конференція “Фізика і технологія тонких плівок” (ФТТП-Х) (Івано-Франківськ, Україна, 2005); ІV міжнародна науково-практична конференція “Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (МЕТІТ-4) (Кременчук, Україна, 2010); ХІІІ International conference “Physics and technology of thin films and nanosystems” (ICPTTFN-ХІІІ) (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2011); ХV international conference on physics and technology of thin films and nanosystems (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2015); Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2016" (Київ, Україна, 2016); Матеріали 12-ї міжнародної науково-практичної конференції, «Бъдещите изследвания» (Софія, Болгарія, 2016); 20-й Ювілейний міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті» (Харків, Україна, 2016); Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, Україна, 2016), V Всеукраїнська науково-практична конференція Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2020, Дніпро, Україна, 2020).

Публікації. Результати роботи викладені у 30 друкованих працях, з них – 13 у наукових журналах та збірниках наукових праць (1 праця в журналі, який індексується наукометричною базою Scopus), 3 патенти на корисні моделі та 14 у матеріалах і тезах наукових конференцій.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, бібліографічного списку використаних джерел та 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 146 сторінок, включаючи 39 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел містить 126 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовані мета та завдання дисертаційної роботи, висвітлено її наукове і практичне значення, подано інформацію про апробацію роботи, публікації автора.

Перший розділ присвячений огляду сучасного стану радіаційностійких матеріалів та елементів для твердотільної

фотоелектроніки.

У розділі наведені основні фізико-хімічні параметри досліджуваних матеріалів (CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$) та $\text{A}^2\text{B}^6\text{-A}^3\text{B}^6$ ($\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$). Описано вплив лазерного випромінювання на морфологію поверхні зразків напівпровідника A^2B^6 (CdTe) та твердих розчинів на його основі ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$). Проаналізовані методи створення діодних структур на базі напівпровідника $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ та основні параметри цих фотоприймачів, які працюють в ближній інфра-червоній ділянці спектру.

Другий розділ присвячений розгляду модифікованої технології вирощування та аналізу фізико-хімічних проблем синтезу структурно досконалих напівпровідникових кристалів A_2^3B_3^6 [6, 9, 14], розробці статичної вакуумної системи для лазерного наплення текстурованих напівпровідникових плівок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ та $\text{Cr}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ [5, 17, 20]. У розділі описана технологія одержання поверхнево-бар'єрних структур методом лазерної перекристалізації поверхні напівпровідникових зразків CdTe , $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$ рубіновим лазером ($\lambda=0,694$ мкм) [4, 11, 19] та створення омичних контактів до цих структур [3].

Показано вплив різних факторів на характер кристалізаційних (ростових) процесів, наприклад, явища седиментації на процеси вирощування однорідних кристалів спрямованою кристалізацією та зонною плавкою. Це явище особливо проявляється при вирощуванні кристалів твердих розчинів на основі HgTe з іншими сполуками A^2B^6 та A_2^3B_3^6 , в яких значно відрізняються атомні ваги компонентів [6].

Для виведення рівнянь масообміну в системі кристал-розплав з врахуванням седиментації, можна застосувати вираз для потоку речовини [6]:

$$J_i = C_i S_i g - D_i \text{grad} C_i, \quad \text{де } i=2,3 \dots N \quad (1)$$

де N - кількість видів часток; g - прискорення гравітаційної сили; S_i - коефіцієнт седиментації, що показує, яка частина часток i -типу від початкової концентрації C_i проходить за одиницю часу через одиничний перетин при одиничному прискоренні масової сили; D_i - коефіцієнт дифузії в розплаві.

У бінарному розчині $D_i=D$ і можна записати:

$$J = C \cdot S \cdot g - D \cdot \text{grad} C. \quad (2)$$

Підставляючи (2) в рівняння для балансу маси, одержуємо:

$$\partial C / \partial t = -\text{div}(C \cdot S \cdot g - D \text{grad} C) - \text{div}(C \cdot W), \quad (3)$$

де W - середня об'ємна швидкість рідини. Вважаючи конвекцію слабкою, що відповідає майже дифузійному режиму кристалізації, (3) переписеться у вигляді:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - U_f \frac{\partial C}{\partial x} = S \cdot g \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \varphi - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \varphi \right) + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

де U_f - швидкість руху фронту кристалізації, φ - кут між вектором мікроприскорення і фронтом кристалізації.

Для отримання чисельних результатів диференціальне рівняння (4) апроксимувалося в кінцево-різницевої схемі. Задача Коші з граничними умовами другого роду вирішувалася методом прогонки, основні розрахунки проводилися по неявній симетричній схемі. В результаті отримане рівняння (5):

$$S \cdot g \cdot C \sin \varphi - D \partial C / \partial x = U_f (C - C_0). \quad (5)$$

На рис. 1, 2 представлені залежності розподілу концентрації домішки по діаметру зразка у випадку відсутності седиментації та її наявності при вирощуванні кристалів методами спрямованої кристалізації (СК) та зонною плавкою (ЗП).

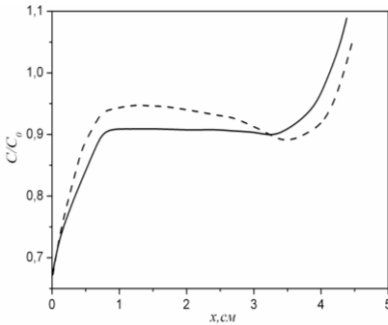


Рис.1. Залежність $C(x)$ для $k_0=0,65$, $D_0=10^{-4}$ см²/с, $S=10^{-8}$ с, $U_f=4 \cdot 10^{-4}$ см/с. Суцільна лінія – відсутність седиментації. Ампула вертикальна, СК

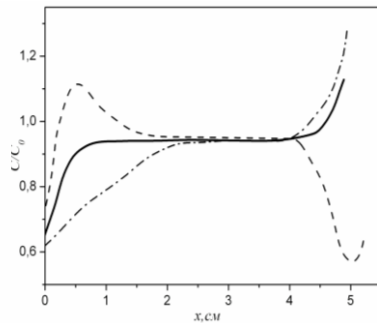


Рис. 2. Залежність $C(x)$ для $k_0=0,65$, $D_0=10^{-4}$ см²/с, $S=10^{-7}$ с, $U_f=4 \cdot 10^{-4}$ см/с, $L=2$ см. Суцільна лінія – відсутність седиментації. Ампула вертикальна, ЗП

Кристали, отримані методом ЗП, мають значно кращі характеристики, ніж кристали, отримані методом СК, оскільки в невеликій по висоті виділеній ділянці осідає і незначна кількість важкого компонента. Таким методом отримані радіально однорідні кристали твердих розчинів із ртуттю різних складів, в яких значно відрізняються атомні ваги компонентів, зокрема $MnHgTe$, $MnHgZnTe$, $In_2Hg_3Te_6$ як базові для фотоприймачів в широкій області ІЧ-спектру ($\Delta\lambda=0,6\div 12$ мкм) та детекторів іонізуючого випромінювання. Радіаційно-стійкі кристали $In_2Hg_3Te_6$ придатні для створення на них радіаційно-стійких фотоприймачів ІЧ випромінювання у вигляді діодів Шотткі (ФДШ) та детекторів X -, β -, γ - випромінювання в широких межах доз [24, 25].

Створення поверхнево-бар'єрних фотоструктур методом лазерної перекристалізації (рис. 3) проводилось на зразках з кристалів CdTe та $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0,2$) n -типу провідності, вирощених методом Бріджмена. Лазерна проплавка поверхні зразків проводилась на лазерній установці ГОР-100М одиночними імпульсами на довжині хвилі $\lambda=0,694$ мкм, тривалість імпульсу складає 1,2 мс. Опромінення проводилось в діапазоні густин енергій $3 \div 10$ Дж/см² [4, 13, 21, 23].

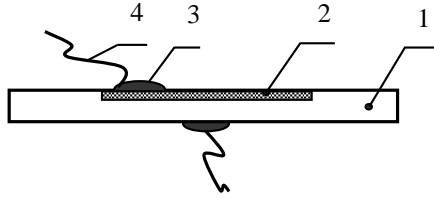


Рис. 3. Конструкція фотодіодної структури на CdTe:
1 – підкладка CdTe n -типу провідності; 2 – проплавлений шар p -типу провідності; 3 – омічний контакт з In; 4 – електровивід з Cu

Механізм утворення бар'єрних структур полягає у збідненні приповерхневого шару легко летючим Cd, з наступним утворенням кластерів Te. Як відомо, вакансії Cd є акцепторами для CdTe та $Cd_{1-x}Mn_xTe$, та ведуть до інверсії провідності проплавленого лазерним випромінюванням епітаксійного шару з n - на p -тип.

Як показали результати наших досліджень, для підвищення адгезійних властивостей контактних металевих шарів діодних структур на основі p -CdTe або p - $Cd_{1-x}Mn_xTe$ процес іскрової обробки доцільно замінити лазерною. Її особливість полягає в тому, що виникнення вакансій кадмію в цьому випадку не призводить до інверсії провідності, а лише видаляє шар окислу. При цьому рекомендується проводити лазерну проплавку разом із перехідною плівкою міді, яка попередньо наноситься термічним напilenням на поверхню зразків p -CdTe та p - $Cd_{1-x}Mn_xTe$ [3].

Третій розділ присвячений дослідженню основних фізико-технічних характеристик виготовлених структур на основі напівпровідників A^2B^6 та $A^2B^6-A^3B^6$.

Електронोगрами плівок $Cr_xHg_{1-x}Se$ та $Cd_xHg_{1-x}Se$ представлено на рис. 4. З аналізу електронोगрам встановлено [5], що плівки $Cr_{0,1}Hg_{0,9}Se$ спочатку слабо дисперсні (рис. 4, а), а з ростом температури підкладки переходять в текстуровані (рис 4, с). Плівки $Cr_{0,2}Hg_{0,8}Se$ незалежно від температури підкладки – неоднорідні і багатозфазні (рис. 4, d). Плівки $Cd_xHg_{1-x}Se$ вирощувались для дослідження кристалічних властивостей в таких же умовах, як і $Cr_xHg_{1-x}Se$. З електронोगрам видно, що плівки $Cd_{0,25}Hg_{0,75}Se$ текстуровані (рис 4, е), а плівки $Cd_{0,6}Hg_{0,4}Se$ – полікристалічні з

включенням текстур (рис 4, f).

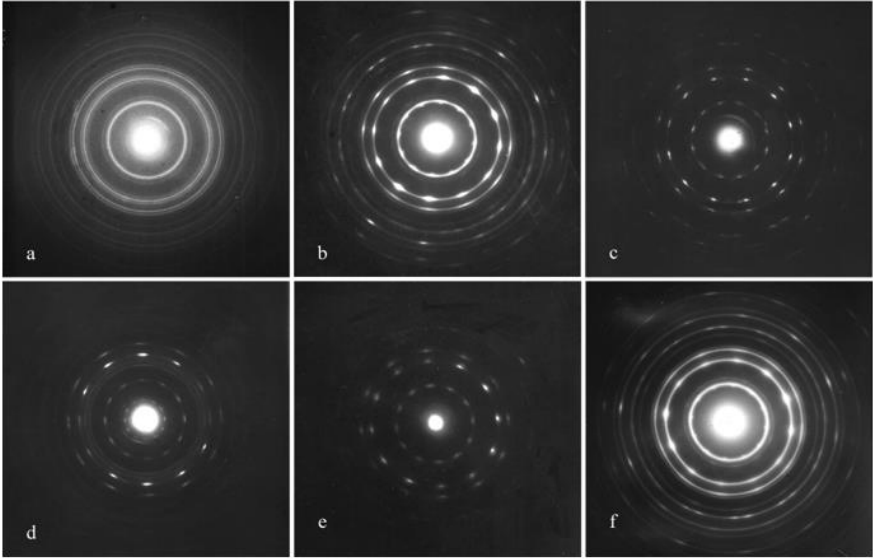


Рис. 4. Електроннограми плівок, вирощених при різних температурах підкладки: a, b, c – $\text{Cr}_{0.1}\text{Hg}_{0.9}\text{Se}$, $T_{\text{підкл.}}=360$ К, 380 К, 390 К, відповідно; d – $\text{Cr}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Se}$, $T_{\text{підкл.}}=390$ К; e – $\text{Cd}_{0.25}\text{Hg}_{0.75}\text{Se}$, $T_{\text{підкл.}}=390$ К; f – $\text{Cd}_{0.6}\text{Hg}_{0.4}\text{Se}$, $T_{\text{підкл.}}=390$ К

Досліджено вплив лазерного випромінювання на властивості напівпровідникових монокристалів CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,02 \leq x \leq 0,5$), $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x=0,01 \leq x \leq 0,12$) [7, 18, 22]. В якості джерела лазерного випромінювання використовувалась лазерна установка «ГОР-100 М».

В залежності від густини енергії опромінення ($0,3 \div 17$ Дж/см²) в структурі поверхневого шару кристалу спостерігаються зміни [3, 18, 19]: її покращення в результаті термічної релаксації мікронапруг; розвитку попередньо існуючих лінійних та кластерних дефектів; проплавка і послідовна рекристалізація впорядкованого епітаксійного шару.

Морфологію поверхні, склад і розподіл хімічних елементів в шарах CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ і $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-100У (рис. 5, 6) [3].

Нерівність гетерограниці 3 (рис. 5) пов'язана з інтерференцією відбитих від поверхні лазерних променів в певних областях матриці і утворення просторових ділянок з чергуванням більшої і меншої густини енергії. Біля границі шар-підкладка спостерігаються орієнтовані мікротріщини, утворенні в місцях накопичення дефектів (дислокацій), де виникають великі напруження, викликані дією лазерного випромінювання.

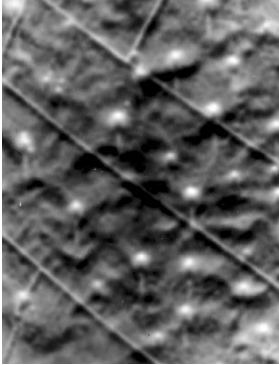


Рис. 5. Мікросвітлина в РЕМ опроміненої поверхні $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, ($\times 260$)

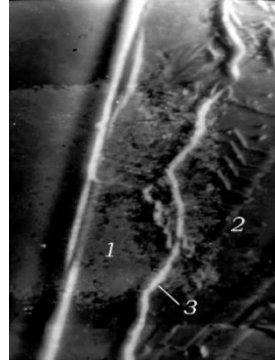


Рис. 6. Мікросвітлина в РЕМ поперечного сколу зразка $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$:
1 – проплавлений шар; 2 – підкладка;
3 – границя проплаву ($\times 3500$)

Оскільки ширина забороненої зони $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$ більша за CdTe , то швидкість генерації нерівноважних електронно-діркових пар буде інтенсивніша в CdTe і, відповідно, коефіцієнт поглинання CdTe на $\lambda=0,694$ мкм буде більшим. Тому в зразках CdTe основна енергія лазерного випромінювання поглинається у тоншому, ніж в $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$ поверхневому шарі, що призведе до швидшого досягнення поверхнею зразків CdTe критичних значень температури і більш інтенсивного випаровування. Це зменшить глибину проплавлення при одній і тій самій густині енергії.

На рис. 7 представлені типові вольт-амперні характеристики (при

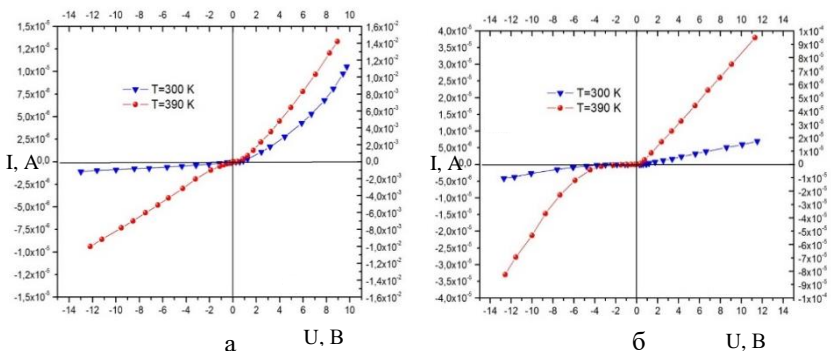


Рис.7. Вольт-амперні характеристики поверхнево-бар'єрних структур: а – на основі CdTe ; б – на $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$

$T=300$ К та $T=390$ К поверхнево-бар'єрних структур CdTe (рис. 7, а) та $Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te$ (рис. 7, б) площею $S=1,5$ мм², що утворені лазерною перекристалізацією поверхні. Коефіцієнт випрямлення складає $k \approx 10^4$ та $k \approx 30$ та для CdTe та $Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te$, відповідно [11, 27].

З аналізу прямих гілок ВАХ у напівлогарифмічних координатах $\ln(I)=f(U)$ (рис. 8) структур основи CdTe встановлено, що мають місце два механізми переносу заряду, зміна яких відбувається при напрузі $U \approx 1,2$ В. Першим механізмом є генераційно-рекомбінаційний, а при напругах > 1 В проявляється інжекційний механізм. В умовах високого рівня інжекції рекомбінаційні центри знаходяться приблизно посередині між рівнями E_{fp} та E_{fn} , а коефіцієнт n в класичному рівнянні Шокклі дорівнює 2.

З даних рис. 9 встановлено, що величина послідовного опору R_s структур знаходиться в інтервалі $8,4 \cdot 10^2 \div 15,9 \cdot 10^2$ Ом в залежності від температури.

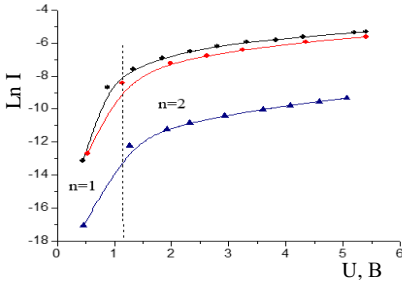


Рис. 8. Типові прямі гілки вольт-амперних характеристик бар'єрних структур на основі CdTe

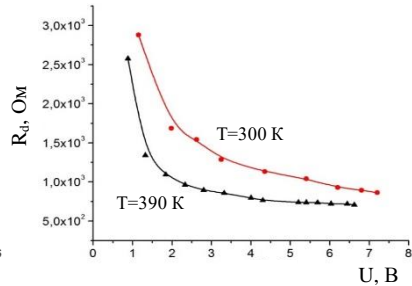


Рис.9. Диференційний опір R_d бар'єрних структур на основі CdTe

Дослідження фотоелектричних характеристик фотодіодів виконувалися на спектрофотометрі СФ-46. При цьому виявлено, що структури на основі CdTe володіють двома максимумами фотовідгуку, які відповідають значенням енергій 1,5 еВ та 1,44 еВ. У випадку структур на $Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te$ спостерігаються 3 максимуми fotocутливості з енергіями – 2,31 еВ, 2,01 еВ та 1,77 еВ (рис. 10) [13].

Додаткові піки, які не відповідають енергіям власних переходів цих матеріалів, в цьому випадку зміщено у короткохвильову ділянку спектру. Їх поява пояснюється утворенням гексагональних фаз CdTe та MnTe обумовлених швидкою рекристалізацією поверхневого шару зразків після дії лазерного опромінення.

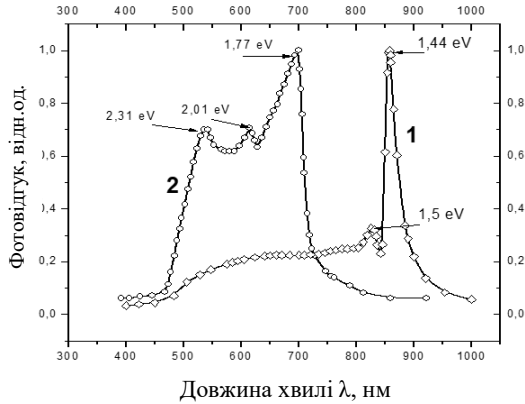


Рис.10. Фотоелектричні характеристики поверхнево-бар'єрних структур: 1– CdTe, 2 – Cd_{0,8}Mn_{0,2}Te

Четвертий розділ присвячений розробці фотоприймачів на основі напівпровідників $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ та дослідження їх характеристик. Запропонована модель транзистора на основі тонких напівпровідникових плівок, що розташовані в сильному електричному полі (ефект Зенера).

Моделювання поведінки власного НП в зовнішньому полі дає можливість проаналізувати ефективність додаткового генерування вільних носіїв полем і оцінити можливість використання вказаного ефекту для створення аналога транзистора на власних радіаційно-стійких НП [1,2].

Вимірювання енергетичних характеристик оптичного випромінювання у діапазоні спектральної чутливості фотодіодів з $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ ($0,6 \div 1,7$ мкм) забезпечують фотодіоди, створені на основі германію (Ge), кремнію (Si), потрібної сполуки InGaAs тощо. Але щодо радіаційної стійкості, то вони суттєво поступаються фотодіодам на основі кристалів $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, які володіють чутливістю у спектральному діапазоні $0,6 \div 1,7$ мкм, при чому максимум спектральної характеристики чутливості припадає на діапазон довжин хвиль $1,4 \div 1,6$ мкм. Фотодіоди, створені на основі згаданого матеріалу, практично перекривають спектральні діапазони чутливості фотодіодів на основі кремнію ($0,4 \div 1,1$ мкм) та германію ($0,5 \div 1,8$ мкм).

Створена конструкція і технологія фотодіодів Шотткі (ФДШ) (рис. 11) на основі монокристалічної підкладки n- $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ з бар'єрним шаром з хрому площею 100 мм². Такі ФДШ придатні для використання в якості робочого еталону при калібруванні аналогічних фотодіодів, що володіють радіаційною стійкістю [8, 10, 15, 28].

Аналіз результатів вимірів оптичних характеристик створених ФДШ на основі $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ показав (рис. 12), що спектральна чутливість S_λ знаходиться в діапазоні $0,6 \div 1,7$ мкм, струмова монохроматична чутливість

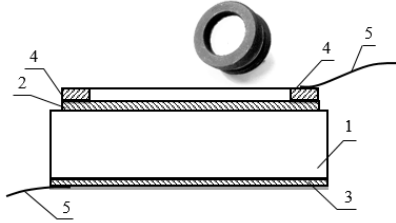


Рис.11. Фотодіод Шотткі на основі n - $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$:
1 – підложка з n - $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, 2 –бар'єрний шар Cr, 3 – омічний шар In, 4 – перехідний шар ніхрому, 5 – електровводи з ніхрому

на довжині хвилі 1,06 мкм складає 0,33 А/Вт, нелінійність енергетичної характеристики не перевищує 2% [12]. Максимальне значення монохроматичної чутливості $S_{\lambda_{max}}=0,43$ А/Вт визначається на довжині хвилі $\lambda=1,55$ мкм.

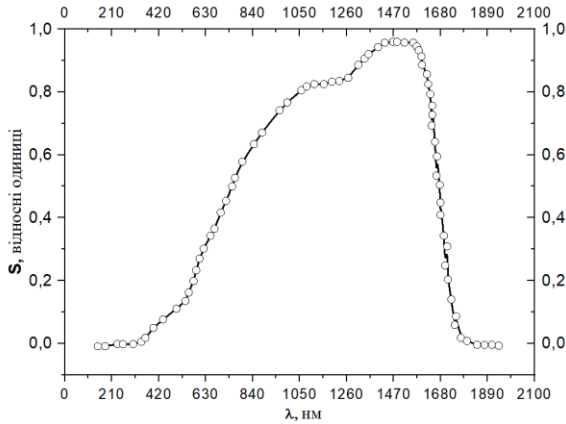


Рис.12. Відносна спектральна характеристика чутливості фотодіоду Шотткі на основі Cr/ $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

З результатів дослідження вольт-амперних характеристик цих структур (рис.13) можна зробити висновок, що експоненціальна залежність протікання прямого струму можна описати рівнянням:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{nkT}} - 1 \right), \quad (6)$$

де I_s – струм насичення, який визначається рівнянням:

$$I_s = APTe^{\frac{\phi_b}{kT}} \quad (7)$$

A – константа Річардсона, P – площа бар'єрного переходу, ϕ_b – висота потенційного бар'єру.

При цьому темновий струм знаходиться в діапазоні 1÷4 мкА при зворотному зміщенні 1 В [10].

Екстраполяція напівлогарифмічної залежності $\ln(I)=f(U)$ дала можливість визначити, як величину струму насичення I_s , так і значення ϕ_b , яке в нашому випадку складає 0,41 еВ (при $A=120$ і $P=0,25 \cdot \pi d^2=1,13$ мм²). Оскільки ширина забороненої зони $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ складає 0,7 еВ, а висота потенційного бар'єру ФДШ майже удвічі менша, то можна стверджувати про якісний контакт "метал-напівпровідник" в створеному пристрої.

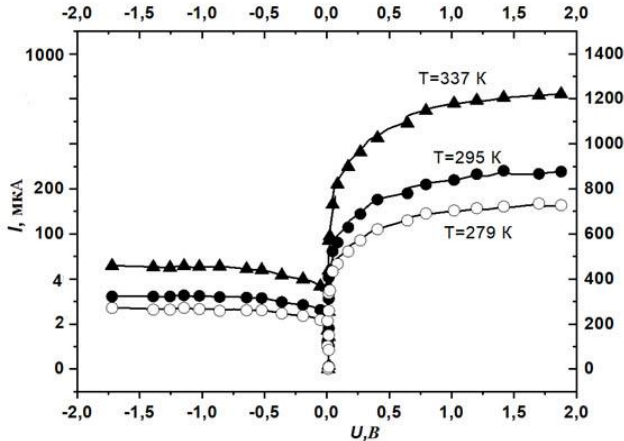


Рис. 13. Вольт-амперні характеристики ФДШ $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Випробування радіаційної стійкості партії створених структур ФДШ проводилися на стандартних установках, що містять ізотоп Co-60 – доза опромінення $D \sim 10^7 \div 2 \cdot 10^8$ бер, а у випадку β -опромінення ГВГ-11А (доза опромінення $D \sim 10^7$ бер). Погіршення параметрів ФДШ при цих дозах опромінення практично не спостерігалось. При подальшому збільшенні дози γ -випромінення до значень $5 \cdot 10^8$ бер фіксується погіршення параметрів ФДШ (максимальна спектральна чутливість $S_{\lambda\text{max}}$ падає до значення 0,38 А/Вт, а зворотний темновий струм зростає до 5 мкА). Попередній аналіз показав, що спостережувані зміни параметрів опромінених пристроїв викликані, в першу чергу, аморфізацією омичного шару In .

Конструкція координатно-чутливого радіаційно-стійкого фотодіода Шотткі (ФДШ) створена на основі напівпровідника $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ n-типу провідності [26, 30], наведена на рис. 14.

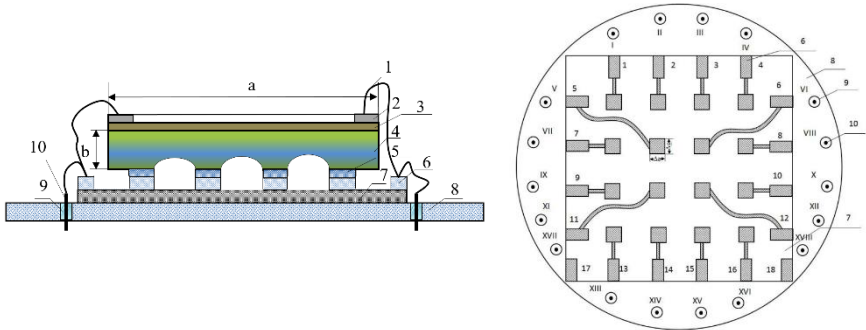


Рис. 14. Конструкція фотодіода Шотткі (1 – електроди, 2 – контакти, 3 – шар Cr, 4 – монокристалічна пластина $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, 5 – омічні контакти, 6 – струмопровідний шар, 7 – керамічна пластина з AlN ; 8 – основа корпусу, 9 – склопереходи, 10 – електровиводи)

Результати вимірів показали, що спектральна чутливість цих ФДШ знаходиться в діапазоні довжин хвиль $0,6 \div 1,7$ мкм, а чутливість одного елементу ФДШ на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм при цьому складала $S_{\lambda} = 0,36$ А/Вт. Величина оберненого струму $I_{об.т.}$ в темновому режимі дорівнювала 8-10 мкА. Розкид цих параметрів по площі ФДШ не перевищував 5%.

Розроблений фототранзистор (ФТ) на основі напівпровідникового шару $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ (рис. 15), розміщений між обкладинками конденсатора, а сама обкладинка конденсатора та діелектричний прошарок зі сторони випромінювання, що реєструє ФТ, виконані з оптично-прозорих у заданому діапазоні довжин хвиль електропровідного (Cr) та діелектричного (SiC) матеріалів [16, 29].

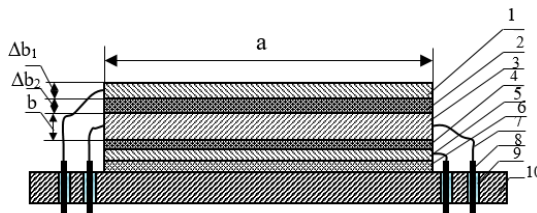


Рис. 15. Конструкція ФТ на $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ (1 – електропровідний шар Cr, 2 – діелектричний прошарок з SiC , 3 – шар $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, 4 – діелектричний прошарок з SiC , 5 – шар Au (обкладинка конденсатора), 6 – пластина з AlN , 7 – провідники з Au; 8 – електровиводи, 9 – склопереходи, 10 – металевий корпус)

Коли випромінювання густиною q_0 падає на верхню грань ФТ, фотони з енергією $h\nu$ проходять через оптично-прозорі шари 1, 2 та поглинаються об'ємом напівпровідникового шару 3. Це призводить до генерації додаткових електронно-діркових пар, які змінюють об'ємний розподіл його електричного поля.

Електричне поле, яке утворене обкладинками конденсатора 1 та 5 спричиняє генерацію рівноважних електронно-діркових пар в шарі з $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ (ефект Зенера). Оскільки товщина шару 3 обрана порядку $b \approx l_d$, то дія екрануючого поля Дебая нівелюється електричним полем конденсатора. Проведені розрахунки показали, що при напрузі на обкладинках конденсатора $\Delta V = 1\text{В}$ в об'ємі шару 3 при $T=300\text{ К}$ генерується $n=4,2 \cdot 10^4$ додаткових пар носіїв заряду. Тобто з'являється можливість керування провідністю шару 3, змінюючи різницю потенціалів ΔV на обкладинках 1 та 5 конденсатора.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Одержані результати розрахунку розподілу домішки вздовж кристалів, отриманих методом спрямованої кристалізації (СК) та зонної плавки (ЗП) при відсутності та наявності седиментації.
2. Розроблено метод синтезу та вирощування радіально однорідних кристалів напівпровідникових матеріалів MnHgTe , MnHgZnTe , $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ модифікованою зонною плавкою, яка проводиться в ампулах, що рухаються поступально під кутом до вертикалі ($\alpha \sim 45^\circ$) вздовж нагрівників з одночасним обертанням навколо своєї осі. При цих умовах забезпечується висока однорідність складу та температури розплаву по всьому його об'ємі, досягається плоский фронт кристалізації, послаблюються умови концентраційного переохолодження на ньому. Це дає змогу створювати приймачі, що працюють в діапазоні $\lambda = 0,6 \div 1,7$ мкм зі стабільними в часі фізичними властивостями, які також є стійкими до іонізуючого випромінювання.
3. Розроблено конструкцію статичної вакуумної системи, яка дозволяє в умовах високого вакууму ($p \sim 10^{-8}$ тор) одержувати якісні тонкі плівки напівпровідникових матеріалів $\text{Cr}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ і $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$. Визначено, що при температурі підкладки $\leq 360\text{ К}$ плівки мали полікристалічну структуру, а при температурі підкладки $> 360\text{ К}$ - текстуровані, крупнозернисті структури.
4. Виготовлено поверхнево-бар'єрні структури методом обробки поверхні зразків CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{T}$ одиночними імпульсами рубінового лазера ($\lambda=0,694$ мкм), що призводить до створення монокристалічних шарів з інверсним типом провідності. Одержані структури

характеризуються фоточутливістю в області спектру $0,5 \div 0,91$ мкм, висота потенціального бар'єру φ_0 для структур на CdTe дорівнює 0,9 еВ, а протікання струму характеризується 2-ма механізмами переносу заряду – генераційно-рекомбінаційним та інжекційним, їх коефіцієнт випрямлення складає $k \approx 10^4$. Спектральна залежність фотовідгуку структур на основі CdTe та $Cd_{1-x}Mn_xTe$ має додаткові максимуми ($E=1,5$ еВ – для CdTe; $E_1=2,01$ еВ, $E_2=2,31$ еВ – для $Cd_{1-x}Mn_xTe$), які зміщені в короткохвильову область і не пов'язані із власними переходами. Поява додаткових піків пояснюється формуванням гексагональної структури в цих матеріалах при швидкій рекристалізації розплавленого шару).

5. Проведено рентгенографічні, оптичні дослідження та диференційно-термічний аналіз сплавів $In_2Hg_3Te_6$. Питомий опір ρ цього матеріалу і концентрації носіїв заряду p та n при кімнатній температурі відповідно рівні $(1 \div 6) \cdot 10^4$ Ом·см та $(3 \div 5) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Рухливості носіїв заряду μ_p і μ_n знаходяться в діапазоні від $(40 \div 50)$ до $(200 \div 500)$ см²·В⁻¹·с⁻¹, відповідно, і слабо залежать від температури. Визначено ширину забороненої зони вирощених кристалів $In_2Hg_3Te_6$, яка при 300 К рівна $0,72 \pm 0,02$ еВ.

6. Розроблена методика створення стабільних в часі омичних контактів до напівпровідників CdTe, CdMnTe із використанням попередньої підготовки підконтактних ділянок лазерною обробкою поверхні зразка з попередньо нанесеною плівкою міді.

7. Проведені математичні розрахунки, які пояснюють явище генерування додаткових електронно-діркових пар в зовнішньому електричному полі (коли товщина напівпровідника $L \approx l_d$ – довжині Дебая), яке використовує ефект Зенера. Кількість додатково згенерованих пар носіїв заряду при напрузі на пластинах конденсатора $V_0 = 1$ В для власного напівпровідника складає $\Delta N/N_0 \approx 3 \cdot 10^4$. Розрахунки використані для створення моделі підсилюючого елементу, який працює в умовах підвищеної радіації.

8. Розроблений ФДШ на основі монокристалічної підкладки $n-In_2Hg_3Te_6$ з бар'єрним шаром з Сг площею 100 мм² для використання в якості робочого еталону при калібрування аналогічних фотодіодів з підвищеною радіаційною стійкістю. ФДШ чутливий у спектральному діапазоні $0,6 \div 1,7$ мкм, має величину струмової монохроматичної чутливості 0,43 А/Вт (на довжині хвилі 1,55 мкм), нелінійність енергетичної характеристики менше 2 % і динамічний діапазон, який складає не менше 8 порядків. Темновий струм таких ФДШ знаходиться в діапазоні $1 \div 4$ мкА при зворотному зміщенні 1 В, а висота потенціального бар'єру φ_b , дорівнює 0,41 еВ. Виготовлені ФДШ практично не змінювали свої параметри ($S_{\lambda_{max}}$, I_m) при їх опроміненні γ -дозами $\sim 10^7 \div 2 \cdot 10^8$ бер, а у разі β -опромінення $\sim 10^7$ бер). При подальшому збільшенні дози γ -опромінення до значень $5 \cdot 10^8$ бер

фіксується погіршення параметрів ФДШ (максимальна спектральна чутливість $S_{\text{дmax}}$ падає до значення 0,38 А/Вт, а зворотний темновий струм зростає до 5 мкА).

9. Розроблений координатно-чутливий ФДШ на базі $\text{Сг}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. Випробування радіаційної стійкості таких ФДШ показали, що вони витримують дію γ -опромінення дозою 10^8 бер. Їх чутливість при цьому знижується на 4-6%,

10. Розроблена модель фототранзистора на радіаційно-стійкому $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ в якому керування струмом здійснюється електричним полем пластин конденсатора, які утворені металевими шарами Сг та Au. Транзистор може бути успішно використаний для підсилення слабких сигналів в умовах високої радіації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Королюк С. Л., Королюк С.С., Раренко И. М., Тарко О.Л., Галочкин А. В. Собственные полупроводники группы $A_2^3B_3^6$ как перспективные материалы для радиационно стойкой электроники. *Технологии и конструирование в электронной аппаратуре*. 2001. №6. С. 3–5.
2. Королюк С. Л., Раренко І. М., Королюк С.С., Галочкин О.В. Генерування електронно-діркових пар у власному напівпровіднику в зовнішньому електричному полі. *Український Фізичний Журнал*. 2003. т.48. №1. С. 69–74.
3. Галочкин О.В, Дремлюженко С.Г., Захарук Я.Д., Раренко А.І., Рибак Є.В., Стребежев В.М. Дослідження поверхні і границі розділу структур, сформованих на $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ і $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ лазерною проплавкою. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2003. Т.4. №4. С. 669–672.
4. Галочкин О.В., Рижук М.М., Грицюк Б.М., Захарук З.І., Стребежев В.М., Раренко І.М. Бар'єрні структури на CdTe та $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$, отримані лазерною перекристалізацією поверхні. *Науковий вісник Чернівецького університету*. 2005. Вип. 268. Фізика.Електроніка. С. 54–56.
5. Savchuk A.I., Gritsyuk V.M., Galochkin O.V., Ryzhuk M.M., Paranchich S.Y. Electrical, photoelectrical properties and crystal structure of A^2B^6 films, grown by laser sputtering. *Thin Solid Films*. 2005. V. 511-512. Pp. 478–482.
6. Галочкин О.В., Годованюк В.М., Захарук З.І., Колісник М.Г., Раренко Г.І., Раренко І.М., Русковолошин М.М., Раранський М.Д. Вплив гравітаційної конвекції та седиментації в розплавах багатокомпонентних напівпровідників при вирощуванні їх кристалів спрямованою кристалізацією, зонною плавкою. *Нові технології*. 2010. №1 (27). С. 10–15.
7. Галочкин О.В., Жихаревич В.М., Раренко Г.І., Стребежев В.М., Захарук Я.Д., Дремлюженко С.Г. Вплив потужного мілісекундного

- лазерного випромінювання на глибину проплавленого шару в кристалах CdTe та $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2012. Т. 13. №1. С. 185–190.
8. Ascheulov A. A., Galochkin A. V., Danalakiy O.G., Romanyuk I.S., Dremlyuzhenko S.G. Radiation resistance Schottky photodiodes. *Nauka i studia*. 2016. 23 (154). P.34–39.
 9. Галочкін О.В., Дремлюженко С.Г., Захарук З.І., Склярчук В.М., Цалий В.З., Ашеулов А.А. Одержання однорідних кристалів ртутно-індієвого телуриду. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т.17. №1. С. 129–133.
 10. Ашеулов А.А., Галочкин А.В., Романюк І.С., Дремлюженко С.Г. Радиационно стойкая фотоструктура на основе $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ для диода Шоттки. *Технологии и конструирование в электронной аппаратуре*. 2016. № 2-3. С. 3–7.
 11. Галочкин А. В., Ашеулов А. А., Захарук З. И., Дремлюженко С. Г., Романюк И. С.. Фотодиодные структуры на основе CdTe и CdMnTe. *Прикладная физика*. 2017. № 3. С. 65–71.
 12. Ашеулов А., Романюк І., Добровольський Ю., Дремлюженко С., Галочкін О. Фотодіод Шоттки на основі $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. *Метрологія та прилади*. 2017. №2. С. 35–39.
 13. Ushenko Yu. A., Dovgun A.Ya., Yasinsky V.K., VDvorzhak.V., Tomka Yu. Ya, Kovalchuk M.L., Galochkin O.V., Yatsko O.M., Gantjuk V.K. *Information technologies Part 2. Automatic regulation, Mathematical simulation and Neural Networks: implementation with Tensorflow. Monography*. LAP Lambert Academic Publishers. 2019. 230 p.
 14. Галочкін О.В., Дремлюженко С.Г., Захарук З.І., Колісник М.Г., Ашеулов А.А. Процес отримання монокристалів $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. *Патент України на корисну модель №105367*, бюлетень №5 від 10.03.2016.
 15. Ашеулов А. А., Галочкін О.В., Добровольський Ю.Г., Романюк І.І. Фотодіод Шоттки на основі $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. *Патент України на корисну модель №111231*, бюлетень №21 від 10.11.2016.
 16. Прядко В.В., Ашеулов А.А., Галочкин О.В., Раренко Г.І., Романюк І.С. Фототранзистор. *Патент України на корисну модель №111228*, бюлетень №21 від 10.11.2016.
 17. Галочкін О.В., Грицюк Б.М., Боднарук О.О., Нічий С.В. Використання статичної вакуумної системи з лазерно-гетерною відкачкою для отримання плівок $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. *Матеріали ІХ міжнародної конференції Фізика і технологія тонких плівок*. (Івано-Франківськ. Україна, 2003). Івано-Франківськ, 2003. С. 40–41.
 18. Захарук З.І., Галочкин А.В., Дремлюженко С.Г., Раренко А.І., Стребежев В.Н.. Состав и структура пленок CdZnTe и CdMnTe созданных лазерным излучением. *Матеріали ІХ міжнародної*

- конференції *Фізика і технологія тонких плівок*, Івано-Франківськ. Україна, 2003). Івано-Франківськ, 2003. С. 162–163.
19. Galochkin A.V., Strebegev V.N., Zakharuk Z.I., Dremlyuzhenko S.G., Yuriychuk I.M., Rarenko I.M. Characterization of interfaces of the structures created on $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ and $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ by laser melting. *Fourth international young scientist conference Problems of optical and High Technology Material science SPO*. (Kyiv. Ukraine, 2003). Kyiv, 2003. P. 87.
 20. Savchuk A.I., Gritsyuk B.M., Galochkin O.V., Ryzhuk M.M., Paranchich S.Y. Electrical, Photoelectrical Properties And Crystal Structure Of A^2B^6 Films, Grown By Laser Sputtering. *EMRS Conference*. (Strasbourg. France, 2005). Strasbourg, 2005 P. F–53/62.
 21. Галочкін О.В., Рижук М.М., Захарук З.І., Тарко В.О. Електричні та фотоелектричні властивості поверхнево-бар'єрних структур, створених лазерною пропалкою поверхні CdTe та CdMnTe . *Матеріали X міжнародної конференції МКФТТТ-Х*. (Івано-Франківськ, 16-21 травня 2005). Івано-Франківськ, 2005. Т.2. С. 149–150.
 22. Галочкін О. В., Жихаревич В.М., Раренко Г.І., Захарук З.І., Стребезев В.М. Вплив потужного моноімпульсного лазерного випромінювання на глибину проплаву кристалів CdTe та $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$ та їх структуру. *IV міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології»*. (Кременчук, 19-21 травня 2010). Кременчук, 2010. С. 180–182.
 23. Галочкін О.В., Рижук М.М., Грицюк Б.М., Захарук З.І. Поверхнево-бар'єрні структури на основі CdTe і $\text{Cd}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{Te}$, створені лазерною обробкою поверхні. *Українська конференція з фізики напівпровідників УНКФН-2*. (Чернівці-Вижниця. Україна, 2004). Чернівці-Вижниця, 2004. С. 168.
 24. Rarenko I.M., Zakharuk Z.I., Galochkin O.V., Rarenko A.I., Tsaly V.Z. Growth Peculiarities of Radiation Resistant $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ Semiconductors. *XIV international conference “Physics and technology of thin films and nanosystems”* (Ivano-Frankivsk, 20-25 May 2013). Ivano-Frankivsk, 2013. P. 575.
 25. Rarenko I.M., Korbutyak D.V., Kladko V.P., Panchuk O.E., Fochuk P.M., Sklyarchuk O.F., Zakharuk Z.I., Dremlyuzhenko S.G., Rarenko A.I., Galochkin A.V., Shafranyuk V.P. Schottky Photosensors on High Radiation Resistivity Semiconductors. *XV international conference “Physics and technology of thin films and nanosystems”*. (Ivano-Frankivsk, 11-16 May 2015). Ivano-Frankivsk, 2015. P. 46.
 26. Галочкін О.В., Ащеулов А.А., Дремлюженко С.Г. Координатно-чутливий фотодіод Шотткі на $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. *Конференція молодих вчених з*

- фізики напівпровідників "Лашикарьовські читання 2016". (Київ, 6-8 квітня 2016). Київ, 2016. С. 52.
27. Галочкін О.В., Ащеулов А.А., Захарук І.М., Дремлюженко С.Г., Даналакій О.Г., Романюк І.С. Технологічні особливості виготовлення та параметри фотодіодних структур на основі напівпровідників A^2B^6 . *Матеріали за 12-а міжнародна научна практична конференція, «Бъдещите изследвания», Современные технологии та информации*. (Софія. «Бялград-БГ» ООД, 2016). Софія, 2016. Т. 10. С. 49–56.
 28. Галочкін О.В., Ащеулов А.А., Романюк І.С. Фотодіоди Шотткі на основі $Cr - In_2Hg_3Te_6$. *20-й Ювілейний міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті»*. (Харків, 19-21 квітня 2016). Харків, 2016. С. 13–14.
 29. Ащеулов А.А., Галочкін О.В., Ушенко Ю.О., Дремлюженко С.Г., Романюк І.С. Фототранзистор на базі $In_2Hg_3Te_6$. *Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»*. (Чернівці, 3-5 листопада 2016). Чернівці, 2016. С. 249.
 30. Галочкін О.В., Ащеулов А.А., Ушенко Ю.О., Дремлюженко С.Г., Галочкіна О.О. Координатно-чутливий фотодіод Шотткі на основі радіаційно-стійкого напівпровідника $In_2Hg_3Te_6$. *V Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2020)»*. (Дніпро, 25-27 листопада 2020). Дніпро, 2020. С.189–190.

АНОТАЦІЯ

Галочкін О.В. Розробка радіаційно-стійких фотоструктур на основі напівпровідників A^2B^6 та $A_2^3B_3^6$. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України, Чернівці, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці радіаційно-стійких фотоструктур на основі напівпровідників $CdTe$, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0,2$), $In_2Hg_3Te_6$ та вдосконаленню методів вирощування кристалів цих напівпровідників.

Одержані фотодіоди Шотткі на $In_2Hg_3Te_6$ з металевією плівкою Cr характеризуються чутливістю у спектральному діапазоні $0,6 \div 1,7$ мкм, мають величину струмової монохроматичної чутливості $0,43$ А/Вт (на довжині хвилі $1,55$ мкм). Темновий струм таких ФДШ знаходиться в діапазоні $1 \div 4$ мкА при зворотному зміщенні 1 В, а висота потенціального бар'єру ϕ_0 , дорівнює $0,41$ еВ. Виготовлені ФДШ витримують γ -дози

опромінення до $2 \cdot 10^8$ бер.

Поверхнево-бар'єрні фотоструктури на CdTe та $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0,2$) характеризуються fotocувливістю в області спектру $0,5 \div 0,91$ мкм, висота потенціального бар'єру ϕ_0 для структур на CdTe дорівнює 0,9 еВ, а протікання струму характеризується двома механізмами переносу заряду – генераційно-рекомбінаційним та інжекційним, їх коефіцієнт випрямлення складає $k \approx 10^4$ (для CdTe). Спектральна залежність фотовідгуку структур на основі CdTe та $Cd_{1-x}Mn_xTe$ має додаткові максимуми ($E=1,5$ еВ – для CdTe; $E_1=2,01$ еВ, $E_2=2,31$ еВ – для $Cd_{1-x}Mn_xTe$), які зміщені в короткохвильову область і не пов'язані із власними переходами.

Одержані структури можуть бути успішно використані в якості детекторів, що чутливі у видимій на ближній інфра-червоній ділянках спектру та працюють в умовах сильного іонізуючого випромінювання на заміну Si-фотодетекторів.

Ключові слова: фотодіод Шоттки (ФДШ), CdTe, CdMnTe, $In_2Hg_3Te_6$, фототранзистор, вольт-амперна характеристика, методи вирощування кристалів, радіаційна стійкість.

АННОТАЦІЯ

Галочкин А.В. Разработка радиационно-стойких фотоструктур на основе полупроводников A^2B^6 и A^3B_3 . – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича Министерства образования и науки Украины, Черновцы, 2021.

Диссертационная работа посвящена разработке радиационно-стойких фотоструктур на основе полупроводников CdTe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0,2$), $In_2Hg_3Te_6$ и совершенствованию методов выращивания кристаллов этих полупроводников.

Полученные фотодиоды Шоттки на $In_2Hg_3Te_6$ с металлической пленкой Cr характеризуются чувствительностью в спектральном диапазоне $0,5 \div 1,7$ мкм, имеют величину токовой монохроматической чувствительности 0,43 А/Вт (на длине волны 1,55 мкм). Темновы ток таких ФДШ находится в диапазоне $1 \div 4$ мкА при обратном смещении 1 В, а высота потенциального барьера ϕ_0 равна 0,41 эВ. Изготовленные ФДШ выдерживают дозы γ -облучения до $2 \cdot 10^8$ бэр.

Поверхностно-барьерные фотоструктуры на CdTe и $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0,2$) характеризуются fotocувливістю в области спектра $0,5 \div 0,91$ мкм, висота потенціального бар'єра ϕ_0 для структур на CdTe равна 0,9 эВ, а протекание тока характеризуется двумя механизмами переноса

заряда – генерационно-рекомбинационным и инжекционным, их коэффициент выпрямления составляет $k \approx 10^4$ (для CdTe). Спектральная зависимость фотоотзыва структур на основе CdTe и $Cd_{1-x}Mn_xTe$ имеет дополнительные максимумы ($E=1,5$ эВ – для CdTe; $E_1=2,01$ эВ, $E_2=2,31$ эВ – для $Cd_{1-x}Mn_xTe$), которые смещены в коротковолновую область и не связанные с собственными переходами.

Полученные структуры могут быть успешно использованы в качестве детекторов, чувствительных в видимом и ближнем инфракрасном участках спектра и работающих в условиях сильного ионизирующего излучения вместо Si-фотодетекторов.

Ключевые слова: Ключевые слова: фотодиод Шоттки (ФДШ), CdTe, CdMnTe, $In_2Hg_3Te_6$, фототранзистор, вольт-амперная характеристика, методы выращивания кристаллов, радиационная стойкость.

SUMMARY

Galochkin O.V. Development of radiation-resistant photostructures based on A^2B^6 and $A^3B_3^6$ semiconductors. – On the rights of the manuscript.

PhD thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.27.01 – solid-state electronics. – Yuri Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2021.

The PhD thesis is devoted to the development of radiation-resistant photostructures based on semiconductors CdTe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.2$), $In_2Hg_3Te_6$ and the improvement of methods for growing crystals of these semiconductors.

The obtained Schottky photodiodes on $In_2Hg_3Te_6$ with Cr metal film are characterized by sensitivity in the spectral range of $0.6 \div 1.7$ μm , have a current monochromatic sensitivity of 0.43 A/W (at a wavelength of 1.55 μm) and a dynamic range of not less than 8 orders of magnitude (from 10^{-3} to 10^5 lx). The dark current of such SPD is in the range of $1 \div 4$ μA at a reverse offset of 1 V, and the height of the potential barrier ϕ_0 is equal to 0.41 eV. Manufactured SPD can withstand doses of γ -rays up to $2 \cdot 10^8$ rem.

Surface-barrier photostructures on CdTe and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.2$) are characterized by photosensitivity in the spectral region $0.5 \div 0.91$ μm , the height of the potential barrier ϕ_0 for structures on CdTe is 0.9 eV, and the current flow is characterized by 2 mechanisms of charge transfer: generation-recombination and injection, their rectification coefficient is $k \approx 10^4$ (for CdTe). The spectral dependence of the photoresponse of structures based on CdTe and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ has additional peaks ($E = 1.5$ eV – for CdTe; $E_1 = 2.01$ eV, $E_2 = 2.31$ eV – for $Cd_{1-x}Mn_xTe$), which are shifted to the shortwave region and not associated with their own transitions.

The obtained structures can be successfully used as detectors that are sensitive in the near-infrared region of the spectrum and work in conditions of strong ionizing radiation to replace Si-photodetectors.

Key words: Schottky photodiode, CdTe, CdMnTe, $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, phototransistor, volt-ampere characteristic, crystal growing methods, radiation resistance.