

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

ВОРОНЬКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.382

**ГЕТЕРОСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ АЗВ5 ДЛЯ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ**

05.27.01 - твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Вербицький Володимир Григорович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри мікроелектроніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Сердега Борис Кирилович,
Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
завідувач лабораторії

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Круковський Семен Іванович,
НВО «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» - дочірнє підприємство ПрАТ
«КОНЦЕРН-ЕЛЕКТРОН», начальник відділу

Захист відбудеться "28" вересня 2021 р. о 16 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.08 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37 Л.

Автореферат розіслано 26 серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



В.Г. АРТЮХОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для сучасних волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСП) актуальним є завдання створення випромінювачів і фотоприймачів в діапазоні довжин хвиль 0,85 -1,6 мкм для волоконно-оптичних систем передачі інформації з гігабітними швидкостями передачі цифрової інформації.

Для створення ВОСП необхідно було розробити технології отримання напівпровідникових мікро- та наноструктур на основі твердих розчинів АЗВ5, оптичні властивості яких дозволяли створити на їх основі як фотоприймачі, так і випромінювачі. Для області спектра 1,0 - 1,6 мкм це завдання вирішувалася застосуванням багатокомпонентних твердих розчинів арсеніду-фосфіду та галію-індію (GaInAsP). Змінюючи склад твердих розчинів для забезпечення ізоперіодичності з підкладкою, можна отримати гетероструктури з необхідною шириною забороненої зони і, як наслідок, необхідної довжини хвилі.

Застосування методу рідиннофазної епітаксії (РФЕ) дозволяло отримувати гетероструктури високої кристалічної досконалості, проте однорідність і відтворюваність параметрів при масовому виробництві була низькою. Ця проблема вирішувалася застосуванням газофазної епітаксії з металоорганічних сполук (ГФЕ МОС).

Експлуатаційні технічні характеристики оптоелектронних елементів модулів ВОСП (лазерні діоди, світлодіоди, фотодіоди) в основному визначаються якістю отриманих гетероструктур, особливо це стосується кристалічної досконалості епітаксійних шарів. Треба зауважити, що одним з основних чинників отримання лазерів з хорошими експлуатаційними характеристиками (мінімальні значення порогового струму, робочого струму при необхідній оптичній потужності, великий термін експлуатації та ін.) є якраз забезпечення умов росту напівпровідникових шарів з мінімальною неузгодженістю кристалічних ґраток саме під час епітаксійного процесу. Тому дуже актуальною була задача отримання гетероепітаксійних шарів з високою кристалічною досконалістю. Визначення оптимальних параметрів епітаксійного росту, як для технології РФЕ, так і для технології ГФЕ МОС проводилось за допомогою методу високороздільної рентгенівської дифрактометрії (ВРРД). Використання даного методу для дослідження гетероструктур дозволяє отримати практично всю необхідну інформацію про параметри епітаксійних шарів, а саме: ступінь кристалічної досконалості, товщину шарів, параметр неузгодженості кристалічних ґраток, що в подальшому дає можливість своєчасно корегувати технологічні режими для отримання досконалих гетероструктур із заданими властивостями.

При розробці та виготовленні оптоелектронних модулів ВОСП дуже актуальним є вирішення задачі оптичного узгодження оптоелектронних елементів (СВД,ЛД,ФД) з оптичним волокном. Підвищення коефіцієнта вводу в оптичне волокно є одним з головних завдань при розробці оптоелектронних модулів ВОСП, так як в майбутньому це визначає ефективність електронно-оптичного перетворення, що, у свою чергу, зменшує робочі струми напівпровідникового випромінювача і збільшує термін експлуатації модуля в цілому, для приймального модуля підвищення

ефективності оптичної узгодженості з фотодіодом призводить до збільшення динамічного діапазону роботи оптоволоконного тракту в цілому. Для вирішення цієї задачі було розроблено методику та апаратно-програмне забезпечення процесу оптичного узгодження між активними оптоелектронними компонентами (лазерний діод, світлодіод, фотодіод) та оптичним волокном з мінімальними втратами.

Дуже актуальним є вирішення задачі вимірювання параметрів оптоелектронних модулів, як на стадії їх виробництва, так і в процесі налагодження та експлуатації оптоелектронного тракту. На основі теоретичних та експериментальних досліджень параметрів ЛД,ФД,СВД для систем передачі інформації, розроблені методи та програмно-апаратне забезпечення комплексного вимірювання параметрів, як окремих оптоелектронних компонент, так і приймальних, передаючих модулів ВОСПІ в цілому. Це дозволяє проводити комплексне вимірювання, випробування та розрахунок параметрів активних оптоелектронних компонент в єдиному (універсальному) вимірювальному приладі (комплексі), використовуючи сучасні апаратні та програмні засоби, як для корпусних, так і безкорпусних приладів.

Все викладене вище обумовлює актуальність сформульованої теми дисертаційної роботи та проведених у роботі досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за державною цільовою науково-технічною програмою «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010-2014 роки (Постанова Кабінету Міністрів України від 28 жовтня 2009 р. № 1231), з урахуванням пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 09 вересня 2010 року №2519-17), згідно переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 23 серпня 2016 року №556), згідно середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2017-2021 роки.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в розробці наукових основ створення та дослідження багатокомпонентних приладових гетероструктур АЗВ5 та розробки на їх основі оптоелектронних модулів ВОСПІ.

Для досягнення цієї мети було необхідно вирішити наступні завдання:

1. Визначити оптимальні режими технологічних процесів для отримання гетероепітаксійних приладових структур на основі твердих розчинів АЗВ5 з необхідними параметрами.

2. Розробити методику та апаратно-програмне забезпечення процесу оптичного узгодження між активними оптоелектронними компонентами модулів ВОСПІ (лазерний діод, світлодіод, фотодіод) та оптичним волокном з мінімальними втратами.

3. Розробити приймально-передавальні модулі ВОСПІ на основі нових приладових гетероструктур.

4. Розробити та створити на сучасній мікроелектронній елементній базі та впровадити в практику вимірювальні прилади для дослідження параметрів оптоелектронних компонент та волоконно-оптичних систем передачі інформації.

Об'єкт дослідження - багатокомпонентні гетероструктури на основі твердих розчинів АЗВ5, лазерні діоди, фотодіоди, оптоелектронні модулі ВОСПІ.

Предмет дослідження - структурні та електрооптичні характеристики приладових гетероструктур та напівпровідникових лазерів та фотодіодів.

Методи дослідження базуються на використанні експериментальних методів твердотільної електроніки: електронна оже-спектроскопія (ЕОС), рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (РФЕС), дифракція швидких електронів (ДШЕ), вторинно-іонна МАС-спектроскопія (ВІМС), високороздільна рентгенівська дифрактометрія (ВРРД), стандартні методики для визначення електрооптичних параметрів напівпровідникових джерел випромінювання та фотодетекторів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. На основі проведених комплексних досліджень епітаксійних структур визначені оптимальні термодинамічні умови для отримання високоякісних шарів твердих розчинів GaInAsP та AlGaAs керованих атомних складів.

2. Розроблена нова позиційно чутлива матриця фоточутливих елементів та оптичний координатор на її основі.

3. Розроблено методику та апаратуру мікропроцесорного юстування гетеролазерів з оптичним волокном, що забезпечує їх просторове узгодження з мінімальними втратами.

4. На основі теоретичних та експериментальних досліджень параметрів лазерів, фотоприймачів для систем передачі інформації розроблені методи та програмно-апаратне забезпечення комплексного вимірювання параметрів оптоелектронних компонент ВОСПІ. Розроблені і виготовлені приймально-передавальні модулі ВОСПІ.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Поглиблення розуміння термодинамічних процесів в рідкій і газовій фазах дозволило визначити області застосування відповідних епітаксійних технологій для отримання приладових гетероструктур із заданими параметрами. (На основі досліджень була розроблена технологія отримання епітаксійних гетероструктур на основі твердих розчинів АЗВ5 методом РФЕ та ГФЕ МОС для приладів ВОСПІ).

2. В результаті досліджень визначено, що структури, отримані методом РФЕ, мають більш досконалу кристалічну структуру в порівнянні зі структурами, які отримані методом ГФЕ МОС. Але при цьому треба зауважити, що розкид параметрів структур при методі РФЕ значно вище, ніж при методі ГФЕ МОС. Різкість границі гетеропереходу набагато краще в епітаксійних шарах, отриманих методом ГЕ МОС-можливо це пов'язано з тим, що відбувається підплавлення перехідною областю в процесі рідиннофазної епітаксії, але цей вплив можна зменшити спеціальними конструкціями касет і проводити процес при більш низьких значеннях температури.

3. Завдяки розробленому програмно-апаратному комплексу для юстування оптоелектронних компонент модулів ВОСПІ, вдалося отримати прецизійне просторове узгодження лазерів, фотодіодів з оптичним волокном. Це дозволило значно поліпшити технічні параметри модулів (термін експлуатації, потужність випромінювання та ін.) та дуже суттєво (в десятки разів) скоротити сам процес юстування приладів.

4. На основі отриманих приладових гетероструктур були розроблені різні типи приймально-передавальних модулів, вимірювальні прилади, технічні параметри яких не поступаються, а по деяким параметрам навіть перевищують зарубіжні аналоги.

5. Розроблені методики і прилади знайшли застосування в НДІ «Сатурн», НДІ Мікроприладів НАНУ, на підприємствах ВАТ «Укртелеком», НВП «Прожектор», Київський Радіозавод, закордонних компаніях SVT Associates і Agnitron (США), ТОВ «Канком» та ін.

6. Результати роботи використовуються в навчальному процесі НТУУ «КПІ» за курсом «Оптоелектроніка».

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати цієї роботи отримані автором самостійно. У дисертаційній роботі узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних автором дисертації особисто, і в співавторстві. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належать результати і висновки, наведені в дисертації та авторефераті.

Автор брав безпосередню участь у підготовці та отриманні досліджуваних зразків, їх дослідженню та аналізу результатів. Самостійно було проведено дослідження гетероепітаксійних структур методом рентгенівської дифрактометрії високої роздільної здатності для відпрацювання технології отримання приладових структур з високою кристалічною досконалістю для оптоелектронних елементів ВОСПІ [3]; проаналізовані сучасні принципи функціональної та технологічної інтеграції при розробці гігабітних модулів ВОСПІ [7, 14]; на основі теоретичних та експериментальних досліджень запропонована конструкція приймально-передавальних оптоелектронних модулів з граничною частотою модуляції до 10 ГГц [13, 17]; запропоновані схемотехнічні та конструктивні рішення для розробки та виробництва приймальних, передавальних модулів, трансиверів з різними функціональними можливостями, з урахуванням особливостей електро-оптичних характеристик активних компонент ВОСПІ: лазерних діодів (ЛД), фотодіодів(ФД), світлодіодів(СВД), методів оптичного узгодження з оптичним волокном [4,15,16, 18, 24]; запропоновано нову конструкцію пристрою, що забезпечує підвищення ефективності термостабілізації, яке приводить до підвищення надійності та розширення функціональних можливостей напівпровідникового ЛД [11]; для реєстрації слабких оптичних імпульсів запропоновано нову конструкцію лавинного метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) фотоприймача, у якому реалізовано внутрішню стабілізацію коефіцієнта лавинного множення [1, 5]; для реалізації вузла ефективного оптичного узгодження між кристалом ЛД(ФД) та оптичним волокном розроблено систему юстування з нанометровою розподільчою здатністю та новим оптичним координатором на основі оригінальної позиційно-чутливої матриці фоточутливих елементів [2, 8, 9, 10, 19, 12, 20]; на основі теоретичних та

експериментальних досліджень параметрів лазерів, фотоприймачів для систем передачі інформації, було розроблено вимірювальний комплекс для всебічного дослідження характеристик, як оптоелектронних компонент модулів, так і самих модулів в цілому [21, 22] та вимірювальні прилади для визначення параметрів волоконно-оптичних систем передачі інформації [6, 23]. У співавторстві були проведені дослідження структури і хімічного складу матеріалів методами ВІМС і РЕМ.

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертації представлялися і обговорювалися на міжнародних конференціях:

1. IV міжнародній науково-технічній конференції «Електроніка 2011», 29-31 березня 2011 року, Київ, Україна.
2. 5-7 Міжнародних конференцій «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».
3. 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Системы и средства передачи и обработки информации» - ССПОИ-98.
4. Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні та електронні», Одеса-2000.
5. 11-й Міжнародній конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 2001р., Севастополь.
6. Internation Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2005».
7. Міжнародній науково-технічній конференції «Нанофізика та наноелектроніка».С.-Петербург-2006.
8. XXXI Міжнародній науково-технічній конференції «Електроніка та нанотехнології», 12-14 травня 2011 р., Київ, Україна.
9. 7-й Всеросійській конференції «Нітриди галію, індію, алюмінію - структури та прилади», 14-17 лютого 2010 р., Москва, Росія.
10. 8-й Всеросійській конференції «Нітриди галію, індію, алюмінію - структури та прилади», 26-28 травня 2011 р., С.-Петербург, Росія.
11. XXXIII Міжнародній практичній конференції «Застосування лазера в медицині та біології», 7-14 квітня 2010 р., Ужгород, Україна.
12. VI Міжнародній конференції з оптико-електронних інформаційних технологій Photonics-ODS 2012 1-4 жовтня 2012, Вінниця, Україна.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць у фахових виданнях, серед яких 7 статей у наукових фахових тематичних виданнях, 14 статей у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських конференцій, 4 патенти України на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 115 найменувань та додатків. Робота викладена на 140 сторінках основного тексту, включає 68 рисунків та 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й основні задачі дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення. Наведено зв'язок з науковими програмами, розглянуто особистий внесок автора, надано інформацію щодо апробації результатів та кількості публікацій.

У **першому розділі**, що має оглядово-аналітичний характер, визначено особливості застосування, основні характеристики та параметри оптоелектронних модулів ВОСП. Проведено аналіз застосування напівпровідникових джерел випромінювання на основі твердих розчинів АЗВ5 для одномодових та багатомодових модулів ВОСП. Були проаналізовані особливості роботи приймально-передавальних модулів ВОСП в локальних та магістральних ВОСП для різного спектрального діапазону (850нм-1550нм) та показані основні конструктивно-технологічні обмеження застосування напівпровідникових джерел випромінювання на основі твердих розчинів АЗВ5 для оптоелектронних модулів ВОСП. Визначені основні задачі для покращення експлуатаційних характеристик модулів ВОСП, починаючи з отримання приладової гетероструктури і до розробки самого модуля з необхідними функціональними можливостями.

У **другому розділі** розглядаються практичні методи отримання приладових гетероструктур на основі твердих розчинів АЗВ5 для оптоелектронних модулів ВОСП. При моделюванні, розробці і виробництві даних приладів однією з основних складових є отримання гетероструктур з високою кристалічною досконалістю і різкістю гетеропереходів, що і визначає в подальшому основні параметри оптоелектронних приладів ВОСП. Основними методами отримання даних гетероепітаксійних структур є: РФЕ, ГФЕ МОС, молекулярна-променева епітаксія (МПЕ).

Для дослідження гетероепітаксійних структур застосовувався метод високороздільної рентгенівської дифрактометрії (ВРРД). Використання даного методу для аналізу напівпровідникових структур дозволяє визначити з високою точністю кристалічну досконалість, величину неузгодженості параметрів ґратки (складів), товщини шарів і перехідних областей, а це, у свою чергу, дає надійний інструмент для розробки та відпрацювання технології отримання епітаксійних шарів. Для отримання приладової гетероструктури високої кристалічної досконалості з потрібними характеристиками (склад та товщина шарів, різкість границі гетеропереходу) необхідно було послідовно відпрацювати технологію отримання: буферного шару, одношарових та багатшарових гетероепітаксійних структур, включаючи періодичні структури (надґратки), що в подальшому дозволяє отримати оптоелектронний прилад (ЛД, СВД, ФД) з потрібними експлуатаційними характеристиками. При дослідженні гетероструктур було виявлено, що дуже велике значення для отримання якісної приладової гетероструктури має структурна досконалість буферного шару. Тому особливу увагу треба приділити якості підготовки поверхні підкладки. В іншому випадку отримати буферний шар потрібної

структурної досконалості буде неможливо. А це, у свою чергу, унеможливить отримання інших шарів приладової структури відповідної якості.

Гетеропереходи $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ отримували епітаксійним вирощуванням у відкритій системі твердого розчину індію з добавкою галію в розплаві фосфору і миш'яку. Процес відпрацювання технології отримання гетеропереходу включає кілька етапів: відпрацювання температури нарощування шару, відпрацювання оптимальних режимів епітаксії: пересичення $T^\circ\text{C}$, складу рідкої фази x, y ат.%, відпрацювання різних складів рідкої фази (x, y) при різних значеннях пересичення (ΔT). Для кожного зразка по кривим дифракційного відбиття (КДВ) вимірювалася напівширина L_H максимальної інтенсивності відбитого від підкладки випромінювання і розраховувався параметр неузгодженості кристалічних ґраток Δa . Метою аналізу зразків рентгенодифракційним методом на першому етапі є визначення оптимальних параметрів технологічного процесу (ТП), при якому не буде порушена кристалічна структура підкладки. Оптимальні параметри ТП визначаються на підставі залежності значення напівширини L_H (форми та розподілу інтенсивності) відбитого від підкладки максимуму вимірювання від змінної якого-небудь параметра ТП при сталості інших. На рис. 1. наведено КДВ (400) $\text{CuK}\alpha_1$ епітаксійних гетероструктур з вмістом галію в рідкій фазі $N_{\text{Ga}}^L = 2,61$ ат.% і $N_{\text{Ga}}^L = 2,56$ ат.%. По представленим КДВ можна спостерігати, як змінюється дифракційна картина в залежності від складу рідкої фази.

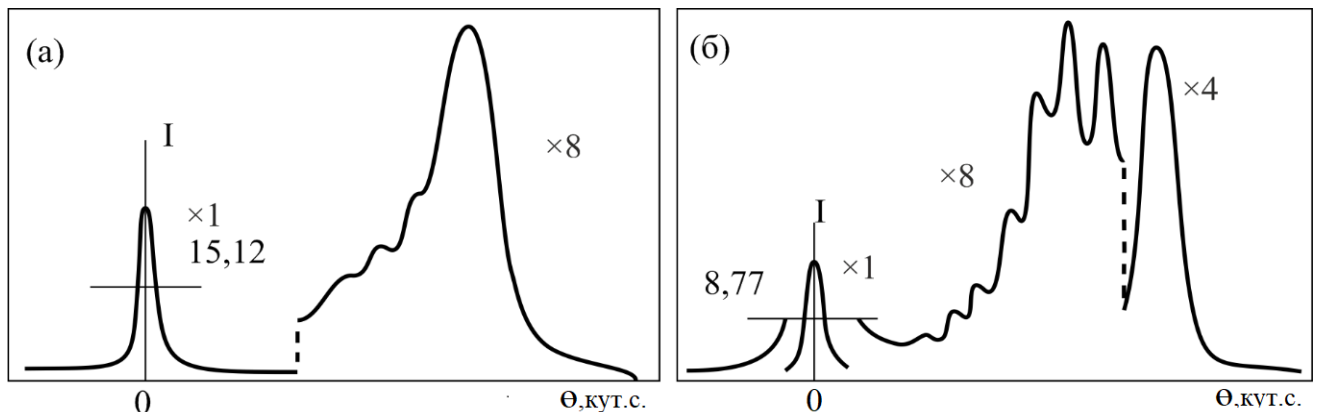


Рисунок 1 – КДВ гетероструктури $\text{InGaAsP}/\text{InP} \langle 100 \rangle$: а) = 2,61 ат.%, б) = 2,56 ат.% ($T_p = 645^\circ\text{C}$)

Максимум відбитого від підкладки піку має меншу напівширину 8,77" для структури, що містить $N_{\text{Ga}}^L = 2,56$ ат.%. З експериментальної залежності $L_H(X_{\text{Ga}})$, яка приведена на рис. 2 слідує, що дана концентрація галію є найбільш оптимальною.

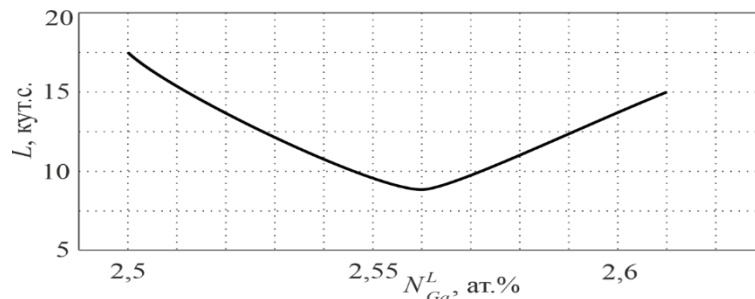


Рисунок 2 – Експериментальна залежність напівширини дифракційного максимуму від підкладки на КДВ епітаксійної структури $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y/\text{InP} \langle 100 \rangle$ в залежності від вмісту галію N_{Ga}^L в рідкій фазі

При відпрацюванні різних складів рідкої фази (x, y) при різних значеннях пересичення (ΔT) нарощування структури проводилось при різних пересиченнях $\Delta T, ^\circ\text{C}$: 7,5; 12,9; 17,2 і концентрації фосфору в рідкій фазі N_p^L , ат.% (0,65 - 0,87).

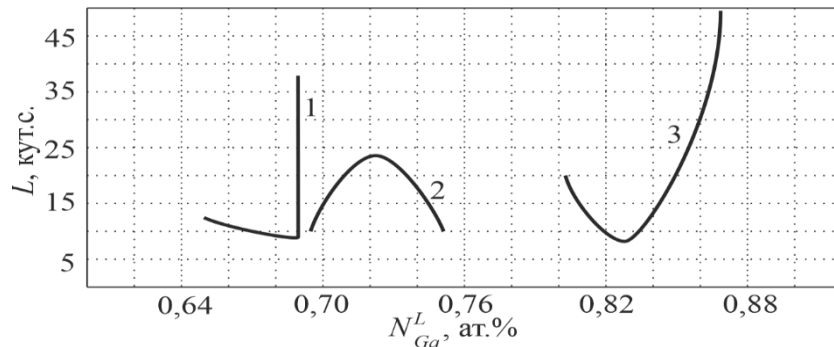


Рисунок 3 – Експериментальна залежність напівширини L_n КДВ від концентрації фосфору N_p^L ($N_{Ga}^L = 0,0775$ ат%) в рідкій фазі: 1 – $\Delta T = 7,5^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T = 12,9^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta T = 17,2^\circ\text{C}$

З наведеної експериментальної залежності (рис. 3) випливає, що найменше значення L_n отримано при $\Delta T = 17,2^\circ\text{C}$ і $N_p = 0,826$ ат. %. На рис. 4. показана КДВ для цієї структури. Параметр неузгодженості Δa становить $+1,6 \times 10^{-3}$ Å. На рисунку видно, що шар з підкладкою практично узгоджено, оскільки обидва максимуми інтенсивності від шару і від підкладки практично збігаються.

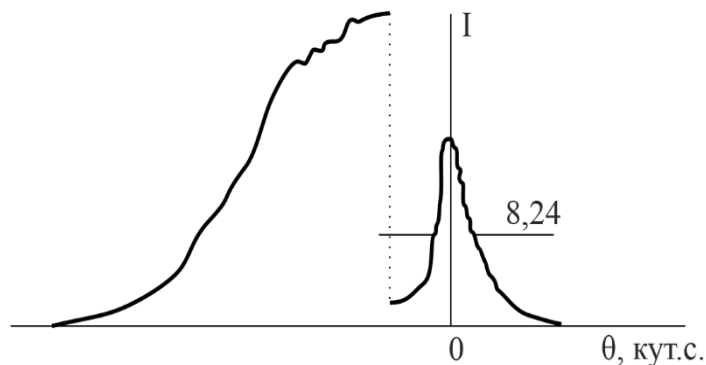


Рисунок 4 – КДВ гетероструктури InGaAsP/InP(100), $N_p^L = 0,826$ ат. %

Під час проведення роботи була відпрацьована технологія отримання багат шарових приладових гетероструктур, включаючи лазерні структури та надгратки, отримані методами РФЕ та ГФЕ МОС. На основі експериментальних досліджень зроблено порівняльний аналіз щодо застосування цих двох технологій для отримання гетероструктур з потрібними параметрами. Для отримання квантоворозмірних структур для активних та хвилеводних шарів лазерної структури були відпрацьовані оптимальні технологічні режими епітаксійного нарощування періодичних структур (надграток) високої кристалічної досконалості. На рис.5. показано КДВ періодичної структури $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs})_5$, отриманої методом ГФЕ МОС, та відповідний профіль розподілу складу із зображенням відколу. Значення напівширин сателітних максимумів, максимумів від підкладки, наявність осциляційних максимумів визначає високий ступінь кристалічної досконалості отриманої гетероструктури та різкість гетерограниць. Для отримання зображення шарів по товщині структури за допомогою растрового електронного мікроскопу (РЕМ) на деяких структурах для кожної партії вирощували шар GaAs більше 1 мкм.

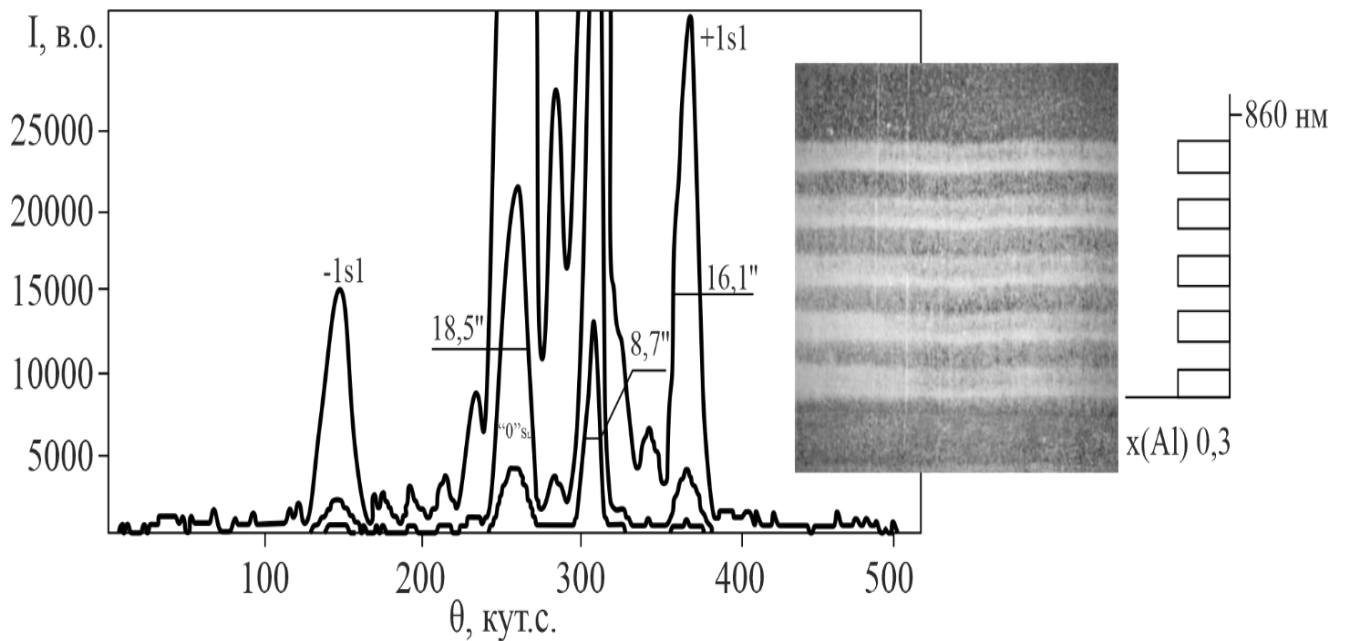


Рисунок 5 – КДВ від періодичної структури з 10-ти періодичними шарами $Al_xGa_{1-x}As$ і GaAs, нарощена на GaAs(100) та відповідний профіль розподілу складу із зображенням відколу, отриманий за допомогою РЕМ

Треба зазначити, що виходячи з діаграми залежності ширини забороненої зони E_g від сталої кристалічної ґратки a для напівпровідникових сполук на основі твердих розчинів АЗВ5, прецизійне визначення даних параметрів одразу дозволяє знайти оптимальні параметри технологічного процесу для формування гетероструктур з потрібною E_g - тобто фактично дозволяє вирішувати завдання зонної інженерії. Особливість методу двохкристальної рентгенівської дифрактометрії при дослідженні багат шарових структур полягає в тому, що він являється більш інформативним при дослідженні гетеропереходів з різкими границями (з мінімальним перехідним шаром), а також для періодичних структур. Але в нашому випадку це не є обмеженням його застосування, так як для отримання приладової оптоелектронної структури якраз і необхідно створювати шари з мінімальними перехідними шарами.

Таким чином, в цьому розділі показана можливість практичного застосування методу для відпрацювання технології отримання приладових гетероепітаксійних структур з необхідними параметрами. Неруйнівність, інформативність (особливо стосовно гетероструктур), експресність, висока точність визначення параметра незгодженості, складу, кристалічної досконалості епітаксійних шарів - роблять даний метод унікальним інструментом отримання необхідної інформації для своєчасної корекції параметрів технологічного процесу і більш глибокого розуміння процесів, що відбуваються під час епітаксійного росту.

У третьому розділі розглянуто особливості розробки оптоелектронних модулів ВОСП в залежності від функціонального призначення, конструктивних особливостей та типу напівпровідникового випромінювача (фотоприймача - для приймальних модулів).

Функціональна схема (рис.6) і, відповідно, принципова електрична схема) оптоелектронного модуля в основному визначається технічними характеристиками волоконно-оптичної системи та електрооптичними параметрами лазерних діодів(ЛД), світлодіодів(СВД) та фотодіодів(ФД).

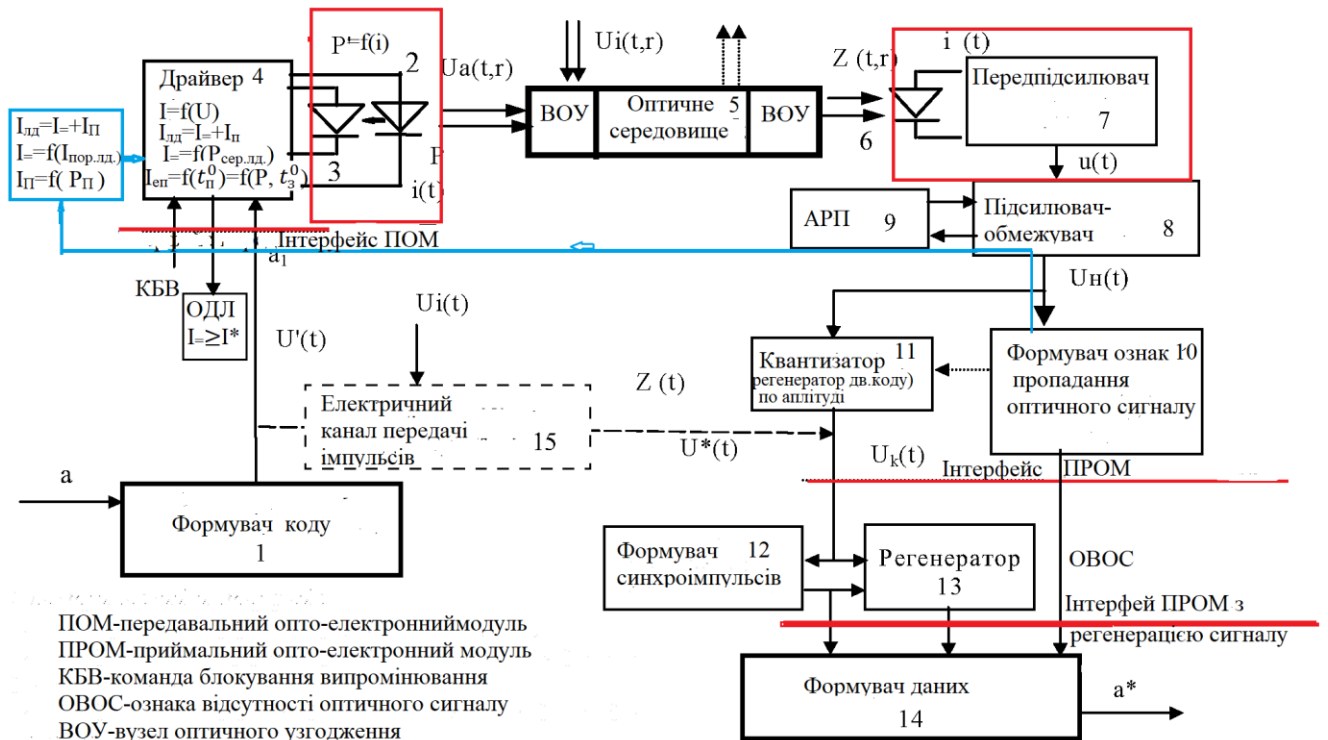


Рисунок 6 – Функціональна схема ВОСП

Для реєстрації слабких оптичних імпульсів запропоновано нову конструкцію лавинного фотоприймача, в якому реалізовано внутрішню стабілізацію коефіцієнта лавинного множення.

Враховуючи, що середня потужність, що розсіюється р-n переходом лазерного діода, досить мала (частки вата) та значну залежність параметрів ЛД від температури, були розроблені методи поєднання кристалів гетеролазерних структур з поверхнею тепловідвідної підкладки, що в подальшому дозволило підвищити ресурс роботи гетеролазерів за рахунок зменшення впливу температурних факторів.

Застосування нових схемотехнічних рішень на сучасній елементній базі та використання отриманих приладових гетероструктур для активних оптоелектронних елементів дозволило значно розширити функціональні можливості модулів ВОСП, оптимізувати робочі токи лазерних діодів, підвищити швидкість передачі та значно підвищити термін експлуатації приладів.

Однією з важливих задач при розробці волоконно-оптичних модулів ВОСП є оптичне узгодження оптоелектронних елементів (СВД, ЛД, ФД) з оптичним волокном. Підвищення коефіцієнта вводу в оптичне волокно є одним з головних завдань при розробці оптоелектронних модулів ВОСП, так як в майбутньому це визначає ефективність електро-оптичного перетворення ЛД, що, у свою чергу, зменшує робочі струми напівпровідникового випромінювача і збільшує термін експлуатації модуля в цілому. Для приймального модуля підвищення ефективності оптичної узгодженості з фотодіодом призводить до збільшення динамічного діапазону роботи оптоволоконного тракту в цілому. Найбільш оптимальним виявився спосіб формування мікролінзи на кінці серцевини оптичного волокна. Для точного переміщення волокна була розроблена прецизійна система юстування волокна з оптоелектронними компонентами модулів ВОСП. Для забезпечення точного

сканування та позиціонування оптичного волокна в площині, перпендикулярній р-п переходу, необхідно мати прецизійний оптичний координатор переміщень.

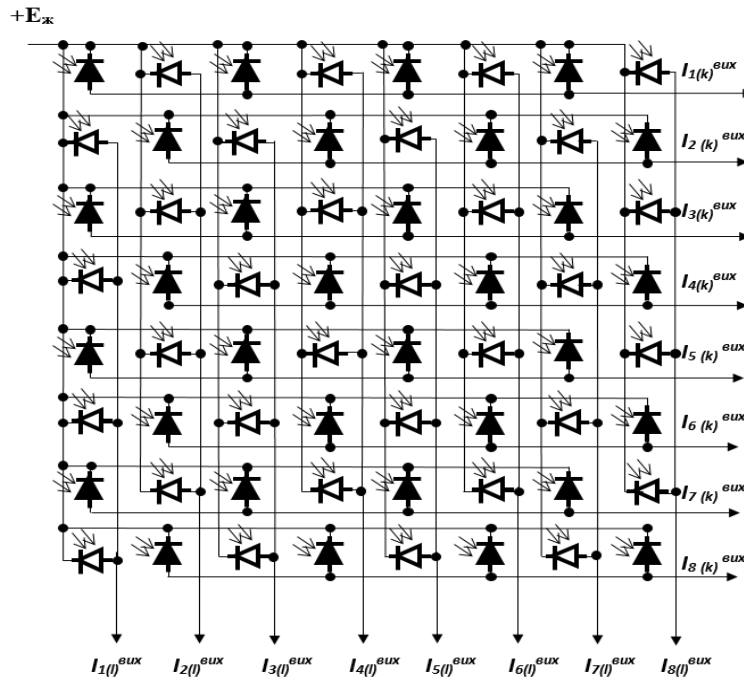


Рисунок 7 – Топологія між'єднань фоточутливих елементів позиційно-чутливої матриці

Зазвичай в таких координаторах використовується чотирьохквadrантний фотоприймач. Даний фотодетектор має хорошу роздільну здатність положення світлової плями (висока крутизна пеленгаційної характеристики) у відносно невеликому діапазоні (діапазон переміщення не перевищує розміру радіуса світлової плями відносно центру). Тому одночасне забезпечення більшої ширини зони захоплення та прецизійність визначення координат світлової плями є суперечливими вимогами, які не можуть бути виконані при застосуванні чотирьохквadrантного фотоприймача. Також використання таких оптичних координаторів завжди потребує початкового точного позиціонування положення світлового променя. Для зняття цих функціональних обмежень була розроблена позиційно-чутлива матриця фотоелементів (рис.7). На виходах запропонованої матриці формуються сигнали, рівні сумі фотострумів від елементів відповідних рядків (стовпців) цієї матриці:

$$I_{2k-1}^{\text{ВИХ}} = \sum_{l=1}^{\frac{n}{2}} I_{2k-1,(2l-1)}, \quad (1)$$

$$I_{2k}^{\text{ВИХ}} = \sum_{l=1}^{\frac{n}{2}} I_{2k,(2l)}, \quad (2)$$

$$I_{2l-1}^{\text{ВИХ}} = \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} I_{2k,(2l-1)}, \quad (3)$$

$$I_{2l}^{\text{ВИХ}} = \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} I_{(2k-1),2l}, \quad (4)$$

де m – число рядків матриці;

n – число стовпців матриці;

$$k = 1, 2, 3, \dots, m/2;$$

$$l = 1, 2, 3, \dots, n/2.$$

Відзначимо, що в такій матриці число рядків і стовпців не обмежено вимогою кратності 4-м, а може бути довільним. На рис.8 показана матриця 16x16 елементів, яка була розроблена та виготовлена для оптичного координатора.

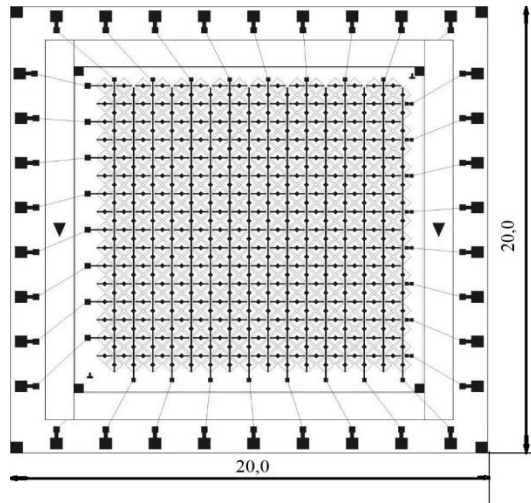


Рисунок 8 – Позиційно-чутлива матриця 16x16 елементів для оптичного координатора

У четвертому розділі описана розробка вимірювального комплексу для активних оптоелектронних компонент ВОСП, вимірювальних приладів для контролю параметрів ВОСП, наведені основні технічні параметри розроблених модулів в залежності від функціонального призначення.

Під час розробки та виготовлення модулів ВОСП дуже актуальним є завдання дослідження параметрів оптоелектронних модулів як на стадії їх виробництва, так і в процесі налагодження та експлуатації оптоелектронного тракту. Використовуючи сучасні апаратні та програмні засоби, був розроблений вимірювальний комплекс, який дозволив об'єднати всі необхідні вимірювання, випробування та розрахунок параметрів активних оптоелектронних компонент (як для корпусних, так і безкорпусних приладів).

Створений комплект вимірювальних приладів дозволяє вимірювати наступні основні експлуатаційні характеристики оптоелектронних модулів та волоконно-оптичного тракту в цілому:

- рівень втрат оптичного сигналу в одномодовому і багатомодовому оптичному волокні на використовуваних довжинах хвиль;
- визначення параметрів імпульсного оптичного сигналу;
- стабільність оптичних параметрів передавальних лазерних модулів в часі та при впливі зовнішніх факторів;
- контроль експлуатаційних параметрів оптичних регенераторів.

Так, наприклад, був розроблений вимірювач середньої потужності оптичного випромінювання (ІТ1707) з більш розширеними, в порівнянні з базовою моделлю, сервісними функціями (п'ять значень довжини хвилі калібрування, наявність вбудованої незалежної пам'яті для збереження результатів вимірювань, вбудований порт RS-232, відображення в дБ або Вт, а також вимірювання середнього значення за

обраною кількістю вимірювань щодо обраного рівня потужності). Це дозволяє використовувати прилад для тестування параметрів передавальних модулів у часі, а за необхідності – і при впливі зовнішніх факторів (температури та ін.).

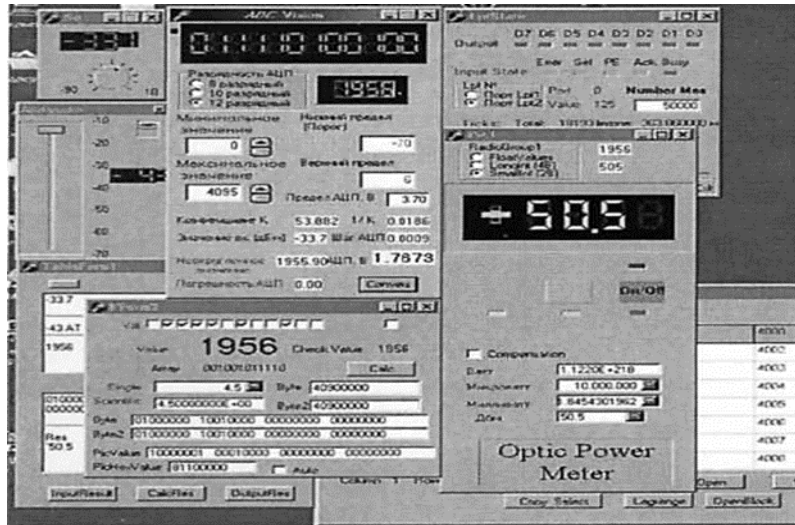


Рисунок 9 – Загальний вигляд користувача інтерфейсу вимірювача середньої потужності оптичного випромінювання **ПТ1707**

У цій моделі, на відміну від попередніх, суттєво розширено використання функцій мікроконтролера (на базі STV-32, MSP-430) при аналізі оптичного сигналу (математична обробка функції опто-електричного перетворення фотодіоду згідно первинного калібрування), що дозволило підвищити точність вимірювань у всьому динамічному діапазоні. Для даного приладу розроблено програмне забезпечення (ПЗ), яке дозволяє виконувати запис і обробку результатів вимірювань на персональному комп'ютері. Загальний вигляд інтерфейсу користувача ПЗ для роботи з вимірювачем середньої потужності оптичного випромінювання представлено на рис. 9.

Програмне забезпечення дозволяє також моделювати проведення віртуальних вимірювань, задаючи програмно віртуальні генератори, атенюатори, вимірювальні перетворювачі. Користувач має можливість спостерігати всі етапи проміжних перетворень (пряме і логарифмічне підсилення сигналу, аналого-цифрове перетворення, розрахунок коефіцієнтів компенсації, перетворення форматів числових даних), здійснювати введення сигналів за допомогою стандартних інтерфейсів RS-232, Centronix і виконувати передачу команд управління приладами і макетними зразками по послідовному інтерфейсу. Це дозволяє більш наочно демонструвати роботу приладу в навчальних цілях.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Метод РФЕ більш придатний для отримання товстих гетерошарів з високою кристалічною досконалістю, а для отримання тонких шарів, і, за необхідності, з різкою границею гетеропереходу, більш оптимальним методом є ГФЕ МОС. В деяких випадках поєднання цих двох методів в єдиному технологічному циклі для створення приладової структури може бути найбільш оптимальним

рішенням як з економічної, так і з технічної сторони. Наприклад, для отримання товстих шарів високовольтного транзистора можна використати метод РФЕ, а для отримання активного шару - метод ГФЕ МОС.

2. Під час проектування приладової гетероструктури та технології її виготовлення для випромінювача, використовуючи метод зонної інженерії: взаємозв'язок довжини хвилі випромінювання λ , шириною забороненої зони E_g , параметром сталої кристалічної ґратки a та складом твердого розчину (X , Y), необхідно враховувати обмеження по товщинам шарів для певного складу та методу технології, мінімізувати параметр неузгодженості $\Delta a/a$ під час проведення епітаксії для отримання структури з високою кристалічною досконалістю.

3. В порівнянні з ГФЕ МОС, більш товсті гетерошари, отримані методом РФЕ мають кращу кристалічну досконалість. Тобто, при одних і тих самих товщинах шарів, у випадку РФЕ (в порівнянні ГФЕ МОС) ми маємо можливість більше змінювати склад (для випромінювача це означає збільшення спектра можливого випромінювання) без порушення кристалічної досконалості шару.

4. Розроблено методику та апаратно-програмне забезпечення процесу оптичного узгодження між активними оптоелектронними компонентами (ЛД, СВД, ФД) та оптичним волокном з мінімальними втратами.

5. Розроблений лавинний МНМ фотоприймач, в якому реалізовано внутрішню стабілізацію коефіцієнта лавинного множення.

6. Запропоновано новий спосіб визначення координат джерела оптичного випромінювання та нову спеціальну топологію міжз'єднань фоточутливих елементів позиційно-чутливої матриці для оптичного координатора.

7. Розроблено методику і алгоритм визначення кутових координат джерела випромінювання за обраними інформативними параметрами.

8. На основі теоретичних та експериментальних досліджень параметрів ЛД, ФД, СВД для систем передачі інформації, розроблені методи та програмне-апаратне забезпечення комплексного вимірювання параметрів, як окремих оптоелектронних компонент, так і приймальних, передаючих модулів ВОСПІ в цілому.

9. На сучасній мікроелектронній елементній базі були розроблені та виготовлені вимірювальні прилади для визначення середньої оптичної потужності випромінювання в оптичному волокні з різними функціональними можливостями та оптичний тестер з інтегрованим джерелом оптичного випромінювання. Для дослідження характеристик імпульсного оптичного сигналу розроблені оптоелектронні конвектори з різною граничною частотою (від 10МГц-2ГГц).

10. Створено цілий ряд оптоелектронних модулів ВОСПІ для різного спектрального діапазону, швидкості передачі, рівня функціональних можливостей, які по своїм технічним параметрам не поступаються зарубіжним аналогам, а за деякими характеристикам їх перевищують.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Korolevych L., Borisov A., Voronko A. The Experimental Study of the Dioxide - Silicon Interface of MIS Structures. *Visnyk NTUU KPI. Serii – Radiotekhnika*

Radioaparatabudivannia. 2021. No. 85. P. 69–74. (надруковано у фаховому виданні України категорії «А», що входить до WoS). Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено обговорення отриманих результатів зі співавторами, прийнято участь у редагуванні тексту статті.

2. Verbitskiy V., Voronko A., Verbitsky D. Position-sennsitive photodetector array for optical coordinator. *Measuring Equipment and Metrology*. 2021.Vol. 82 (1). P. 5–8. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання, запропоновано ідею, поставлено завдання, проведено розрахунки, проаналізовано отримані результати.

3. Воронько А. А. Применение метода высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии для отработки технологии получения гетеропереходов InGaAsP/InP. *Электроника и связь*. 2005. № 29. С. 24–28. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання КДВ, обробка експериментальних даних та проаналізовано отримані результати.

4. Мержвинский П. А., Осинский В. И., Палагин А. В., Вербицкий В. Г., Воронько А. А., Мержвинский П. А., Белаш П. В. Особенности разработки цифровых волоконно-оптических модулей. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2002. № 2. С. 15–21. Особистий внесок здобувача: розробка функціональних та принципів схем модулів, проведення експериментальних досліджень.

5. Воронько А. А., Осинский С. В., Бойко М. П. Лавинное усиление фототока в МДП и гетероструктурах. *Электроника и связь*. 2005. № 24. С. 17–20. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, поставлено завдання, проведено основні розрахунки, проаналізовано результати досліджень.

6. Воронько А. А., Мержвинский П. А., Осинский В. И., Карпинский К. Б., Вербицкий В. Г. Компактные измерительные приборы для определения параметров активных и пассивных компонент ВОЛС. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2004. № 1. С. 53–55. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання, запропоновано ідею, поставлено завдання, проведено розрахунки, проаналізовано отримані результати.

7. Осинский В. И., Олексенко П. Ф., Палагин А. В., Вербицкий В. Г., Воронько А. А. Проблемы интеграции структур гетероэлектроники с кремниевыми ИС. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 1999. № 1. С. 4–16. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання та обробка експериментальних даних, проаналізовано отримані результати та проведено обговорення отриманих результатів зі співавторами.

8. Спосіб визначення кутових координат джерела оптичного випромінювання: пат. 40305 Україна: МПК(2006): H01L 31/05, H01L 31/042. № u200814874; заявл. 24.12.2008; опубл.25.03.2009, бюл.№6/2009. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, проведено основні розрахунки.

9. Позиційно-чутлива матриця фоточутливих елементів: пат. 40278 Україна: МПК(2006): H01L 31/05, H01L 31/042. № u200813931; заявл. 03.12.2008; опубл.25.03.2009, бюл.№6/2009. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, проведено основні розрахунки.

10. Спосіб визначення кутових координат джерела оптичного випромінювання: пат. 22866 Україна: МПК(2006): H01L 31/05, H01L 31/042. №

u200613953; заявл. 27.12.2006; опубл.25.04.2007,бюл.№5/2007. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, проведено основні розрахунки.

11. Пристрій для охолодження та термостабілізації напівпровідникового приладу: пат.22867 Україна: МПК(2006): H01L 23/34, H01S 5/00. № u200613955; заявл. 27.12.2006; опубл.25.04.2007,бюл.№5/2007. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, поставлено завдання, проведено основні розрахунки, проаналізовано результати досліджень.

12. Osinsky V., Merjvinsky A., Voronko A., Orihovsky B. The system for inputting signals from multiple sensors based on FOCL. *8th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1998. P. 153–155. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, проведено основні розрахунки, проаналізовано результати, розроблено функціональну схему.

13. Osinsky V., Voronko A., Kirusha A., Merjvinsky P. Gigabit FOCL modules. *5th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1995. P. 205–207. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведена розробка оптоелектронного вузла та вимірювання параметрів модулів.

14. Sunduchkov K., Osinsky V., Ilchenko V., Voronko A., Merjvinsky A. Functional and technological integration in microwave optoelectronics. *6th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1996. P. 25–33. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні дослідження та аналіз вимірювань параметрів гігабітних оптоелектронних модулів.

15. Voronko A., Merjvinsky A., Merjvinsky P. Microcircuitry of optoelectronic transceivers for speeds of 155 - 1250 Mbit/s. *7th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1997. P. 409–412. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання та розробка принципів, функціональних схем модулів ВОСП, написано початковий текст статті.

16. Voronko A., Merjvinsky A., Kiyashko G. Features of the estimation of data transmission errors for high-speed optical channels. *7th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1997. P. 415–416. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено розробку експериментальних стендів для аналізу помилок при передачі сигналів по оптичному волокну, вимірювання та обробка експериментальних даних, проаналізовано отримані результати.

17. Osinsky V., Voronko A., Bondarenko D., Orihovsky B. Influence of the electronic subsystem on transients in gigabit heterolasers. *7th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 1997. P. 413–416. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання, запропоновано ідею, проведено моделювання та розрахунки.

18. Осинский В. И., Воронько А. А., Мержвинский А. А., Белаш П. В. Некоторые подходы к созданию в Украине волоконно-оптических модулей. *НПК «Современные информационные и электронные технологии»*. Одесса, 2000. С. 9–10. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні вимірювання, запропоновано ідею, проведено розробку стендів для юстування.

19. Voronko A., Moskalenko M., Potapova G. Position-sensitive array of photosensitive elements with a record dynamic range. *III International Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2005» (SPIE)*. Vinnytsia, 2005. P. 201–202. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено розрахунки, проаналізовано отримані результати та проведено обговорення отриманих результатів зі співавторами.

20. Воронько А. А., Москаленко М. А., Потапова Г. К. Позиционно-чувствительная матрица фоточувствительных элементов для атомной силовой микроскопии наноразмерных элементов. *Материалы VII Международного российско-украинского семинара «Нанопфизика и Нанoeлектроника»*. Санкт-Петербург : НОК «Санкт-Петербургский Физико-технический научно-образовательный центр РАН», 2006. С. 95–96. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено основні розрахунки, проаналізовано отримані результати.

21. Osinsky V., Voronko A., Merjvinsky P. Development of a measuring complex for active optoelectronic components of FOCL. *11th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 2001. P. 407–411. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено основні розрахунки, проаналізовано отримані результати та проведено обговорення отриманих результатів зі співавторами.

22. Osinsky V., Voronko A., Merjvinsky P., Karpinsky K. Development of a set of measuring instruments for tuning and controlling the parameters of a fiber-optic path. *11th International conference «Microwave and telecommunication technologies»*. Sevastopol, 2003. P. 671–673. Особистий внесок здобувача: здобувачем запропоновано ідею, проведено експериментальні вимірювання, запропоновано ідею, поставлено завдання, проведено розрахунки, проаналізовано отримані результати.

23. Voronko A., Merjvinsky P. Application of microcontrollers in devices for measuring parameters of fiber-optic signals. *Second International Scientific Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2002» (SPIE)*. Vinnytsia, 2002. P. 205–207. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено постановка задачі, проведення досліджень, аналіз отриманих результатів.

24. Палагин А. В., Осинский В. И., Воронько А. А., Мержвинский П. А., Белаш П. В., Николаенко Ю. Е. Состояние и перспективы разработки и производства волоконно-оптических модулей в Украине. *Материалы международной конференции Укртелеком*. Киев, 2002. С. 167–179. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів сумісно зі співавторами.

25. Воронько А. А., Москаленко М. А., Потапова Г. К., Туровский А. А. Позиционно-чувствительная матрица фоточувствительных элементов со специальной топологией межсоединений для атомной микроскопии. *Труды девятой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии»*. Одесса, 2008. С. 120. Особистий внесок здобувача: здобувачем проведено постановка задачі, проведення досліджень, аналіз отриманих результатів.

АНОТАЦІЯ

Воронько А.О. Гетероструктури на основі твердих розчинів АЗВ5 для волоконно-оптичних систем передачі інформації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота спрямована на розроблення наукових та практичних засад створення і дослідження приладових гетероепітаксійних структур на основі твердих розчинів АЗВ5 та розробку на їх основі оптоелектронних модулів волоконно-оптичних систем передачі інформації. У роботі, методом високороздільної рентгенівської дифрактометрії, визначені параметри приладових гетероструктур на основі твердих розчинів АЗВ5 (досконалість кристалічної ґратки, товщини епітаксійних шарів, однорідність складу по площині), включаючи лазерні структури і надґратки, отримані методами рідиннофазної та газофазної епітаксіями.

Розроблено методіку та апаратно-програмне забезпечення процесу оптичного узгодження між активними оптоелектронними компонентами (лазерний діод, світлодіод, фотодіод) та оптичним волокном з мінімальними втратами. Для забезпечення точного позиціонування оптичного волокна був розроблений оптичний координатор на базі оригінальної позиційно-чутливої матриці.

В залежності від функціонального призначення була розроблена ціла лінійка приймально-передавальних модулів для швидкостей передачі: 155-1250 Мбіт/с, 10 Гбіт/с.

Ключові слова: гетероепітаксійна структура, рідиннофазна епітаксія, волоконно-оптична система передачі інформації, газофазна епітаксія, лазерний діод, матриця фоточутливих елементів, оптичне волокно.

АННОТАЦИЯ

Воронько А.А. Гетероструктуры на основе твердых растворов АЗВ5 для волоконно-оптических систем передачи информации. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена разработке научных и практических основ создания и исследования приборных гетероэпитаксиальных структур на основе твердых растворов АЗВ5 и разработке на их основе оптоэлектронных модулей волоконно-оптических систем передачи информации. В работе методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, определены параметры приборных гетероструктур на основе твердых растворов АЗВ5 (совершенство кристаллической решетки, толщины эпитаксиальных слоев, однородность состава по плоскости), включая лазерные структуры и сверхрешетки, полученные методом жидкофазной и газофазной эпитаксии.

Разработана методика и аппаратно-программное обеспечение процесса оптического согласования между активными оптоэлектронными компонентами (ЛД, СВД, ФД) и оптическим волокном с минимальными потерями. Для обеспечения точного позиционирования оптического волокна был разработан оптический координатор на базе оригинальной позиционно-чувствительной матрицы.

В зависимости от функционального назначения была разработана целая линейка приемо-передающих модулей и трансиверов для скоростей передачи: 155-1250Мбит / с, 10Гбит/с.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальная структура, жидкофазная эпитаксия, волоконно-оптическая система передачи информации, газофазная эпитаксия, лазерный диод, фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, оптическое волокно.

ABSTRACT

Voronko A.A. Heterostructures based on A3B5 solid solutions for fiber-optic information transmission systems. - Manuscript.

The dissertation on reception of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.27.01 - solid-state electronics. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work is devoted to development of scientific and practical bases of creation and research of instrumental heteroepitaxial structures on the basis of solid solutions of A3B5 and development on their basis of optoelectronic modules for fiber-optic data transmission systems (FODTS).

In the work, by high-resolution X-ray diffraction (HRXRD), the parameters (perfection of the crystal lattice, the thickness of the epitaxial layers, the homogeneity of the composition in the plane and depth etc.) of instrumental heterostructures based on solid solutions A3B5, including laser structures), which were obtained by methods of liquid-phase epitaxy (LPE) and metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). A comparative analysis of the application of these two technologies to obtain heteroepitaxial structures where performed. According to the results of the research, the optimal parameters of the technological process were determined: growth temperature, supersaturation; composition of the liquid phase of liquid-phase epitaxy, etc.

One of the important tasks in the development of fiber-optic modules FODTS is the optical matching of optoelectronic elements: light-emitting diode, laser diodes, photodiodes with optical fiber. Increasing the coupling light efficiency in to the optical fiber is one of the main tasks in the development of optoelectronic modules FODTS, as in the future it determines the efficiency of electron-optical conversion, which in turn reduces the operating currents of the semiconductor emitter and increases the service life of the module as a whole. In turn, for the receiving module, the optimal optical matching with the optical fiber allows to reduce the level of the reflected optical signal and increase the dynamic range of the fiber-optic path as a whole. To solve this problem, a method and hardware and software for the

process of optical matching between active optoelectronic components (LD, LED, PD) and optical fiber with minimal losses were developed.

To ensure accurate positioning of the optical fiber, an optical coordinator based on the original position-sensitive matrix was developed with such a topology of interconnections of photosensitive elements that allows to obtain a larger width of the tracking system and high steepness of direction finding characteristics.

When designing micro- and optoelectronic equipment, one of the most important problems is to ensure the optimal thermal regime of semiconductor elements, as increasing the temperature of the p-n junction of the semiconductor crystal leads to a significant reduction in the reliability of its operation. For semiconductor optoelectronic emitters, an increase in temperature leads to a decrease in radiation power and acceleration of degradation processes. In addition, spectral channel compression is widely used in fiber-optic communication systems. This requires high accuracy of stabilization of the wavelength of optical radiation, which, in turn, depends on the temperature of the p-n junction. To solve this problem, a new device for cooling and thermal stabilization of semiconductor devices with increased accuracy and speed of the thermal stabilization system of the semiconductor crystal, and due to this - expanding the functionality of the semiconductor device and increased reliability of such device during the work. An avalanche MDS photodetector was developed, in which the injection of hot carriers into the dielectric was eliminated and the internal stabilization of the avalanche multiplication factor was realized.

Depending on the functional purpose, a whole line of transceiver modules for transmission speeds 155-1250 Mbit / s has been developed, the possibility of increasing the transmission speed to 10 Gbit / s has been shown.

It is very important to solve the problem of measuring the parameters of optoelectronic modules both at the stage of their production and in the process of setting up and operating the optoelectronic path. Based on theoretical and experimental studies of LD, PD, LED parameters for information transmission systems, methods and software and hardware have been developed for comprehensive measurement of parameters, both individual optoelectronic components and receiving, transmitting modules FODTS as a whole.

During the adjustment and operation of fiber-optic digital information transmission systems it is necessary to control the parameters of optical circuits and signals in the communication line, as well as the modes of operation of active optical components. One of the segments of this task is to create a relatively simple measuring equipment of a new generation, characterized by manufacturability and improved performance. The developed and manufactured set of devices allows to measure the following characteristics and parameters of the fiber-optic path: attenuation of optical signals in single-mode and multimode optical fiber at the used wavelengths; transient characteristics of optical signals; stability of optical parameters of transmitting laser modules in time and under the influence of external factors; measurement and control of operational parameters of optical regenerators.

Keywords: heterostructure, liquid-phase epitaxy, fiber-optic data transmission system, metal organic chemical vapor deposition, laser diode, photodiode, matrix of photosensitive elements, optic fiber.