

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ПРИТЧИН СЕРГІЙ ЕМІЛЬОВИЧ

УДК 621.317.799+621.315.5

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПІДКЛАДОК АРСЕНІДУ
ГАЛІЮ ДЛЯ ВИРОБІВ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ**

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України на кафедрі інформаційно-управляючих систем

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Оксанич Анатолій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри інформаційно-управляючих систем

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Ковтун Геннадій Прокопович
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», завідувач лабораторії чистих металів і напівпровідникових матеріалів

доктор технічних наук, професор
Конакова Раїса Василівна
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, завідувач лабораторії фізико-технологічних проблем твердотільної НВЧ електроніки

доктор технічних наук, доцент
Єрохов Валерій Юрійович
Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри напівпровідникової електроніки

Захист відбудеться “28” “квітня” 2016 р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.04 в Харківському національному університеті радіоелектроніки: Україна, Харків, 61166, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, Харків, 61166, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий “25” березня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д64.052.04,
кандидат фізико-математичних наук

Пащенко О.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми Високочистий монокристалічний арсенід галію (GaAs) є одним з основних напівпровідникових матеріалів, який використовується у сучасній електронній промисловості. Широке застосування цієї сполуки обумовлюється її унікальними властивостями. Характеристики приладів, які виготовляються на основі GaAs, багато в чому перевищують параметри приладів, що виготовляються на основі кремнію та германію.

Вивченню властивостей і розробці технології вирощування GaAs, побудові пристроїв на його основі присвячені праці багатьох зарубіжних і вітчизняних учених. Можна назвати такі відомі імена, як Ямамото, Стілман, Дікарло, Бюрнер, Ж. І. Алфьоров, М. І. Мільвідський, В. Г. Литовченко, О. Є. Беляєв, Р. В. Конакова, М. К. Шейнкман, Г. П. Ковтун, А. П. Оксанич, М. Л. Дмитрук, І. Е. Марончук та інші.

Одним з напрямків застосування електронних приладів GaAs є СВЧ електроніка (створення приладів з частотами понад 250 ГГц.), зокрема радіомодулі смартфонів, обсяг продажів яких буде зростати на 15 -25% у рік, силова електроніка у вигляді швидкодіючих надпотужних ключів.

Іншим сегментом ринку арсеніду галію є сектор виробництва світлодіодів з високою яскравістю випромінювання. Забезпечення заднього підсвічування екранів ноутбуків, плоскопанельних екранів комп'ютерних моніторів і телевізорів призвело до зростання споживання високояскравих світлодіодів у 2015 році.

Сферою застосування GaAs, що активно розвивається, є ринок альтернативних джерел енергії. Не дивлячись на те, що в даний час основний обсяг виробництва фотоелектронних перетворювачів для сонячних електростанцій ґрунтується на кремнієвих елементах, арсенід галію з кожним роком займає все більш широкий сектор.

Велику роль GaAs відіграє у виробництві датчиків радіаційного випромінювання і у виробках ІЧ - оптики.

Для низки застосувань необхідні підкладки великих діаметрів, понад 100 міліметрів. До якості таких підкладок висуваються жорсткі вимоги із залишкових напружень, вмісту дислокацій та відхиленню від площинності.

При вирощуванні злитків GaAs внаслідок температурних градієнтів виникають залишкові напруження, які передаються у підкладки. Ці напруження також виникають при проведенні різноманітних механічних операцій виробництва підкладок, зокрема різанні та шліфуванні. Залишкові напруження призводять до руйнування злитків та підкладок. Зменшення рівня напружень можливе шляхом зменшення температурних градієнтів при вирощуванні злитків та удосконалення технології відпалу.

Для контролю рівня залишкового напруження у підкладках GaAs широко використовуються методи поляриметрії, в основі яких лежить вимір двопронепереломлення. У тому випадку, якщо двопронепереломлення є незначним, необхідно підготувати зразки товщиною в кілька міліметрів, щоб збільшити зсув фази, яка пропорційна товщині зразка. Підкладки GaAs для промислового застосування виготовляються товщиною 650 мкм для підкладок діаметром 100,0 мм. Вимір рівня залишкових напружень для такої товщини вимагає вдосконалення методу вимірюван-

ня, модернізації апаратури з метою збільшення чутливості вимірювального тракту, розробки нового програмного забезпечення, яке включає в себе цифрову обробку.

Відпал злитка – обов'язковий технологічний процес виробництва підкладок GaAs. Під час відпалу зменшуються термопружні напруження і, як наслідок, поліпшуються механічні властивості злитка й електричні характеристики підкладок.

Вирішення завдання вдосконалення технології й апаратури для відпалу злитка GaAs є актуальним завданням, як з наукової, так і з практичної точки зору.

При механічному шліфуванні, внаслідок впливу шліфувального матеріалу на підкладку, виникають дефекти, пов'язані з процесом обробки у вигляді мікрорельєфу та мікротріщин, які формують порушений шар підкладки. Глибина такого шару сягає 20–40 мкм, що не дозволяє отримувати якісні прилади. Актуальною є задача зменшення глибини шару до 10 мкм.

Пластична деформація підкладок під час високотемпературної обробки виникає внаслідок температурного градієнта між краєм і центром пластини. Деформація пластин призводить до викривлення форми й розмірів елементів топології інтегральних схем й впливає на один з важливих параметрів – сумарне відхилення від паралельності й площинності. Відхилення від площинності підкладок може ускладнити технологічні стадії, такі як фотолітографія, дифузія, епітаксія і т.п., а також може змінити електричні характеристики готових напівпровідникових пристроїв і мікросхем.

Водночас питання, пов'язані із завданням контролю відхилення від площинності напівпровідникових пластин і поліпшенням технології напівпровідникових пристроїв, ще залишаються актуальними й повинні бути далі досліджені.

Таким чином, вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення якості підкладок GaAs, конкурентоздатних на світовому ринку, можливо шляхом розробки нової технології виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки, що мають рівень залишкових напруг не більший за 40 МПа, густину дислокацій не більшу $1.3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ і відхилення від площинності не більше 2 мкм.

Для вирішення цього завдання необхідно провести цілий ряд досліджень і розв'язати питання, які зараз вирішені не повністю. Зокрема необхідна розробка низки математичних моделей, що описують формування внутрішніх напружень і дислокацій, потрібна розробка та удосконалення методів, методик і інженерно-технічних рішень для створення пристроїв контролю якості підкладок GaAs, розробка технологічних ланцюжків і операцій виготовлення підкладок.

Вирішення цих завдань є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Результатом буде збільшення виходу придатних виробів, а також збільшення обсягів виробництва епітаксціальних структур для виробів мікроелектроніки на основі арсеніду галію.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася автором на кафедрі інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, відповідно до державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології й наноматеріали на 2010–2014 роки» і пов'язана з реалізацією наступних науково-дослідних робіт: НДР «Розробка способів і методів експрес-контролю структурних недосконалостей у злитках монокристалічного кремнію й арсеніду галію» ДР №0106V000055; НДР

«Дослідження механізму формування термопружних напруг у пластинах кремнію, германію й арсеніду галію методом ІЧ-поляриметрії» ДР № 0109U002281; НДР «Дослідження впливу процесів тепломасопереносу на електрофізичні й структурні властивості монокристалічного кремнію й арсеніду галію в процесі їх вирощування» ДР № 0106V000056; «Створення сучасних технологій вирощування структурно досконалого арсеніду галію» ДР № 0114U003986; «Створення автоматизованих комплексів контролю параметрів напівпровідників» ДР № 0114U003987; госпдоговірної НДР «Розробка автоматизованої системи керування групою технологічних установок вирощування монокристалів арсеніду галію», госпдоговір № 214/11 – «ІУС-Галар» від 12.12.2011 р., замовник ПП «Галар», м. Світловодськ.

Мета дисертаційної роботи – вирішення актуальної науково-практичної проблеми – підвищення якості підкладок GaAs, які застосовуються для виробів мікроелектроніки, шляхом розробки та впровадження нової технології виготовлення підкладок, а також впровадження методик і апаратури неруйнівного контролю якості підкладок.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **задачі**:

- 1) провести аналіз стану і тенденцій розвитку технології вирощування злитків GaAs і виробництва підкладок, обґрунтувати необхідність розробки нових або модернізації існуючих технологічних процесів виробництва підкладок GaAs;
- 2) визначити вплив механічних властивостей GaAs на залишкові напруження у підкладках в залежності від кристалографічної орієнтації;
- 3) удосконалити метод, методику і розробити апаратуру неруйнівного контролю рівня залишкового напруження, відхилення від площинності та густини дислокацій у підкладках GaAs;
- 4) удосконалити метод вимірювання діаметра злитка GaAs у процесі вирощування, що забезпечує вимірювання діаметра з точністю не менше $\pm 1,5$ мм на ділянці з постійно заданим діаметром та густину дислокацій не більше 1.3×10^5 см⁻²;
- 5) розробити технологію для відпалу злитків, що забезпечують рівень залишкових напружень не більше 40 МПа на краях підкладки;
- 6) розробити технологію й устаткування для шліфування підкладок, що забезпечують рівень порушеного шару не більше 10 мкм;
- 7) визначити вплив технологічних обробок підкладок GaAs на їх деградаційну стійкість в ІЧ області.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення підкладок GaAs.

Предмет дослідження – залишкові напруження, відхилення від площинності та густина дислокацій у підкладках GaAs.

Дисертаційне дослідження базується на системному аналізі результатів сучасних теоретичних і прикладних розробок вітчизняних і зарубіжних вчених у галузі фізики напівпровідників і технологічних процесів виробництва об'ємних монокристалів. При вирішенні поставлених завдань використана теорія функціонала щільності для побудови моделей механічних властивостей підкладок GaAs, а також достатньо апробовані **методи дослідження**:

- метод фотопружності для дослідження внутрішніх напружень у підкладках GaAs;
- метод селективного травлення для контролю густини дислокацій;

- метод світлової інтерферометрії для контролю відхилення від площинності підкладок;
- метод рентгеноструктурного аналізу для визначення параметрів кристалічної решітки підкладки;
- метод рентгенівської дифрактометрії для визначення якості механічної обробки;
- метод електронної мікроскопії для визначення глибини порушеного шару підкладок;
- методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат дисертації полягає в розробці нової технології виробництва підкладок GaAs, удосконалення методів, методик і апаратури неруйнівного контролю якості підкладок.

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

1) Удосконалено математичну модель, що описує вплив кристалографічної орієнтації на механічні властивості підкладки GaAs, в якій, на відміну від існуючих, з метою підвищення точності розрахунків значень механічних параметрів підкладки GaAs для довільного кристалографічного напрямку було використано обчислення тензора пружної піддатливості в поверненій системі координат відносно базової, що забезпечує відхилення між розрахунковими значеннями модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона з експериментальними даними таке, що не перевищує 4,7 %.

2) Удосконалено математичну модель, яка дозволяє визначити вплив залишкових напружень на константи пружності c_{11} , c_{12} , c_{44} підкладок GaAs, в якій на відміну від існуючих враховується геометричне спотворення кристалічних ґрат, що дозволяє визначити умови забезпечення механічної стійкості підкладки GaAs. Вперше встановлено, що в діапазоні залишкових напружень до 60 МПа підкладки GaAs залишаються механічно стабільними, при значенні залишкового напруження більше 100 МПа відбувається порушення стійкості з подальшим руйнуванням підкладки;

3) Удосконалено математичну модель, що враховує вплив кристалографічної орієнтації підкладок GaAs на густину дислокацій, яка на відміну від існуючих описує механізм розмноження дислокацій п'ятьма системами ковзання у кристалі. Модель дала можливість розрахувати очікувану густину дислокацій для підкладок GaAs кристалографічної орієнтації (100) по кристалографічних напрямках [010] і [100].

4) Удосконалено метод ПЧ-поляриметрії для контролю залишкових напружень у підкладках GaAs, в якому для зменшення похибки вимірювання вперше враховується неспіввісність елементів оптичної системи та анізотропія підкладки. Метод забезпечує абсолютну похибку неруйнівного контролю залишкових напружень з абсолютною похибкою, яка не перевищує ± 2 МПа.

5) Удосконалено метод контролю щільності дислокацій у підкладках GaAs, в якому вперше забезпечується контроль як скупчення дислокацій, так і поодиноких дислокацій. Метод забезпечує проведення контролю щільності дислокацій підкладок GaAs кристалографічної орієнтації (100) і (111) з відносною похибкою

30 %. Встановлено, що найбільшу густину дислокацій мають підкладки, виготовлені з верхньої частини злитку, а найнижчу – з нижньої частини.

6) Отримав подальший розвиток ваговий метод вимірювання діаметра злитка GaAs у процесі його вирощування, в якому для зменшення похибки виміру діаметра вперше методом повнофакторного експерименту визначені збуджуючі фактори, які впливають на точність виміру ваги злитка, що дозволило забезпечити абсолютну похибку вимірювання діаметру не більш $\pm 1,5$ мм для злитка діаметром 100 мм, та зменшити коливання швидкості вирощування на 15% і, як наслідок, зменшити рівень залишкових напружень у верхній частині злитка на 25% та зменшити щільність дислокацій у верхній частині злитка на 10% .

7) Уточнено наукові дані про механізм відпалу підкладок GaAs і встановлено, що значну роль у процесі релаксації залишкових напружень при відпалі грають температурні градієнти, а температура відпалу має менш значний вплив. Обґрунтовані параметри відпалу, які становили: нагрівання з температурним градієнтом 100 °C/год. до температури 920 °C, витримка при температурі 920 °C впродовж 5 годин, охолодження з температурним градієнтом 100 °C/год., що дозволило знизити рівень залишкових напружень до такого, що не перевищує 40 МПа.

8) Уточнено наукові дані про механізм шліфування підкладок GaAs, та визначені обмеження на режими шліфування у залежності від товщини підкладки та відхилення від площинності підкладки, що дозволило знизити рівень порушеного шару у підкладці GaAs до 10 мкм.

Практична цінність одержаних результатів: Отримані в дисертації результати з розробки технології виготовлення підкладок GaAs дозволяють підвищити якість підкладок в умовах промислового виробництва за рахунок розробленої технології, удосконалених методик, методів та розроблених пристроїв, зокрема:

- удосконалені промислові методи контролю залишкових напружень і щільності дислокацій в підкладках GaAs;

- удосконалені промислові методики контролю відхилення від площинності підкладок;

- розроблено пристрій вимірювання залишкових напружень «Полярон-4» для виміру залишкових напружень у підкладках GaAs, який забезпечує проведення неруйнівного контролю залишкових напружень з абсолютною похибкою ± 2 МПа, розроблено пристрій вимірювання відхилення від площинності підкладок «АКІДП 1», який дозволяє будувати профіль деформації підкладки. Величина абсолютної похибки методу дорівнює 0,8 мкм, розроблено пристрій визначення щільності дислокацій в підкладках «ТВ-Діслок 1» для визначення щільності дислокацій у підкладках GaAs телевізійним методом з відносною похибкою 30 %, розроблено пристрій шліфування підкладок «САШ-АМ»;

- удосконалено метод виміру діаметру злитка в процесі вирощування з абсолютною похибкою $\pm 1,5$ мм;

- розроблено технологію виробництва підкладок GaAs, яка забезпечує збільшення відсотку виходу придатних приладів на 5–7 %.

Результати дисертаційного дослідження використані в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України при виконанні науково-дослідних робіт з теми № III-10-12 «Розробка сучасних напівпровідникових матеріалів і структур для опто-, мікро- і сенсорної електроніки» (Державний реєстр. №0112U002102) (акт використання від 20.05.2013 р.); у НДІ Особливо чистих матеріалів (акт використання від 03.03.2013 р.).

Впроваджені у виробництво на ЧП «Галар» з економічним ефектом 200 тис. грн. (акт впровадження від 24.05.2013 р.)

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (акт впровадження від 25.08.2015 р.).

Акти про використання результатів дисертаційного дослідження наведені у додатках.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у визначенні мети роботи та її загальної концепції, обґрунтуванні актуальності роботи, постановці конкретних задач теоретичних і експериментальних досліджень, виборі об'єктів та методів досліджень, їх практичної реалізації, обробці та інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків та узагальнень. Автору належить домінуюча роль у формулюванні наукових положень та всіх основних висновків дисертації. Науковий консультант професор Оксанич А. П. брав активну участь у постановці більшості задач, плануванні експерименту та обговоренні результатів. Сформульовані в дисертації наукові результати, висновки та рекомендації належать особисто автору і є його науковим внеском.

У роботах, опублікованих разом із співавторами, дисертантові належать: [1, 2, 19, 21, 29, 32] – аналіз існуючого та обґрунтування вимог до нового технологічного процесу підготовки підкладок GaAs, розробка структурної схеми, алгоритмів і програмного забезпечення для вдосконаленого верстата алмазного шліфування, удосконалення технології підготовки підкладок; [3, 8, 20] – розробка концепції побудови пристрою виміру густини дислокацій у підкладках GaAs, розробка методу й методики виміру густини дислокацій, розробка алгоритмічного забезпечення пристрою; [4, 5, 6, 13, 26, 34, 35, 52-55] – концепція побудови пристрою виміру залишкових напружень у підкладках GaAs, визначення шляхів підвищення точності виміру залишкових напружень, розробка структурних схем і програмного забезпечення; [27, 37, 38, 39, 50, 51] – розробка методу і методики виміру залишкових напружень у підкладках GaAs; [7, 33, 34, 36, 40, 42] – розробка концепції й процедури визначення, температурних полів і термопружних напружень у злитках GaAs; [9, 17, 25, 48] – розробка технології відпалу злитків і підкладок GaAs, визначення режимів відпалу злитків і підкладок, аналіз впливу режимів відпалу на оптичні властивості підкладок; [10, 14, 18, 44, 45, 48] – удосконалення методу виміру діаметра злитка GaAs у процесі його росту, синтез структурної схеми модернізованої ростової установки вирощування злитків GaAs; [11] – удосконалення методу і розробка методики контролю відхилення від площинності підкладок GaAs; [12, 28, 30, 31] – виготовлення дослідних зразків, участь в експериментах і аналіз отриманих даних зі збільшення деградаційної стійкості й поліпшення ПЧ пропускання; [15, 16, 22, 23, 24, 43, 46, 47] – розробка математичної моделі й

визначення впливів кристалографічної орієнтації на механічні властивості підкладок GaAs.

Апробація роботи. Усі аспекти, які були викладені у дисертації, були надруковані в провідних наукових журналах і доповідалися на міжнародних та вітчизняних конференціях: III Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційна техніка та електромеханіка – ІТЕМ-2005» (19–21 квітня 2005 р., Луганськ, Україна); Ювілейна X Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок (МКФТТП-Х).– (16–21 травня 2005 р., Івано-Франківськ, Україна); III Міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології – МЕПІТ-3» (21–23 травня 2008 р., Кременчук, Україна); IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників – УНКФН-4 (16–20 серпня 2009 р., Запоріжжя, Україна); III Міжнародна наукова конференція «Функціональна компонентна база мікро-, опто- и наноелектроніки» (28 вересня – 2 жовтня 2010 р. Харків – Кацивелі, Україна); VI Міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» – МЕПІТ-4 (19–21 травня 2010 р., Кременчук, Україна); VI Міжнародна науково-практична конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» – СЕМСТ-4 (28 червня – 2 липня 2010 р., Одеса, Україна); V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (9–15 жовтня 2011 р., Ужгород, Україна); IV Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» – МРФ – 2011 (18–21 жовтня 2011 р., Харків – Кацивелі, Україна); I Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» – НМІТФ-2011 (5–7 травня 2011 р., Кременчук, Україна); X Міжнародна науково-практична конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (7–9 листопада 2011 р., Кременчук, Україна); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Силова електроніка і енергоефективність» (1–2 вересня 2012 р., Алушта, Україна); III Міжнародна науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (14–16 березня 2012 р., Запоріжжя, Україна); V Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки», (30 вересня – 5 жовтня 2012 р., Харків – Кацивелі, Україна); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: (2–4 листопада 2012 р., Кременчук, Україна); IV Міжнародна науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (13–16 березня 2013 р., Запоріжжя, Україна); II Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (22–24 травня 2013 р., Кременчук, Україна); VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (23–27 вересня, 2013 р., Чернівці, Україна); VI Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки» (30 вересня — 4 жовтня 2013 р., Алушта, Україна); VIII Міжнародна науково-практична конференції «Розвиток наукових досліджень–2013», (25–27 листопада 2013 р., Полтава, Україна); III Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (20–23 травня 2014 р., Кременчук, Україна); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (7–9 листопада 2014 р., Кременчук, Україна); I Міжнародний

форум «ІТ-Тренди: великі дані, штучний інтелект, соціальні медіа» (21–22 листопада 2014 р., Кременчук, Україна).

Публікації. У дисертації узагальнено наукові результати, опубліковані у 56 працях, у тому числі: 26 робіт у спеціалізованих наукових виданнях, які входять до переліку ДАК України, з них 23 – у журналах, які входять до міжнародних наукометричних баз (з них 6 – одноосібні публікації), 3 патенти на винахід (Україна) і 27 – у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шістьох розділів, п'ять з яких – оригінальні, висновків і списку використаних джерел (207 найменувань). Повний обсяг дисертації становить 332 сторінки, основного тексту – 278 сторінок, 145 рисунків і 25 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й задачі роботи, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про структуру дисертації, апробацію її результатів, публікації.

У **першому розділі** виконано критичний аналіз існуючої технології вирощування злитків GaAs, технології виробництва підкладок GaAs, методів та пристроїв контролю якості підкладок, зокрема залишкових напружень, густини дислокацій та відхилення від площинності. Розглянуто вплив параметрів технологічного процесу на властивості підкладок GaAs.

У більшості практичних випадків вирощування об'ємних кристалів GaAs супроводжується виникненням внутрішніх макронапружень, які не тільки визначають формування дислокаційної структури в процесі росту, але й значною мірою впливають на механічні та фізичні властивості вирощених кристалів. Основним технологічним фактором, що призводить до появи дислокацій у злитках GaAs і, як наслідок, у підкладках, є термопластичні напруження, які виникають у результаті високих температурних градієнтів.

Існуючі методи визначення внутрішніх напружень у підкладках GaAs дають велику похибку. У тому випадку, якщо двопроменепереломлення є невеликим, необхідно готувати зразки товщиною в кілька міліметрів, щоб збільшити зсув фази, яка пропорційна товщині зразка.

Вимірювання відхилення від площинності підкладок GaAs має низку особливостей, які пов'язані, насамперед, з великим рівнем внутрішніх напружень. У результаті цього товщина пластини GaAs значно, майже в два рази, перевищує товщину пластини кремнію, що призводить до необхідності використовувати високоточні неруйнівні методи.

Процес шліфування призводить до виникнення залишкових напружень, які залежать від властивостей оброблюваного матеріалу, характеристик круга і параметрів режиму шліфування. Для отримання експериментальних даних та оптимізації процесу шліфування GaAs структур у промислових умовах виникає необхідність розробки промислового устаткування. Виконаний критичний аналіз існуючих методів підготовки підкладок дозволив зробити висновок про те, що не до

кінця вирішені питання шліфування підкладок.

Аналіз існуючих підходів до виробництва підкладок GaAs і вирішення завдань удосконалення технології підготовки підкладок показав, що виробництво підкладок GaAs має низку особливостей, що відрізняє виробництво підкладок GaAs від виготовлення підкладок кремнію. Арсенід галію більш складний у вирощуванні матеріал, що викликано його природою як сполуки A_3B_6 . Густина дислокацій в арсеніді галію набагато вища, ніж в кремнії, і рівень внутрішніх напружень також вищий. У результаті цього в процесі механіко-хімічних обробок підкладок високий відсоток браку, як самих підкладок, так і виробів на основі GaAs. Оцінка сучасного стану технології виробництва підкладок GaAs дозволила зробити висновок, що основними проблемами технології виготовлення підкладок GaAs в умовах промислового виробництва є великий рівень залишкових напружень і велика густина дислокацій, які формується у процесі вирощування. Недосконалість методів і методик вимірювання параметрів підкладок GaAs і, зокрема, відхилення від площинності підкладок, рівня залишкових напруг і щільності дислокацій не дозволяє виконувати вхідний контроль підкладок. Якість шліфування підкладок не дозволяє зменшити глибину порушеного шару. Виконаний огляд літератури дозволяє зазначити, що на сьогодні в технології виготовлення підкладок GaAs діаметром 80–100 мм склалася наступна ситуація:

- якість підкладки GaAs визначається якістю злитка, з якого виробляється підкладка. Основним технологічним фактором, що призводить до появи дислокацій у злитках GaAs, є термопластичні напруження, що виникають у результаті високих температурних градієнтів, які, в свою чергу, залежать від параметрів процесу вирощування;

- не до кінця вирішена задача моделювання процесу формування дислокацій, залишкових напружень і відхилення від площинності в підкладках GaAs і впливу на ці параметри технології виробництва підкладок;

- існуючі методи підготовки підкладок призводять до великої величини порушеного шару, що є джерелом браку кінцевого продукту і механічного руйнування підкладок на етапі епітаксії. Найбільш не вирішеним завданням процесу підготовки є шліфування;

- не вирішена задача впливу процесу відпалу на структурну досконалість і залишкові напруження у підкладках GaAs, що не дозволяє отримувати підкладки з високою якістю;

- відсутні апаратура і методики для експрес-вимірювань в умовах промислового виробництва густини дислокацій, рівня залишкових напружень і відхилення від площинності в підкладках GaAs з необхідною точністю.

У другому розділі розроблено математичні моделі, які описують вплив кристалографічної орієнтації та залишкових напружень на механічні властивості і густину дислокацій у підкладках GaAs.

Як відомо, арсенід галію є анізотропним кристалом. У роботі удосконалено модель, яка описує вплив кристалографічної орієнтації на механічні властивості підкладок GaAs. В окремому випадку при куті φ , рівному 0, значення модуля Юнга можна визначити за такими виразами:

$$E_{[100]} = c_{11} - 2 \times \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} c_{12}; \quad (1)$$

$$E_{[110]} = 4 \times \frac{(c_{11}^2 + c_{12}c_{11} - 2c_{12}^2)c_{44}}{2c_{44}c_{11} + c_{11}^2 + c_{11}c_{12} - 2c_{12}^2}; \quad (2)$$

$$E_{[111]} = 3 \times \frac{c_{44}(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + 2c_{12} + c_{44}}; \quad (3)$$

де c_{11} , c_{12} , c_{44} – константи пружної жорсткості.

Для удосконалення моделі, з метою підвищення точності розрахунків значень механічних параметрів підкладки GaAs для довільного кристалографічного напрямку було використано обчислення тензора пружної піддатливості у поверненій системі координат відносно базової. Переписавши узагальнений закон Гука у вигляді:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (4)$$

можна записати зворотний тензор пружної жорсткості при виконанні повороту як:

$$C'_{ijkl} = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 Q_{pi} Q_{qj} Q_{rk} Q_{sl} C_{pqrs}. \quad (5)$$

де Q_{ij} – елементи матриці напрямних косинусів. Тензор пружної піддатливості може бути знайдений як:

$$S = \text{inv } C'^{-1}. \quad (6)$$

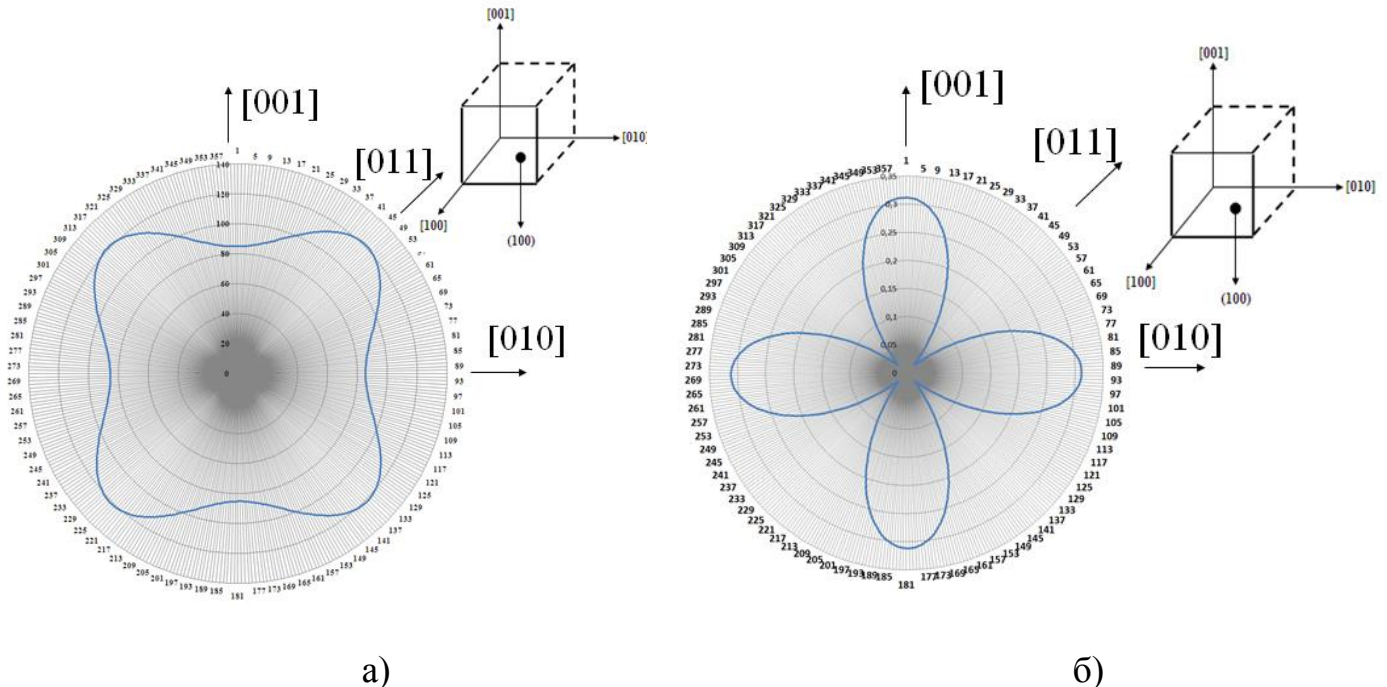


Рис. 1 – Результати розрахунку значення модуля Юнга (а) і коефіцієнта Пуассона (б)

Тоді модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона для довільної кристалографічної орієнтації визначаються виразами (7) і (8) відповідно.

$$E'_i = \frac{\sigma'_i}{\varepsilon'_i} = \frac{1}{s'_{ii}}, \quad (7)$$

де i може приймати значення $i = 1, 2, 3$.

$$\nu'_{ij} = -\frac{\varepsilon'_j}{\varepsilon'_i} = -\frac{s'_{ij}}{s'_{ii}} = -\frac{s'_{ji}}{s'_{ii}}, \quad (8)$$

де i, j може приймати значення $i, j = 1, 2, 3$

Розраховані значення модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона для довільної кристалографічної орієнтації підкладки GaAs орієнтації (100) наведені на рис. 1.

Зіставлення розрахованих значень з отриманими експериментальними даними для кутів кратних 45° показує збіг між розрахунковими і експериментальними даними. Відхилення між розрахунковими і експериментальними даними не перевищує 4,7 %.

Таблиця 1 – Абсолютне значення відхилення розрахункових даних від експериментальних значень для модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона, %

Параметр	Орієнтація (100)			Орієнтація (111)	Орієнтація (110)		
	[001]	[011]	[010]	[111], [1 $\bar{1}$ 0], [$\bar{1}$ 12]	[001]	[1 $\bar{1}$ 1]	[1 $\bar{1}$ 0]
Модуль Юнга, ГПа	4,7	2,6	4,7	0,4	4,7	2,5	4,7
Коефіцієнт Пуассона	1,57	1,4	1,57	1,4	1,57	4,71	1,57

Розроблено модель, за допомогою якої можна розрахувати вплив залишкових напружень на механічні властивості підкладок GaAs. Для моделювання механічних властивостей під тиском у роботі використовувався метод збереження деформації в об'ємі, оскільки цей метод дозволяє розрахувати пружні константи, використовуючи коефіцієнти напружено-деформованого стану, які використовуються для розрахунку швидкості пружних хвиль у твердому тілі.

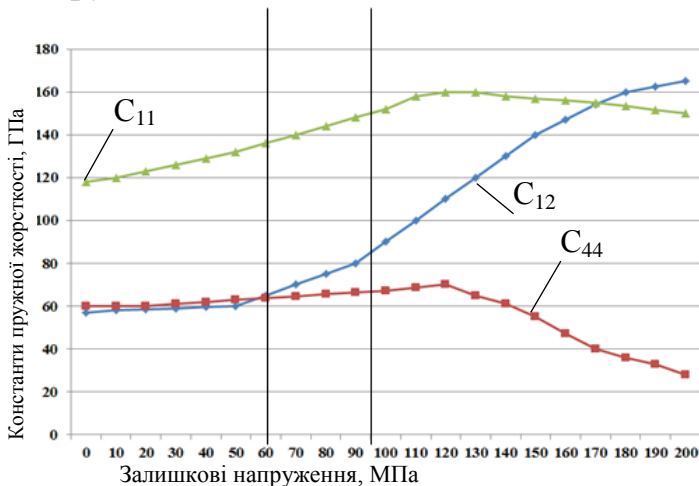


Рис. 2 – Розраховані значення констант пружної жорсткості c_{11} , c_{12} , c_{44} залежно від величини залишкових напружень

збільшення значення констант пружної жорсткості, при цьому найбільший приріст спостерігається у константи c_{12} .

Для оцінки стійкості підкладок до механічного руйнування в арсеніді галію під дією залишкових напружень було застосовано умову:

$$c_{44} > 0, \quad c_{11} > c_{12}, \quad c_{11} - 2 * c_{12} > 0 \quad (9)$$

Встановлено, що в діапазоні залишкових напружень до 60 МПа підкладки GaAs залишаються механічно стабільними. При значенні залишкового напруження такого, що дорівнює 100 МПа, відбувається порушення умови (9), що призводить до втрати механічної стійкості. За допомогою моделі було розраховано вплив залишкових напружень на значення модуля Юнга. Результати розрахунку наведено на рис. 3.

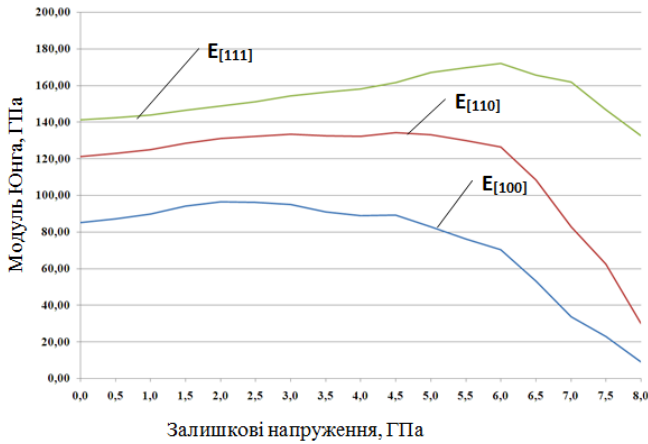


Рис.3 – Результати моделювання впливу залишкових напружень в підкладці GaAs на модуль Юнга.

У роботі показано що модуль Юнга зі збільшенням значення залишкових напружень починає зменшуватися, що свідчить про зменшення здатності підкладки чинити опір розтягуванню або стисненню при пружній деформації.

Розроблено модель, що описує вплив кристалографічної орієнтації підкладок GaAs на густину дислокацій, яка, крім термпружних напружень, враховує кристалографічні напрямки.

У моделі швидкість руху дислокацій визначалася виразом:

$$\dot{N}_m = Kk_0 N_m e^{-Q/RT} (\sqrt{J_2} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^{p+\lambda} \quad (10)$$

де K – константа, значення якої в моделі приймалося рівним 0,007 m / N,

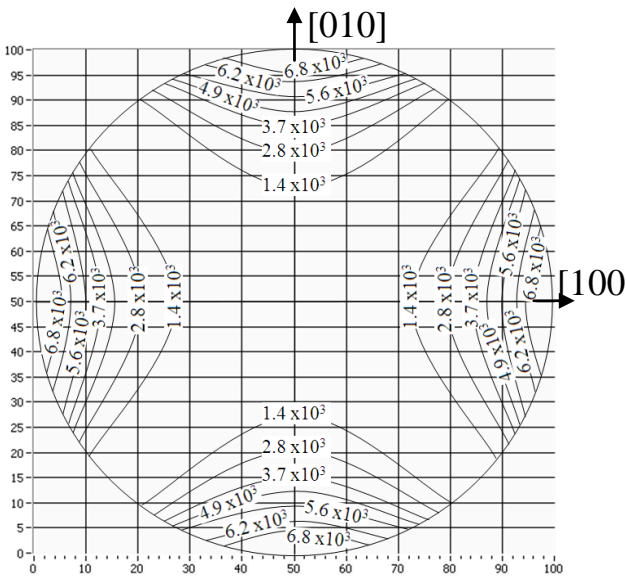


Рис. 4 – Розрахована щільність дислокацій (см⁻²) у пластині орієнтації (100) для систем ковзання $(\bar{1}\bar{1}1)[\bar{1}10]$, $(\bar{1}\bar{1}1)[110]$, $(\bar{1}\bar{1}1)[\bar{1}10]$ и $(111)[\bar{1}\bar{1}0]$

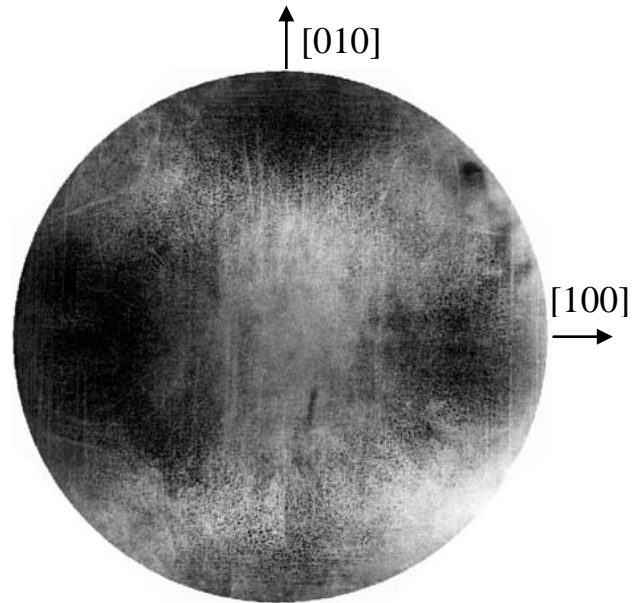


Рис. 5 – Розподіл густини дислокацій у підкладці арсеніду галію діаметром 100 мм., кристалографічна орієнтація (100). Відбите світло

D – коефіцієнт механічного зміцнення =3,13N/m, k – постійна Больцмана,

J_2' – другий інваріант тензора пружної піддатливості, Nm – початкова густина дислокації, яка дорівнює $1 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Для визначення впливу анізотропії на густину дислокацій було визначено радіальне напруження σ_r , осьове напруження σ_z , азимутальне напруження σ_θ і напруження зсуву τ_{rz} .

У третьому розділі розроблено методики неруйнівного контролю залишкових напружень, густини дислокацій та відхилення від площинності.

Для вимірювання рівня залишкових напружень в промислових умовах використовують метод полярископії. У тому випадку, якщо величина залишкових напружень є порівняно невеликою, для даного методу необхідно готувати зразки товщиною в кілька міліметрів, щоб збільшити різницю ходу. Підкладки GaAs для промислового застосування виготовляються товщиною 650 мкм для підкладок діаметром 100,0 мм, що призводить до похибок вимірювання.

Враховуючи, що поляриметр є оптико-електронною системою, помилки методу можна звести до двох груп:

- помилки приймального тракту;
- помилки оптичного тракту, викликані похибками орієнтації аналізатора і поляризатора щодо головної осі випромінювання.

В оптичному тракті загальна інтенсивність випромінювання може бути записана як:

$$I_r(\varphi) \approx G_r(\varphi) \sin^2 2(\varphi - \psi) \sin^2(\delta/2) + I_d^\perp(\varphi) G_r(\varphi) / I_s(\varphi) \quad (11)$$

де $G_r(\varphi)$ – чутливість приймального тракту, φ – кут повороту поляризатора, ψ – кут двопронепереломлення, χ – кут повороту аналізатора.

У виразі (11) перший доданок визначає корисний сигнал, а другий доданок – перешкоду.

У роботі встановлено, що рішення задачі зменшення похибки вимірювання залишкових напружень можливе за умови використання у схемі поляриметра фазочутливого контуру і високочутливого фотоприймача. Збільшення чутливості приймального тракту можливе шляхом введення цифрової обробки вхідного сигналу. У цьому випадку параметри δ і ψ можуть бути визначені як середнє зважене для вимірних значень $I_r(\varphi)$, мінімізуючи при цьому вплив шумової складової корисного сигналу.

Помилки оптичного тракту викликаються неспіввісністю аналізатора, поляризатора і чвертьхвильових пластин. Отримані результати вимірювання співвісності чвертьхвильових пластин та групи аналізатор-поляризатор показані на

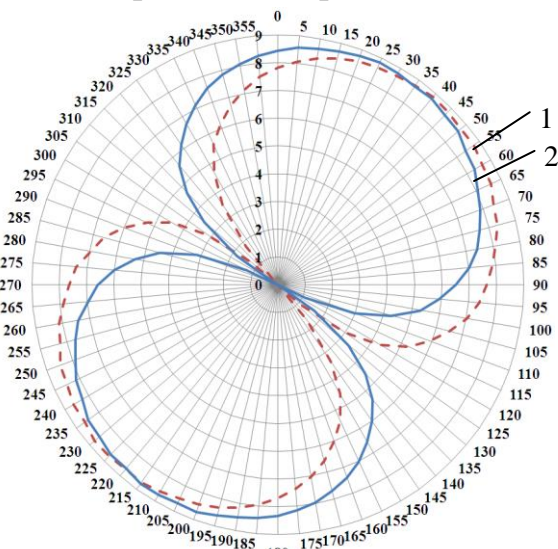


Рис 6 – Залежність інтенсивності ІЧ-випромінювання від кута повороту чвертьхвильової пластини при закріпленому поляризаторі та аналізаторі. 1 – теоретичні значення; 2 – експериментальні значення

рис. 6. Схема полярископа може бути описана наступним рівнянням:

$$S_i = P(\beta_i)M(\alpha_i, \frac{\pi}{2})M(\theta, \delta)M(\frac{\pi}{4} + \Delta\phi, \frac{\pi}{2})P(0)S_0 \quad (12)$$

де α_i і β_i є кутами повороту чвертьхвильової пластини.

Для другої пластини систематична помилка зсуву фаз неспіввісностістю виражається виразом:

$$\Delta\delta = 2\Delta\alpha \sin 2\theta \sin^2 \delta \quad (13)$$

Аналіз випадкової і систематичної похибки оптичного тракту дозволив визначити, що помилка установки поляризатора $\pm 1^\circ$ призводить до похибки вимірювання 0,5 МПа, погрішності в установці чвертьхвильових пластин $\pm 1^\circ$ призводять до помилки вимірювання 0,7 МПа.

У роботі розроблена методика контролю густини дислокації телевізійним методом.

Проведення операції контролю дислокацій ускладнюється для підкладок GaAs діаметром 100 мм, які виготовляються товщиною 650 мкм і більше. Для виявлення дислокацій часто використовують кислотні селективні і неселективні травители. Недоліком даних травителів є те, що вони являють собою сильно концентровані кислоти, такі як плавикова, сірчиста і азотна. Робота з такими травителями в умовах серійного виробництва має певні труднощі. Аналіз результатів дослідження травителів дозволив зробити висновок про придатність для травлення підкладок GaAs травителя на основі щавлевої кислоти. Перевагою даного травителя є порівняно низька температура травлення, близько 70°C , при нетривалому часі травлення.

Для складання карти розподілу дислокацій за площею підкладки в роботі запропоновано план вимірювання, який дозволяє проводити вимірювання з більш частим кроком, як по осі X, так і по осі Y поверхні підкладки, ніж існуючі плани.

План вимірювання, який реалізує запропоновану методику, показаний на рис 7.

План передбачає, що відстань між зонами вимірювання не повинна бути менша, ніж діаметр зони вимірювання. Зони вимірювання повинні розташовуватися в осередках прямокутної сітки, як показано на рис. 7. Відстань між вузлами сітки не повинна перевищувати $d/10$, де d – діаметр підкладки. Щільність дислокації у зоні вимірювання може бути розрахована у відповідності з виразом:

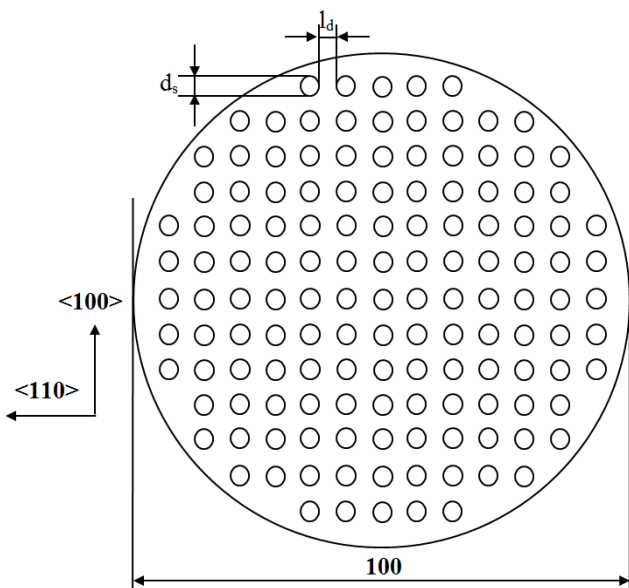


Рис. 7 – Повний план вимірювання дислокацій підкладки GaAs: d_s – діаметр зони вимірювання, l_d – відстань між зонами вимірювання

Відстань між зонами вимірювання не повинна бути менша, ніж діаметр зони вимірювання. Зони вимірювання повинні розташовуватися в осередках прямокутної сітки, як показано на рис. 7. Відстань між вузлами сітки не повинна перевищувати $d/10$, де d – діаметр підкладки. Щільність дислокації у зоні вимірювання може бути розрахована у відповідності з виразом:

$$N_{ds} = N / S_d \quad (14)$$

де N – кількість видимих дислокацій в зоні вимірювання.
Отже, густина дислокації підкладки GaAs визначиться як:

$$N_d = \frac{1}{i} \sum N_{ds} \quad (15)$$

де i – кількість зон вимірювання.

У роботі розглянуто похибки методу інтерференційної мікроскопії, який взято в якості базового для контролю відхилення від площини. Встановлено, що основними джерелами похибки є:

- похибки механічної конструкції, які включають в себе похибки установки корундових наконечників, похибки механізму переміщення об'єктива і похибки установки індуктивного датчика;

- похибка індуктивного датчика переміщення об'єктиву;

- похибка розпізнавання лінії інтерференції.

Сумарну похибку, яка виникає, можна розділити на систематичну і випадкову. Систематична похибка викликана неточністю установки корундових наконечників, помилками механізму переміщення об'єктива і помилкою установки індуктивного датчика. Випадкова похибка викликана похибкою індуктивного датчика переміщення об'єктива і похибкою розпізнавання лінії інтерференції. Систематичну похибку можна усунути шляхом виконання калібрування за еталонним зразком з відомою непаралельністю сторін.

В якості такого зразка було взято пластини плоско-паралельні скляні типу ПІ100 НИЖНІ, виготовлені за ГОСТ 15150-69.

Похибки, викликані розпізнаванням ліній інтерференції, виникають у результаті телевізійної обробки інтерференційних смуг. Точність положення інтерференційних смуг цим методом залежить від технічних характеристик відеооптичної системи, що складається з відеокамери з об'єктивом, пристрою оцифрування відеосигналу і якості одержуваного відеозображення.

Відеозображення вводиться у комп'ютер і перетворюється у відеомасив, після чого проводиться дослідження отриманого масиву по рядках, визначаються базові рівні яскравості й зони інтересу. Таким чином розпізнавання ліній інтерференції зводиться до знаходження кроків, при яких похідна, що визначає різку зміну яскравості, має максимальне і мінімальне значення при проході з лівого і правого краю лінії сканування. Положення інтервенційної лінії визначається формулою:

$$H_L = (\nabla^2 f(x, y)) * K \quad (16)$$

де $\nabla^2 f(x, y)$ – перший максимум похідної в пікселях; K – коефіцієнт масштабування (мм / піксель), який визначає відношення різниці між двома сусідніми пікселями до фізичного розміру в мм.

Коефіцієнт K залежить від фокусної відстані об'єктива. Він визначається практичним методом шляхом вимірювання відхилення від паралельності підкладки і подальшим порівнянням виміряних значень з фактичним відхиленням, обумовленим у контрольних точках мікрометром і розрахунком одержуваного значення K за

формулою:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^n H_f}{\sum_{n=1}^n H_p} \quad (17)$$

де n – кількість точок вимірювання; H_f – фактичне відхилення від горизонтальної площини пластини в мкм; H_p – вимірне відхилення від горизонтальної площини пластини в мкм.

У четвертому розділі виконано удосконалення методів та розробку пристроїв неруйнуючого контролю якості підкладок GaAs.

Для підвищення чутливості вимірювання залишкового напруження в підкладках GaAs, в роботі запропоновано структурну схему пристрою вимірювання залишкових напружень, яка показана на рис. 8.

Структурна схема включає в себе інфрачервоний газовий одномодовий лазер ЛГ-79-1 з довжиною хвилі 3,39 мкм та потужністю випромінювання 12 мВт і діаметром пучка – 2 мм. Для підвищення чутливості приймального тракту у схему введений механічний модулятор (1) з частотою модуляції 3 кГц, з приводом (3), який керується ПІД регулятором (4). Після чвертьхвильової пластини (6) поляризація стає еліптичною і надходить на вимірювану підкладку GaAs (9), укріплену в сканатор (7). Для зменшення темного струму приймач ІЧ випромінювання виконаний на базі фоторезистора PbSe (12) з активним елементом 2x2 мм і термостатом при температурі $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (13). Сигнал з приймача через підсилювач (14) надходить на смуговий фільтр (16) з частотою 3 кГц і через АЦП (17) надходить в ЕОМ. Для виділення зсуву фази сигналу служить фазовий детектор (15).

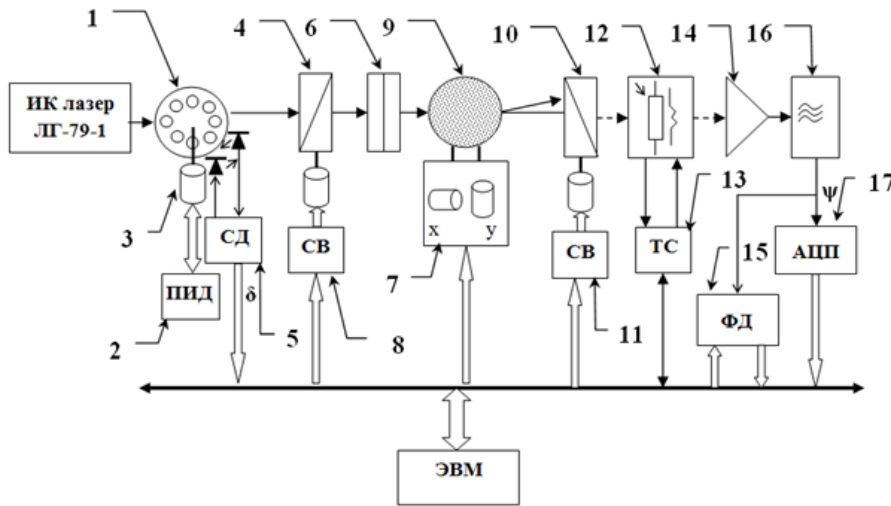


Рис. 8 – Структурна схема пристрою вимірювання залишкових напружень «Полярон - 4»

Для визначення зсуву фази δ у схему введений синхронний детектор СД (5). Схема містить поляризатор (4) і аналізатор (10), що обертаються та управляються синхронізаторами обертання СВ (8,11) з точністю визначення кута повороту $0,05^{\circ}$ і частотою обертання 1 об / сек. Після чвертьхвильової пластини (6) поляризація стає еліптичною і надходить на вимірювану підкладку GaAs (9), укріплену в сканатор (7). Для зменшення темного струму приймач ІЧ випромінювання виконаний на базі фоторезистора PbSe (12) з активним елементом 2x2 мм і термостатом при температурі $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (13). Сигнал з приймача через підсилювач (14) надходить на смуговий фільтр (16) з частотою 3 кГц і через АЦП (17) надходить в ЕОМ. Для виділення зсуву фази сигналу служить фазовий детектор (15).

У роботі визначені функції, які покладаються на програмне забезпечення пристрою «Полярон - 4»:

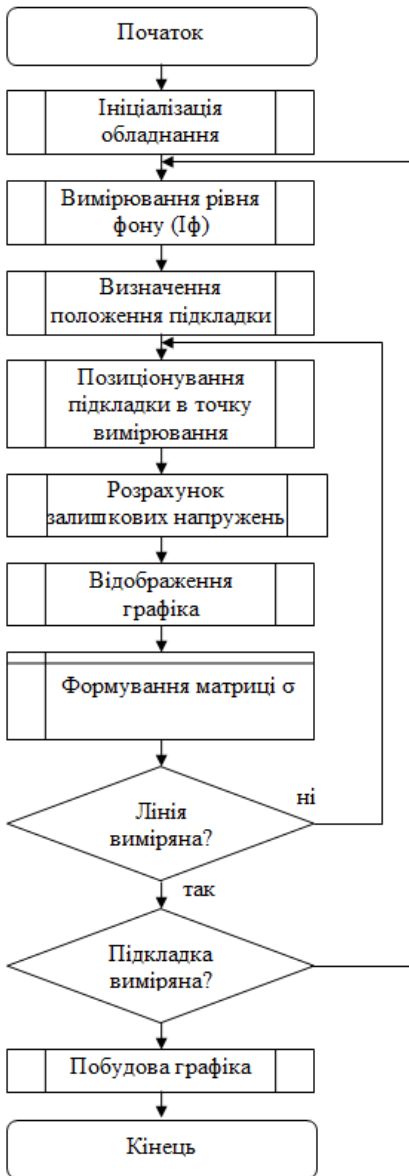


Рис. 9 – Алгоритм роботи пристрою «Полярон - 4»

вані значення в точках вимірювання.

Для графічного відображення результатів вимірювання була розроблена окрема підпрограма, що виводить дані у вигляді 3D графіка, у вигляді колірних полів і у вигляді ізонапружень. Дані підпрограма може отримувати з архівних файлів і безпосередньо в процесі вимірювання. Крім відображення загальної картини розподілу залишкових напружень, підпрограма відображає лінію сканування в рівнях інтенсивності (рис. 11).

- вимірювання синусоїдальної і косинусоїдальної складової вхідного сигналу;
- розрахунок значення залишкового напруження;
- розрахунок нових координат і переміщення підкладки в розраховане положення;
- формування масиву результатів вимірювання;
- графічне відображення розподілу рівня залишкових напружень.

Реалізація модуля вимірювання синусоїдальної і косинусоїдальної складової вхідного сигналу вимагає забезпечення роботи з вхідним аналого-цифровим перетворювачем, виконання цифрової обробки вхідного сигналу і виконання операції тарировки для виключення впливу зовнішнього ІЧ випромінювання. Завданням, яке реалізує модуль переміщення, є позиціонування вимірюваної підкладки в точку з розрахованими координатами. При цьому модуль повинен забезпечувати переміщення по траєкторії відповідно до обраної моделі вимірювання. Загальний алгоритм роботи пристрою «Полярон - 4» наведено на рис. 9, а пристрій на рис. 10.

Інтерфейс програми, яка реалізує алгоритм, повинен забезпечувати можливість обліку фонові перешкоди, установки параметрів фільтрації, установки параметрів сканування з вибором моделі сканування, відображення даних.

Інтерфейс дозволяє управляти всіма режимами пристрою і відображає прийнятну інтенсивність ІЧ випромінювання. По завершенню сканування підкладки формується масив, що містить розрахо-



Рис. 10 – Пристрій вимірювання залишкових напружень «Полярон - 4»

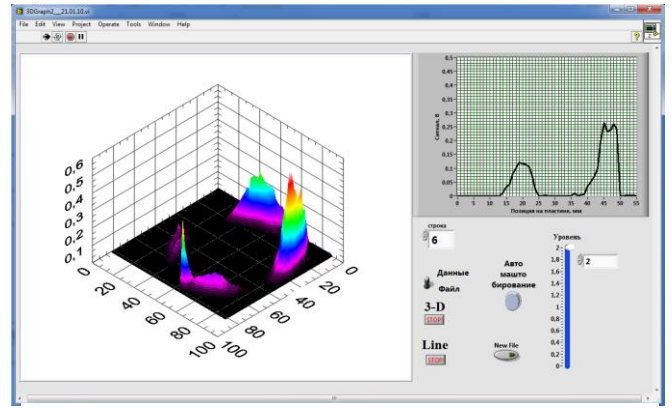


Рис. 11 – Підпрограма графічного відображення рівня залишкових напружень (x 10 МПа) в режимі 3 D

Метод контролю відхилення від площинності повинен дозволяти вимірювати деформацію поверхні напівпровідникових пластин і структур, що мають практично всі види вигину, включаючи антикlastичний вигин, а також дозволяти вимірювати відхилення від площинності у різних кристалографічних напрямках. Як показав виконаний нами аналіз існуючих методів і методик вимірювання відхилення від площинності різних матеріалів, для вирішення завдання безконтактного вимірювання деформації напівпровідникових пластин необхідно використовувати

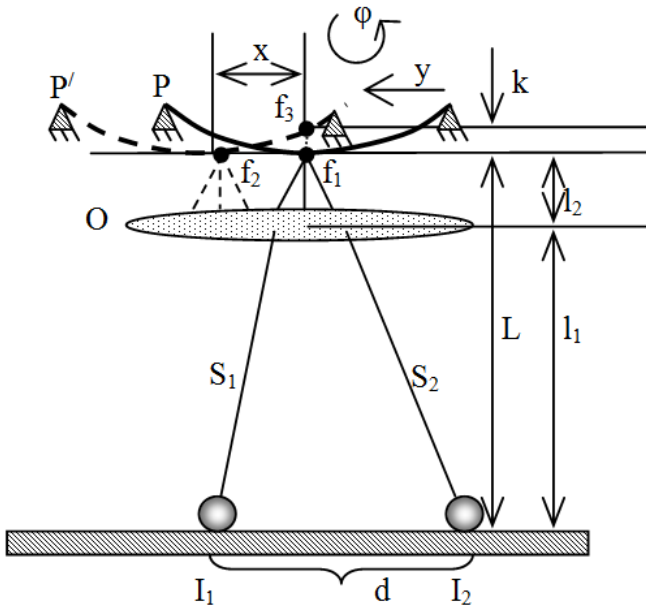


Рис. 12 – Схема методу безконтактного виміру відхилення від площинності підкладок GaAs

від головної осі оптичної системи, отже, можна записати:

$$s_2^2 - s_1^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 = 2x \times d, \quad s_2^2 - s_1^2 = (s_2 + s_1) \times (s_2 - s_1)^2 = 2L \times \Delta S \quad (19)$$

Тоді різницю оптичного ходу променів можна знайти як:

$$\Delta S = \frac{x \times d}{L} \quad (20)$$

оптичні методи. Найбільш прийнятним методом є метод інтерференційної мікроскопії.

Схема безконтактного методу вимірювання відхилення від площинності наведена на рис. 12.

Різницю ходу $\Delta S = S_2 - S_1$ між променями, що йдуть від джерел I_1 і I_2 в точку f_1 з координатою x можна знайти як:

$$s_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \quad s_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \quad (18)$$

де d – відстань між джерелами світла, L – відстань від джерел освітлення до фокальної площині об'єктива O , x – зміщення місця формування інтерференційної смуги

Переміщення об'єктива O призводить до зміни співвідношення l_1 / l_2 . У тому випадку, якщо фокальна площина об'єктива збігається з площиною пластини, на ній будуть спостерігатися інтерференційні смуги в точці f_1 . Якщо пластинка має деформацію у вигляді прогину на величину k , то переміщення пластини вздовж оптичної системи в напрямі y приведе до зміщення фокусу об'єктива в точку f_2 на відстань x , і, отже, інтерференційна картина також буде зміщуватися. Зміна співвідношення l_1 / l_2 викликана переміщенням об'єктива у вертикальному напрямку призведе до переміщення фокуса в точку f_3 , і, як наслідок, до зміщення інтерференційної картини в зворотному напрямку. Величина переміщення об'єктива на величину k до збігу інтерференційної картини з базовою, за яку вибирається точка з нульовою деформацією, що знаходиться поблизу опори P , буде відповідати відхиленню від площинності підкладки.

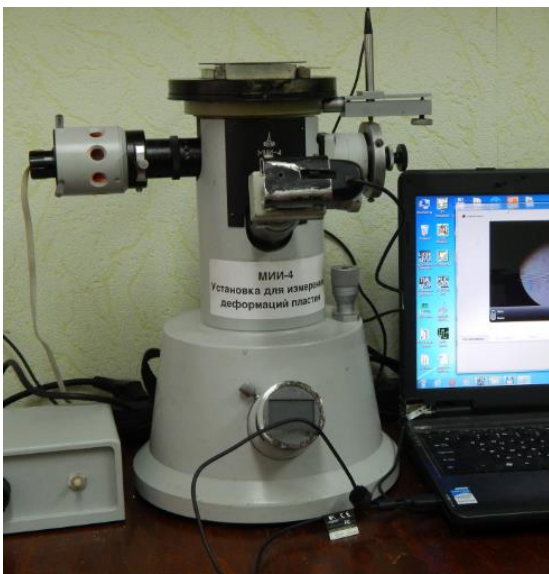


Рис. 13 – Зовнішній вигляд пристрою «АКІДП 1»

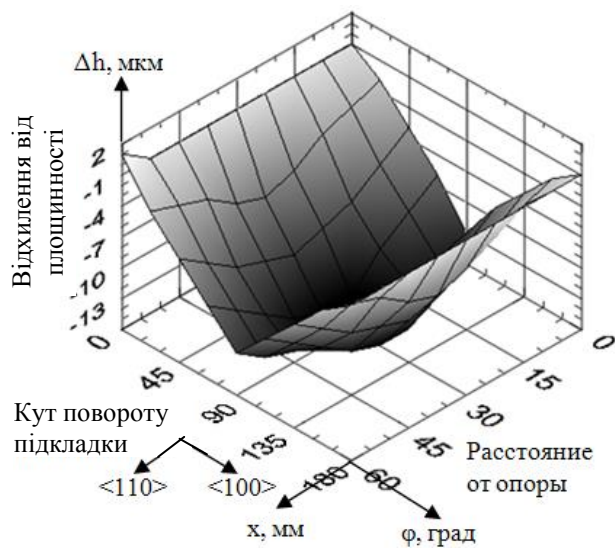


Рис. 14 – Відхилення від площинності підкладки (100) в напрямку <110>

До контролю густини дислокацій висуваються високі вимоги. Для створення електронних приладів і фотоелементів на основі GaAs потрібні підкладки з густиною дислокацій, що не перевищують $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ для підкладок діаметром 78,6 мм і більше.

У роботі контроль густини дислокацій проводиться вдосконаленим методом світлової мікроскопії з використанням телекамери і технології обробки відеозображення. Пропонований метод дозволяє визначати густину дислокацій у підкладці GaAs, розташованих як у вигляді одиночних дислокацій, так і у вигляді груп з використанням телевізійного способу визначення густини дислокацій. Алгоритм визначення густини дислокацій у підкладках GaAs наведено на рис. 15.

Алгоритм дозволяє підрахувати кількість як одиночних дислокацій, так і дислокацій, які входять до групи.

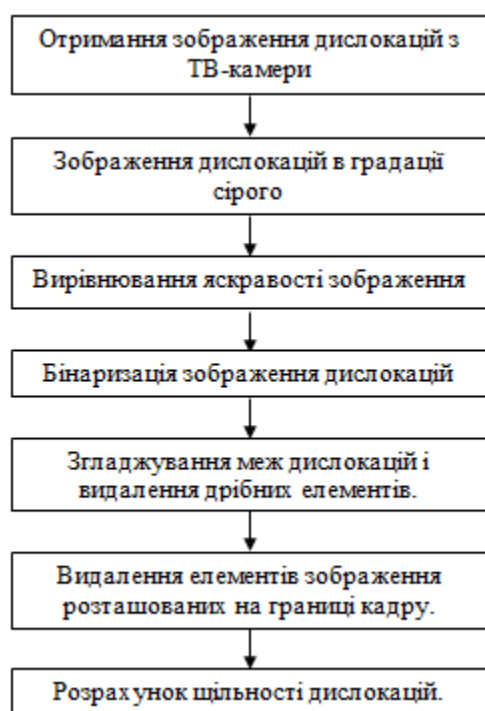


Рис. 15 – Алгоритм вимірювання густини дислокацій пристроєм «ТВ-Діслок 1»

Підрахунок дислокацій проводиться шляхом визначення кількості розділених фігур на зображенні і визначення розміру області фігур в пікселях. Визначення кількості дислокацій і груп дислокацій проводиться шляхом виділення меж і підрахунку пікселів, які входять у розділену зону. Переміщення по площині підкладки в автоматизованому комплексі «ТВ-Діслок 1» виконується системою позиціонування.

Пристрій може використовувати моделі вимірювання, зокрема:

- модель вимірювання відповідно до ГОСТ 19658-81;
- модель вимірювання відповідно до SEMI M83-1112;
- лінійну повну модель вимірювання;
- полярну повну модель вимірювання;

Розрахунок щільності дислокацій проводиться за вдосконаленою методикою, розробленою у данній роботі.

Пристрій та інтерфейс програми пристрою «ТВ-Діслок1» показаний на рис. 16 та рис. 17 відповідно.

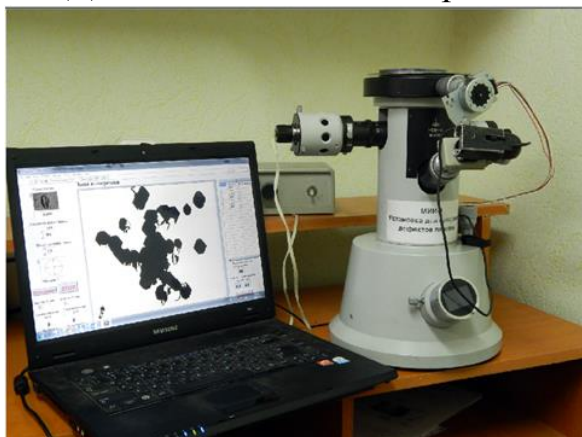


Рис. 16 – Пристрій контролю густини дислокації «ТВ-Діслок1»

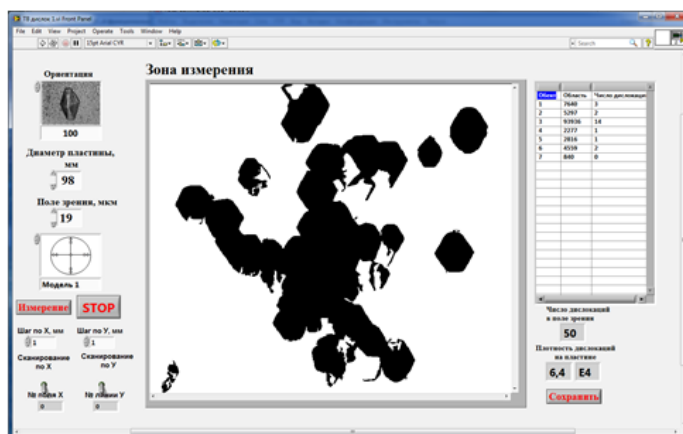


Рис. 17 – Інтерфейс програми пристрою «ТВ-Діслок1»

Для визначення метрологічних характеристик пристрою «Полярон-4» був застосований метод безпосереднього зв'язування вимірюваних значень рівня залишкових напружень пристроєм з еталоном. В якості етального приладу в роботі використовувався рентгенівський дифрактометр X'Pert PRO MRD. Рентгенівський дифрактометр використовувався для вимірювання постійної кристалічної решітки в заздалегідь визначених точках підкладки. Схему вимірювання постійної решітки GaAs приведено на рис. 18.



Рис. 18 – Схема вимірювання постійної решітки підкладки GaAs

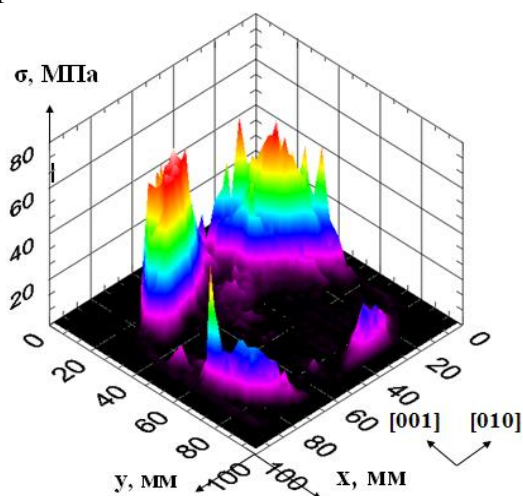


Рис. 19 – Залишкові напруження у підкладці АГЧП-98,0-650 «Полярон-4»

98,0-650-(100)-ЕJ-ДСП показало належний збіг експериментальних даних, отриманих за допомогою рентгенодифракційного методу і поляризаційного методу, реалізованого пристроєм «Полярон-4».

Розподіл рівня залишкового напруження у зразку, отриманого пристроєм «Полярон-4», та лінія сканування у напрямку [011] із значеннями, розрахованими по даним дифрактометра X'Pert PRO MRD, наведені на рис. 19 та 20 відповідно.

Загальне середнє значення абсолютної похибки пристрою «Полярон-4» склало 2 МПа.

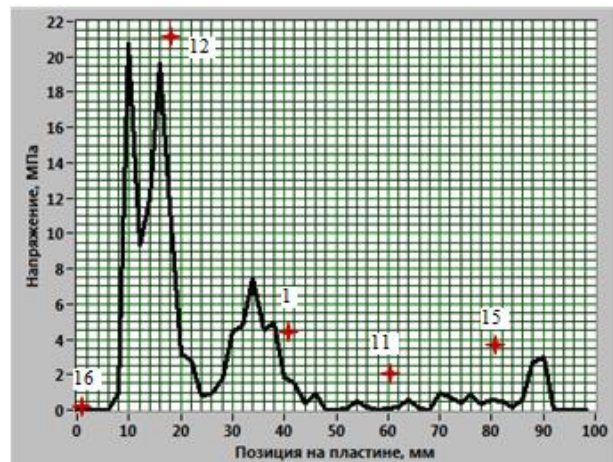


Рис. 20 – Профіль залишкового напруження в напрямку [011] та розраховані значення (+), а також номер точки вимірювання у відповідності зі схемою (рис. 18)

Метрологічні характеристики пристрою контролю відхилення від площинності були визначені методом звірення з еталоном. Як еталон використовувалася метрологічна перевірна пластина плоскопаралельна скляна типу ПП100. Метрологічні параметри визначалися шляхом установки перевірконої пластини на корундові наконечники маніпулятора з подальшим переміщенням пластини в горизонтальній площині і визначенням відхилення від паралельності.

Загальне середнє значення абсолютної похибки пристрою «АКИДП – 1» склало $\pm 0,8$ мкм.

Для визначення похибки пристрою контролю щільності дислокацій ми використовували метод порівняння з еталоном, при цьому як еталон була обрана методика контролю щільності дислокацій у підкладках GaAs, розроблена в роботі. Підрахунок дислокацій при використанні еталонного способу проводився відповідно до ГОСТ 19658-81 в дев'яти точках. Загальна відносна похибка пристрою склала 33 %.

У п'ятому розділі виконано розробку елементів технології виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки.

Основними факторами, що призводять до підвищених значень дислокацій та залишкових напружень у злитках GaAs при вирощуванні, є температурні градієнти. Зниження температурних градієнтів можливе при контролі діаметра злитка в процесі його вирощування, що дозволить оптимізувати процес управління вирощуванням.

Метод вимірювання діаметра злитків GaAs у процесі його вирощування, заснований на прямому зважуванні злитка, в даний час є найпоширенішим. Водночас цьому методу притаманний ряд недоліків, які призводять до похибки вимірювання. Зниження похибки вимірювання діаметра злитка в процесі його вирощування можливе при розробці нових методів і пристроїв, в яких використовуються переваги існуючих методів і усуваються властиві їм недоліки. У загальному вигляді залежність діаметра від ваги і швидкості вирощування можна записати як:

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{1}{\pi \times \rho \times V} \times \frac{dP}{dt}} \quad (21)$$

де ρ – щільність розплаву, V – швидкість вирощування, P – вага злитка, що вимірюється.

Як видно з виразу похибки вимірювання ваги злитка безпосередньо впливають на похибку визначення його діаметру. В роботі зменшення похибки виміру діаметра злитка виконується за рахунок зменшення впливу збуджуючих факторів, зокрема зменшення похибки датчика ваги, врахування коливання напруги та температури та застосування цифрової фільтрації даних.

Структурна схема пристрою вимірювання діаметра злитка, що реалізує запропонований метод, наведена на рис. 21. До складу пристрою входять: ДВ – датчик ваги, ПС – підсилювач, ДТ – датчик температури, встановлений біля датчика ваги, ДНЖ – датчик напруги живлення підсилювача і датчика ваги, що вимірює коливання напруги, що живить датчик ваги і підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ПВДЗ – пристрій вимірювання довжини злитка, ПІ – перетворювач інтерфейсу, ЕОМ – промислова ЕОМ.

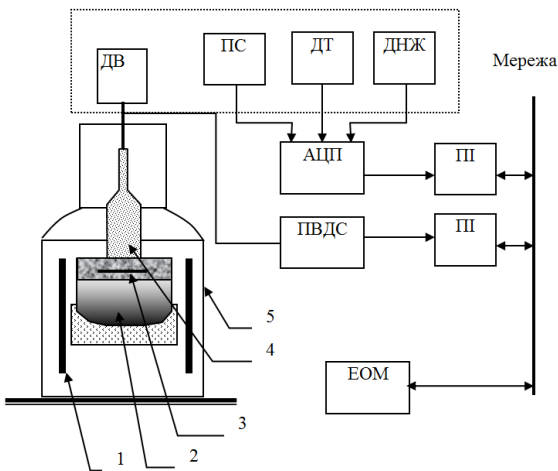


Рис. 21 – Структурна схема пристрою вимірювання діаметра злитка: 1 – основний нагрівач; 2 – тигель з розплавом і рідинним герметизатором; 3 – фоновий нагрівач; 4 – злиток; 5 – ростова камера

Результат застосування фільтра, заснованого на методі експоненційної ковзної середньої, наведено на рис. 22, та злиток GaAs, який було вирощено із застосуванням розробленого пристрою, наведено на рис. 23.

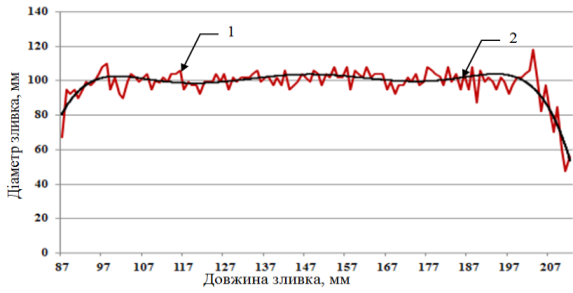


Рис. 22 – Результат реалізації пристрою вимірювання діаметра злитка GaAs 1 – вимірний діаметр злитка без корекції факторів, що обурюють і шумів АЦП, 2 – вимірний діаметр злитка із застосуванням корекції і фільтрації

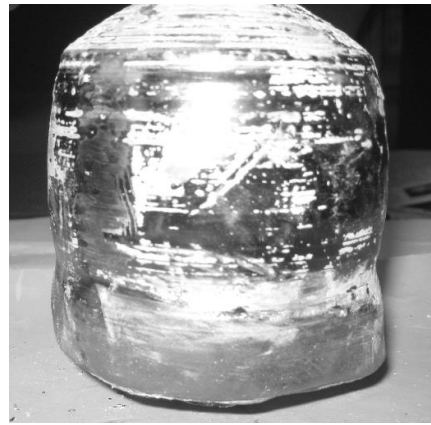
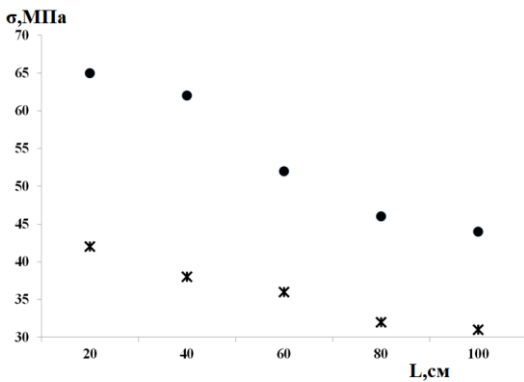
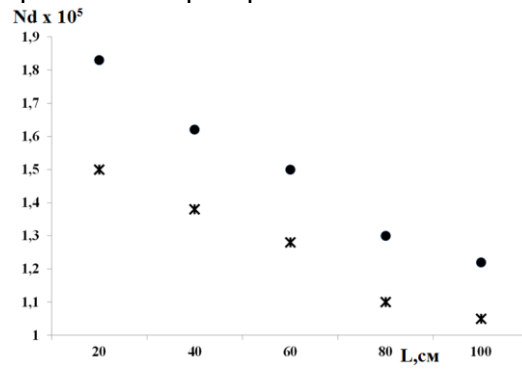


Рис. 23 – Злиток GaAs діаметром 100 мм, який було вирощено із застосуванням розробленого пристрою



а)



б)

Рис. 24. Залишкові напруги (а) і щільність дислокацій (б) в пластинах GaAs отриманих із злитків: * - з використання пристрою контролю діаметра; ● - без використання пристрою контролю діаметра

Зменшення нестабільності діаметра в процесі вирощування злитка дозволило зменшити температурні градієнти, і як наслідок призвело до зменшення рівня залишкових напружень і щільності дислокацій в підкладках GaAs.

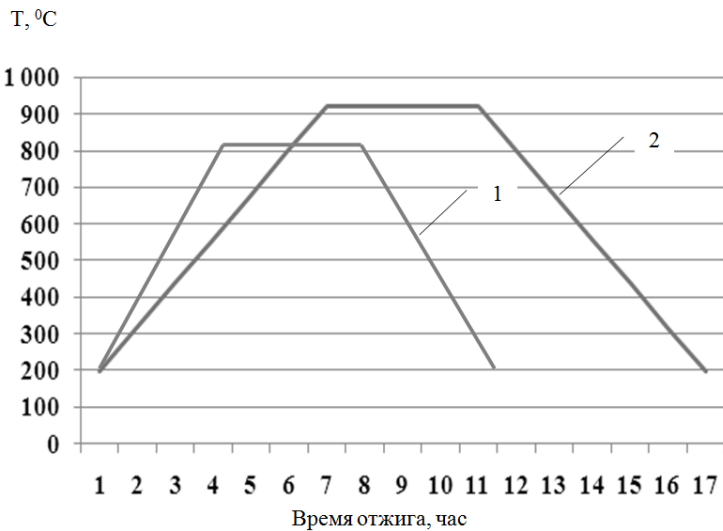


Рис. 25 – Режими відпалу злитка GaAs: 1 – перший режим; 2 – другий режим

Для якісної оцінки впливу пристрою контролю діаметра вирощуваного злитка GaAs на залишкові напруження і щільність дислокацій нами були проведені вимірювання даних параметрів (рис.24). Проведені дослідження підтвердили, що використання пристрою контролю діаметра призводить до зниження залишкових напружень у верхній частині злитка приблизно на 15%, і в нижній частині злитка приблизно на 10%. Відповідно щільність дислокацій знижується у верхній час-

тині злитка на 10%, і в нижній частині на 5%.

Відпал злитка – обов’язковий технологічний процес виробництва підкладок GaAs.

Аналіз процесу формування напруження і дислокацій під час відпалу можна виконати з урахуванням того, що процес відпалу є більш простим процесом, ніж вирошування. Це визначається тим, що при відпалі не змінюється геометрія злитка, і відсутній шар рідкого герметизатора.

У роботі було досліджено вплив різних режимів відпалу (рис. 25) на рівень залишкових напружень.

Перший режим характеризується температурним градієнтом $150\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ і максимальною температурою $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, другий режим – температурним градієнтом $100\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ і максимальною температурою $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За допомогою математичного моделювання було розраховано значення теплового напруження для режиму відпалу 1 та режиму 2. Результати моделювання наведено на рис. 26.

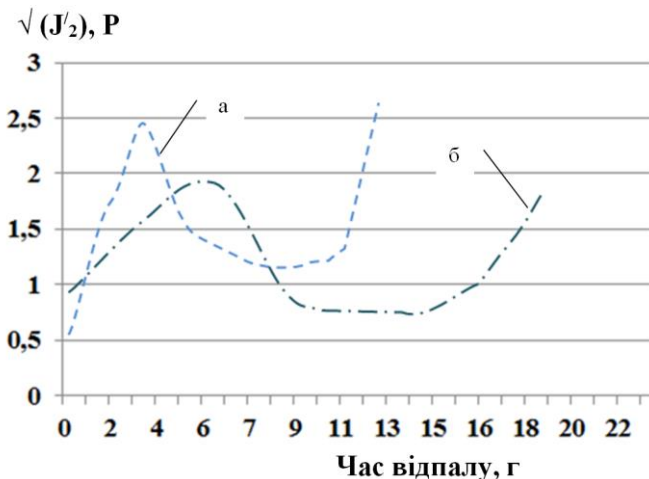


Рис. 26 – Результати розрахунку впливу параметрів відпалу на теплову напругу $\sqrt{J/2}$: а) - режим № 1 (градієнт температури = $150\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ нагрівання, $150\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ охолодження, час відпалу 11 год, $T_{\text{макс}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.); б) - режим № 2 (градієнт температури = $100\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ нагрівання, $100\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{год}$ охолодження, час відпалу 17 год, $T_{\text{макс}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Порівнюючи параметри відпалу для режиму № 1 і режиму № 2, встановлено, що, чим більше градієнт температури dT / dt , тим вище густина дислокації. Вплив максимального значення температури надає не таке велике значення, як градієнт.

При виконанні операції механічної шліфовки, внаслідок впливу шліфувального матеріалу на підкладку виникають дефекти, пов’язані з процесом обробки у вигляді мікрорельєфу, мікротріщин і областей скупчення дислокацій. Дефекти, що виникають в процесі шліфовки підкладок, дуже впливають на подальші процеси дифузії, епітаксійного нарощування, а також безпосередньо на параметри мікроелектронних приладів. У роботі отримано обмеження параметрів процесу шліфування підкладок GaAs, які дозволили модернізувати верстат САШ-АМ.

У роботі показано, що в процесі нагрівання злитка температурний градієнт всередині злитка збільшується за рахунок температурних залежностей GaAs, що призводить до збільшення теплового напруження $\sqrt{J/2}$. Коли злиток витримується при максимальній температурі, напруження, яке знімалося під час процесу прогріву, залишається у злитку залишковим напруженням. Напрямок залишкових напружень зсуву стає зворотним тому напрямку напруження зсуву, яке утворилося під час процесу нагрівання. Теплове напруження завжди позитивне, тому, коли значення $\sqrt{J/2}$ перевищує напруження гальмування дислокацій, формується різке зниження значення $\sqrt{J/2}$.

$$\frac{\delta_{уст}}{\delta_{укрі}} < \frac{0,2x}{R_{ст}\xi(y)} = \begin{cases} 4,75 \times 10^{-5} & \text{для } 100/80 \\ 3,75 \times 10^{-5} & \text{для } 80/63 \\ 1,79 \times 10^{-5} & \text{для } 40/26 \end{cases} \quad (22)$$

де $\delta_{уст}$ – керуючий вплив на двигун обертання столу, $\delta_{укрі}$ – керуючий вплив на двигун обертання шпинделя відповідних кіл.

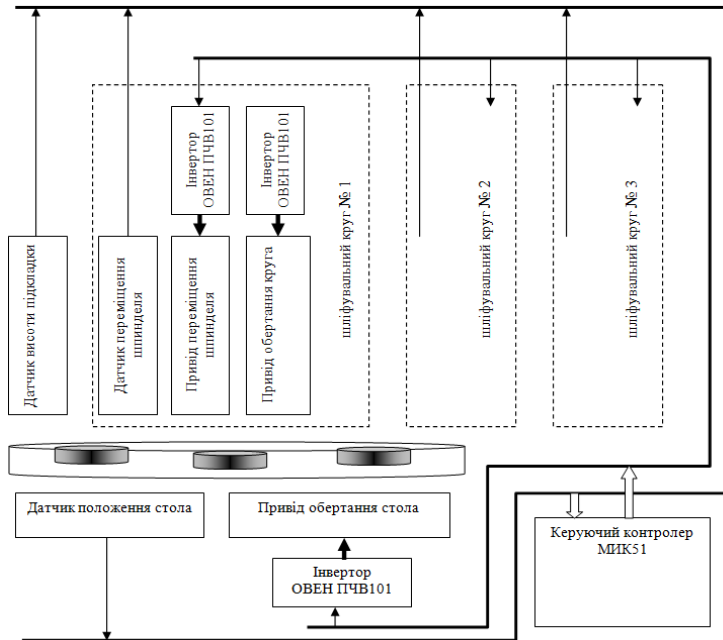
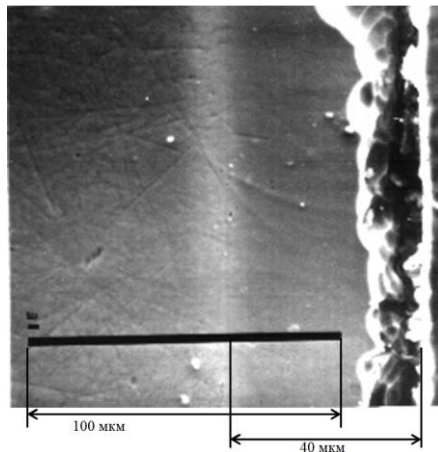


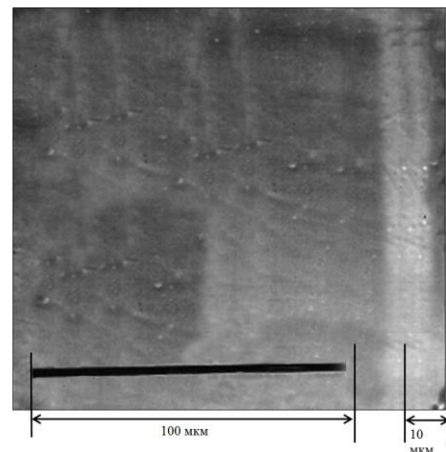
Рис. 27 – Структурна схема модернізованого верстата шліфування підкладок GaAs «САШ-АМ»

вимірювання по діаметру підкладки.

Для оцінки якості шліфування й глибини порушеного шару нами було проведено дослідження підкладок GaAs.



а)



б)

Рис. 28 – Порушений шар у підкладці GaAs: а) – існуюча технологія; б) після шліфування за вдосконаленою технологією. Растровий електронний мікроскоп – мікροаналізатор «КАМЕБАКС».

Вимірювання порушеного шару проводилися на сколі підкладок шліфованих і полірованих алмазними пастами з послідовною зміною розміру зерна до 0,25 мкм. На рис. 28 а показано зображення порушеного шару підкладки, отримане за допомогою растрового електронного мікроскопа КАМЕБАКС. Можна бачити, що порушений шар глибиною 40 мкм складається з двох шарів: шару, що складається з мікротріщин і шорсткостей, глибиною 15 мкм, і шару підвищених механічних напружень, глибиною 35 мкм. На рис. 28 б показаний знімок підкладки GaAs, підготовлений за вдосконаленою технологією. Глибина порушеного шару зменшилася до 10 мкм, при цьому шар мікротріщин і шорсткостей виявився незначним.

У шостому розділі виконано дослідження якості підкладок GaAs, розроблених за запропонованою технологією.

Для оцінки впливу технологічних параметрів процесу виробництва підкладок GaAs на рівень залишкових напружень, зокрема пристрою контролю діаметра, технології відпалу та технології механічного шліфування відпалу було проведено ряд промислових випробувань підкладок GaAs АГЧХ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП, АГЧП-98,0 -650-(100) -ЕJ-ДСП, АГЧТ-98,0-650-(100) -ЕJ-ДСП по ТУ 6365-01-52692510-2010. Підкладки виготовлялися із злитків марки АГЧП (100) 100 к 5, АГЧХ (100) 100 к 5 і АГЧТ (100) 100 к 5 за ТУ 48-4-276-92.

Вирощування проводилося відповідно до стандартної технологічної карти під шаром герметика. Дослідження проводилося на серії з 36 підкладок, вирізаних з верхньої, середньої і нижньої частини 12-ти злитків, з яких по 2 злитка кожної марки вирощувалися без пристрою контролю діаметра, а по 2 злитка кожної марки вирощувалися із застосуванням пристрою контролю діаметра. Після вирощування злитки калібрували та розрізали на пластини товщиною 650 нм. Надалі відбиралися

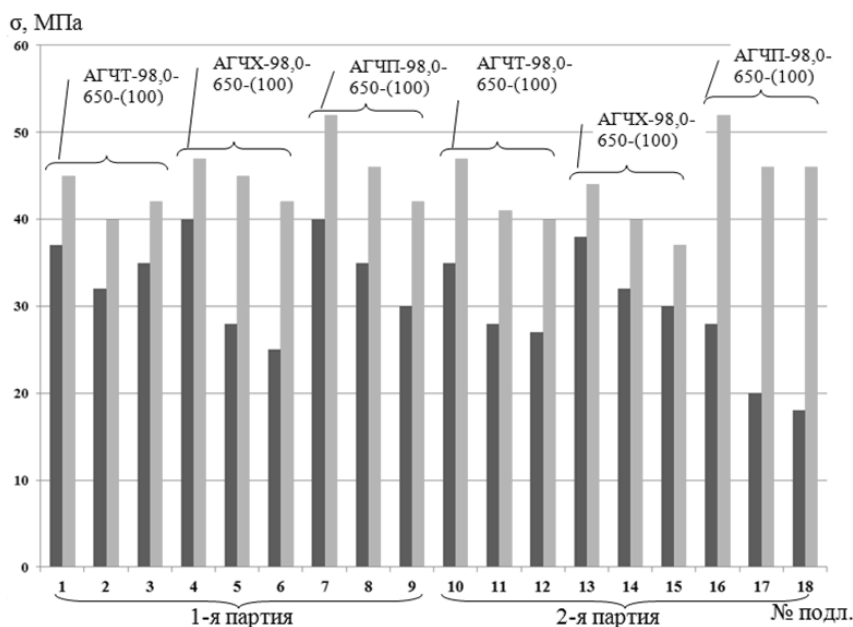


Рис. 29 – Порівняння рівня залишкових напружень у підкладках, виготовлених за існуючою і розробленою технологіями: ■ – розроблена технологія; ■ – існуюча технологія

більше значення на початку злитка, знижується до центру злитка, і знову збільшується до нижньої частини злитка. Отримані дані добре узгоджуються з

три пластини, вирізані відповідно з верхньої, середньої і нижньої частини злитка, для подальшого виготовлення підкладок.

Підготовка підкладок, вирізаних із злитків № 1–6, проводилась за існуючою технологією, підготовка підкладок, вирізаних із злитків 7–12, – за розробленою технологією. Вимірювання рівня залишкових напружень виконувалося на установці «Полярон-4».

Отриманий розподіл залишкових напружень по довжині злитка (рис. 29) має

відомими теоретичними і експериментальними даними.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що використання пристрою контролю діаметра злитка в процесі росту і запропонованої технології та пристрою відпалу підкладок дозволили домогтися зменшення залишкових напружень у підкладках GaAs до рівня не більш, ніж 40 МПа.

Розподіл залишкових напружень у підкладках GaAs, вироблених за існуючою та розробленою технологією наведено на рис. 30.

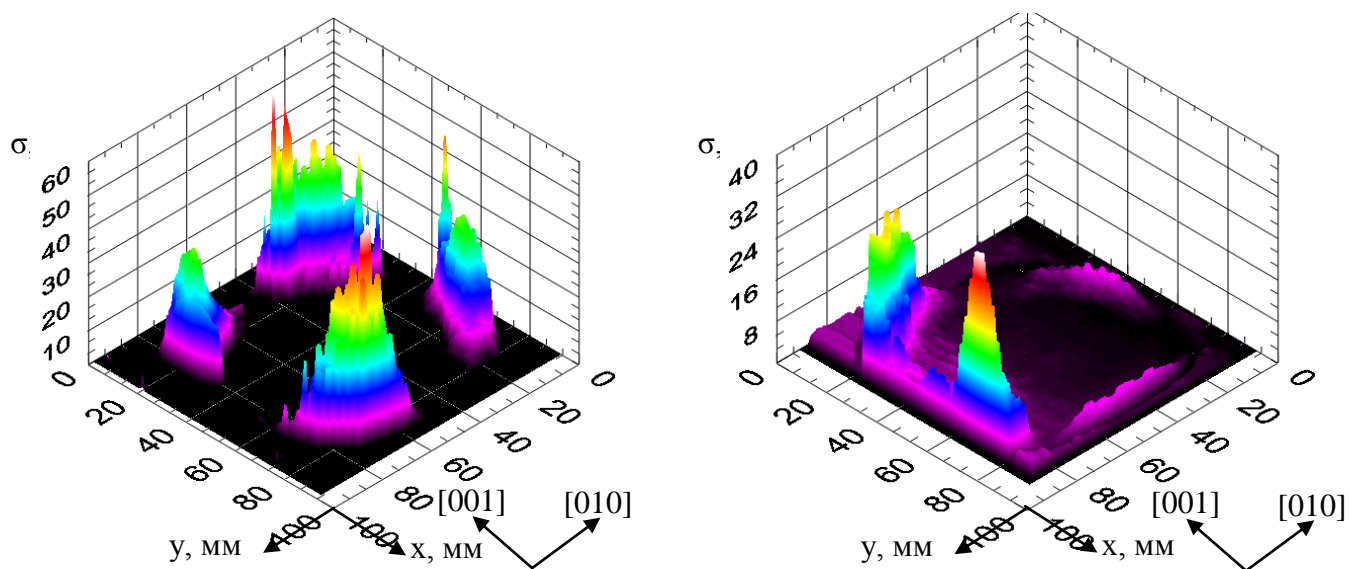


Рис. 30 – Залишкові напруження, виміряні приладом «Полярон-4»: а) – існуюча технологія; б) – запропонована технологія.

Для оцінки впливу технологічних параметрів процесу виробництва підкладок GaAs на їх відхилення від площинності, було проведено ряд промислових випробувань підкладок GaAs, які використовувалися для оцінки рівня залишкової напруги. Визначення відхилення від площинності підкладок виконувалося відповідно до методу, методики і з використанням пристрою «АКІДП-1», запропонованих у даній роботі. Відхилення від площинності підкладок визначалося за трьома кристалографічними напрямками, відповідними осям з найбільшою і найменшою жорсткістю. Виміри проводилися в точках, розташованих на лініях, які збігаються із кристалографічними напрямками з кроком ΔL , рівним 10 мм.

Аналіз отриманих результатів показує, що відхилення від площинності підкладок має складний характер вигину. Максимальний вигин відбувається по кристалографічних напрямках [001] і [010], що відповідає результатам моделювання, отриманим у роботі, і експериментальним дослідженням залишкового напруження. Підкладки, виготовлені з верхньої частини злитка, мають більш високу ступінь відхилення від площинності, ніж підкладки, виготовлені з середньої і нижньої частин, що підтверджує зв'язок між рівнем залишкових напружень і деформацій. Максимальне значення деформації мають напівізолюючі нелеговані підкладки, виготовлені із злитку марки АГЧП (100) 100к5, що також пояснюється більш високим рівнем залишкових напружень.

Для порівняння ступеня відхилення від площинності підкладок GaAs, отриманих з використанням існуючої та нової технології, були визначені

максимальні значення вигину, прогину і середнє значення відхилення від площинності по всіх підкладках, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Граничні значення відхилення від площинності підкладок GaAs

	Вигин, мкм	Середнє значення, мкм	Прогин, мкм
Існуюча технологія	4,4	0,26	- 3,1
Розроблена технологія	1,8	0,10	- 1,5

На основі отриманих експериментальних даних у роботі показано, що запропоновані в роботі технологічні рішення дозволяють зменшити відхилення від площинності підкладок GaAs до рівня, що не перевищує 2 мкм.

Для оцінки впливу технологічних параметрів процесу виробництва підкладок

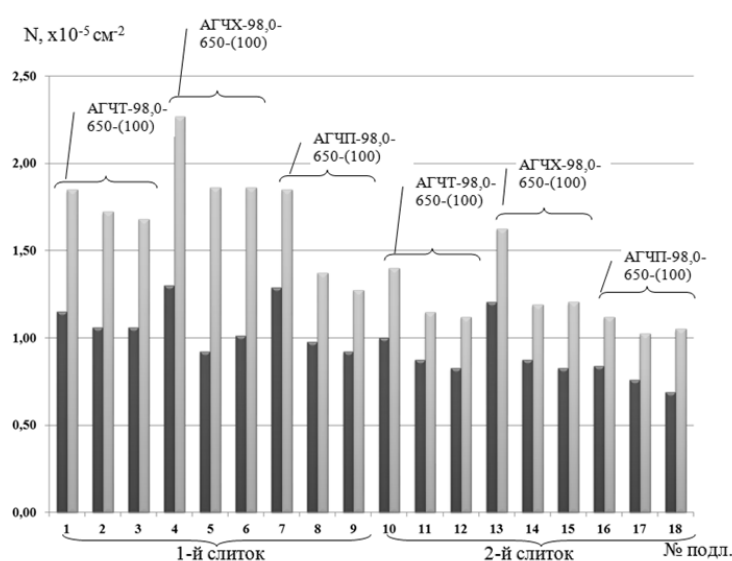


Рис. 31 – Порівняння густини дислокацій у підкладках, виготовлених за існуючою і розробленою технологіями:
 – розроблена технологія; – існуюча технологія

GaAs на густину дислокацій було проведено низку промислових випробувань підкладок GaAs, які використовувалися для оцінки рівня залишкового напруження. Після відпалу та вимірювання рівня залишкових напружень підкладки GaAs піддавалися підготовці відповідно до запропонованої в роботі методики контролю густини дислокацій. Вимірювання густини дислокацій проводилося пристроєм «ТВ-Діслок 1», відповідно до розробленої в роботі методики, використовуючи повний план вимірювання. Для оцінки якості підкладок використовувалося інтегроване значення густини дислокацій. Результати вимірювання, відображені у вигляді

гістограми, наведені на рис. 31.

Як показують експериментальні дослідження густини дислокацій у підкладках, виготовлених з верхньої частині злитка, густина дислокацій має більше значення, яке склало $1.18 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$, ніж у підкладках із середньої частини $9,4 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$, і $9,0 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ з нижньої частини відповідно. Отримані дані відповідають встановленому зв'язку між залишковими напруженнями та щільністю дислокацій і температурними градієнтами. Збільшене значення густини дислокацій як в підкладках, виготовлених за існуючою технологією, так і в підкладках, виготовлених за запропонованою технологією, пояснюється підвищеними температурними градієнтами при вирощуванні злитка, які виникають зі зміною швидкості вирощування при переході стадії вирощування прямого конуса до стадії вирощування циліндричної частини.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що використання запропонованої технології дозволило домогтися зменшення щільності дислокацій у підкладках GaAs до рівня не більш, ніж на $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Для дослідження підвищення деградаційної стійкості пластин GaAs були підготовлені три зразки з підкладок марки АГЧТ-98,0-650-(100)-ЕJ-ДСП. Питомий опір зразків становила $1 \times 10^7 \text{ Ом} \times \text{см}$. Частина зразків піддавалася обробці в плазмі водню з використанням установки PE-CVD. Потім зразки піддавалися ВЧ-обробкам (на частоті 13,56 МГц) на тій же установці і мікрохвильовим обробкам (МВО) (на частоті 2,45 ГГц). Для МВО використовувалася установка на основі МАГНІТРОН з питомою вихідною потужністю $1,5 \text{ Вт} / \text{см}^2$. МВО проводилася в робочій камері магнітрона на повітрі у вільному просторі.

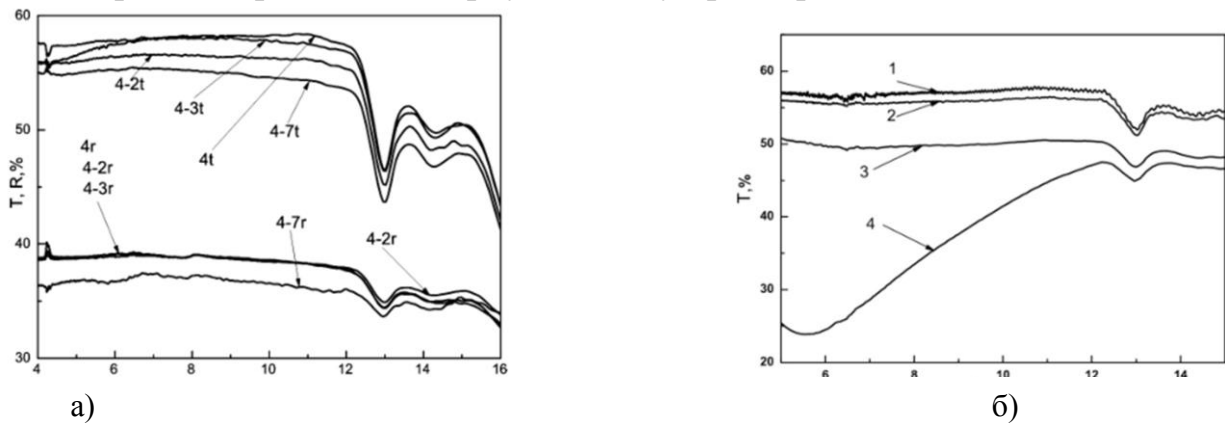


Рис. 33. - Спектри пропускання (т) і відбиття (r) ПЧ - випромінювання підкладок GaAs, легованих телуrom а): 4 - вихідний зразок; 4-2 - зразок 4 після ВЧ-обробки під маскою (потужність розряду - 250 Вт, тиск газу - 106,6 Па, час обробки - 62 хв); 4-3 - зразок 4-2 після ВЧ-обробки під маскою (потужність розряду - 250 Вт, тиск газу - 106,6 Па, час обробки - 57 хв); 4-7 - зразок 4-3 після мікрохвильової обробки протягом 10 хв, та легованих хромом (б) - 1 - вихідний зразок; 2 - зразок № 1 після ВЧ-обробки під маскою (потужність розряду - 250 Вт, тиск газу - 106,6 Па, час обробки - 15 хв); 3 - зразок № 2 після ВЧ-обробки під маскою (потужність розряду - 250 Вт, тиск газу - 106,6 Па, час обробки - 47 хв); 4 - зразок № 3 після відпалу при 600°C протягом 30 с в атмосфері аргону.

Встановлено, що введення в підкладки лігатури з великим нековалентним радіусом покращує її деградаційну стійкість до впливу подальших технологічних обробок.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень за допомогою удосконалених методів, розроблених методик та пристроїв отримано такі важливі результати:

1. Аналіз специфіки технологічних процесів виробництва підкладок показав, що подальше підвищення якості підкладок, зокрема рівня залишкових напружень, відхилення від площинності і густини дислокацій, можна досягти шляхом розробки та впровадження нової технології виробництва підкладок, розробки методів і методик неруйнівного контролю якості підкладок в умовах промислового виробництва.

2. Удосконалена математична модель, що описує вплив кристалічної орієнтації

на механічні властивості GaAs та розраховані значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона для довільних кристалографічних напрямків. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для розрахунків механічних параметрів підкладок GaAs відповідно до розробленої моделі. Відхилення між розрахунковими й експериментальними даними не перевищує 4,7 %.

3. Удосконалена математична модель, що дозволяє математично визначити вплив величини залишкових напружень на константи пружності c_{11} , c_{12} , c_{44} які визначають модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. Встановлено, що збільшення рівня залишкових напружень до значення 60 МПа призводить до збільшення значення констант, при цьому константа c_{12} зростає найбільше. Починаючи зі значення 60 МПа константи c_{11} , c_{44} починають зменшуватися, значення константи c_{44} змінюється найбільше. Визначені умови, за яких забезпечується механічна стійкість підкладки GaAs при впливі на неї залишкових напружень. Показано, що порушення стійкості, яке призводить до руйнування підкладки, відбувається при величині залишкових напружень більше 100 МПа.

4. Удосконалена математична модель, що описує вплив кристалографічної орієнтації підкладок GaAs на густину дислокацій, яка дозволяє оцінити густину і розподіл дислокацій у підкладках GaAs з урахуванням систем ковзання кристала. Встановлено, що механізм розмноження дислокацій у всіх 12 припустимих для GaAs системах ковзання може бути описаний 5-ма системами ковзання.

5. Впроваджено у виробництво метод виміру залишкових напружень у підкладках GaAs для умов серійного виробництва, і розроблено методику та пристрій «Полярон-4» в якому враховується зсув фаз, а також неспіввісність елементів оптичної системи, що дозволило збільшити точність вимірювання залишкових напружень у підкладках GaAs товщиною від 40 до 800 мкм. Розроблено програмне забезпечення на базі програмного комплексу Labview, яке дозволяє відображати результати у вигляді розподілу залишкових напружень у 2D і 3D виді. Метод забезпечує проведення неруйнівного контролю залишкових напружень з абсолютною похибкою ± 2 МПа.

6. Розроблена та впроваджена методика визначення густини дислокацій у підкладках GaAs телевізійним методом. Встановлено, що кращі результати виявлення дислокацій досягаються при використанні травителя на основі щавлевої кислоти. Запропоновано план виміру, що дозволяє одержати карту розподілу дислокацій у підкладках GaAs. Удосконалено та впроваджено у виробництво метод виміру густини дислокацій у підкладках GaAs, в якому за рахунок застосування методів обробки телевізійного зображення можливо визначати як поодинокі, так і скупчення дислокацій, що збільшує точність методу. Метод підтримує різні моделі виміру дислокацій, включаючи модель за ГОСТ 19658-81 і модель за SEMI M83-1112. Розроблений пристрій «Тв - Діслорк 1», що реалізує вдосконалений метод. Відносна похибка методу склала 33 %.

7. Розроблено методику контролю відхилення від площинності підкладок GaAs. Встановлено, що основні похибки контролю викликають погрішності механічної конструкції, погрішність індуктивного датчика, погрішність розпізнавання лінії інтерференції. Удосконалено та впроваджено у виробництво метод неруйнівного контролю відхилення від площинності підкладок GaAs, який на відміну від існуючих

дозволяє будувати профіль відхилення від площинності підкладки. Величина абсолютної похибки методу дорівнює 0,8 мкм. Розроблено та впроваджено у виробництво пристрій контролю відхилення від площинності підкладок «АКІДП – 1», що реалізує запропонований метод.

8. Удосконалено метод, розроблено та впроваджено у виробництво пристрій контролю діаметра злитка GaAs у процесі його росту в складі ростової установки «Арсенід 1», який заснований на ваговому методі виміру ваги злитку. За допомогою повнофакторного експерименту визначені чинники, які впливають на точність виміру ваги злитку та запропоновані програмні та апаратурні рішення з підвищення точності. Пристрій забезпечує точність контролю не менше ± 1.5 мм для злитка діаметром до 100 мм, що зменшує коливання швидкості вирощування, і, як наслідок, дозволяє зменшити залишкові напруження у верхній частині злитку приблизно на 15%, та у нижній частині приблизно на 10%, густина дислокацій знижується у верхній частині злитку на 10%, та у нижній частині приблизно на 5%.

9. Розроблено та впроваджено технологію відпалу злитків. На основі аналізу значення теплового напруження для різних режимів відпалу визначені режими відпалу, значення яких становить: нагрівання з температурним градієнтом 100 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$. до температури 920 $^{\circ}\text{C}$, витримка при температурі 920 $^{\circ}\text{C}$ впродовж 5 годин, охолодження з температурним градієнтом 100 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Встановлено, що чим більший градієнт температури dT / dt , тим вищий рівень залишкових напружень. Вплив максимального значення температури надає не таке велике значення, як градієнт. Застосування технології дозволило знизити рівень залишкових напружень до рівня 40 МПа.

10. Розроблено технологію шліфування підкладок GaAs. Визначні обмеження на режим шліфування з урахуванням глибини порушеного шару. Розроблено та впроваджено у виробництво пристрій шліфовки підкладок GaAs «САШ АМ». Технологія забезпечує режими шліфування зі зменшенням глибини порушеного шару до 10 мкм.

11. Встановлено, що введення у підкладку лігатури з великим ковалентним радіусом поліпшує деградаційну стійкість до впливу подальших технологічних обробок. Механізм поліпшення деградаційної стійкості плазмово-оброблених підкладок GaAs не залежить від типу легуючої домішки.

12. Удосконалені та розроблені методи, методики, пристрої та технологічні ланцюжки, що реалізують технологію виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки, забезпечили підвищення якості підкладок GaAs, зокрема, зменшення рівня залишкових напруг на 10 %, зменшення щільності дислокацій на 12 %, зменшення відхилення від площинності підкладок не менш, ніж на 20 %, у порівнянні з існуючою технологією, що дозволяє збільшити відсоток виходу придатних приладів на 5–7 %, що підтверджується відповідними актами. Впровадження розробленої технології у вигляді технології відпалу підкладок GaAs, технології шліфовки підкладок і пристроїв неруйнівного контролю на підприємстві ПП «Галар» (м. Світловодськ), дозволило отримати сумарний економічний ефект 200 тис. грн. на рік.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Оксанич А. П. Разработка автоматизированного устройства с программным управлением для шлифовки кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А. П. Оксанич, С. Е. Притчин, М. М. Ткаченко // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т. 3. – №3. – С. 79–83.
2. Оксанич А. П. Математическое моделирование механической обработки кремниевых структур на станке алмазной шлифовке САШ 420 / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, М. А. Ткаченко // Науковий вісник ІЕНТ. Нові технології. – 2004. – № 1–2 (4–5). – С. 121–124.
3. Притчин С. Е. Система идентификации микродефектов слитков кремния телевизионным методом / С. Е. Притчин, В. О. Полтавец // Нові технології. Науковий вісник ІЕНТ. – 2005. – №3 (9) . – С. 39–39.
4. Оксанич А. П. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, В. Е. Краскевич, В. В. Батареев // Складні системи і процеси. – 2006. – № 2. – С. 40–50.
5. Притчин С. Э. Автоматизированная система определения внутренних напряжений в пластинах полупроводников / С. Э. Притчин, С. В. Ткаченко, А. С. Сиора, И. А. Дерев'янку // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2007. – Вип. 6 (47). Ч. 1.– С. 33–35. ()
6. Притчин С. Е. 3D візуалізація розподілу внутрішніх напруг в напівпровідникових пластинах/ С. Е. Притчин, О. С. Сиора, І. О. Дерев'янку // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2007. – № 3 (17). – С. 13–17.
7. Оксанич А. П. Розробка процедури визначення температурних полів і термопластичних напруг в зливках GaAs, вирощених ЛЕС / А. П. Оксанич, П. О. Хозя, С. Е. Притчин // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2008. – № 1 (19). – С. 4–10.
8. Ткаченко С. В. Автоматизированная система измерения плотности микродефектов в монокристаллическом кремнии и арсениде галлия / С. В. Ткаченко, С. Э. Притчин, С. А. Соқун // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 6 (59). Ч. 1. – С. 31–35.
9. Оксанич А. П. Метод і пристрій вимірювання потужності графітового нагрівача ростової установки. / А. П. Оксанич, С. О. Волохов, В. А. Тербан // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2009. – № 4 (26). – С. 3–10.
10. Загирняк М. В. Разработка математической модели и прогнозного регулятора для процесса выращивания монокристаллов полуизолирующего арсенида галлия / М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, В. А. Тербан, С. Э. Притчин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2011. – Вып. 155. – С. 33–42.
11. Притчин С. Э. Усовершенствование метода и разработка аппаратуры бесконтактного контроля деформации полупроводниковых пластин и структур / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Вип. 2 (73). – С. 35–39.
12. Ключ М. І. Оптичні властивості модифікованих кристалів GaAs в інфрачервоній області спектру / М. І. Ключ, А. І. Ліптуга, В. Б. Лозінський, А. П. Оксанич,

С. Е. Притчин, Ф. В. Фомовський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Вип. 3 (74). – С. 15–19.

13. Оксанич А. П. Усовершенствование метода измерения остаточных напряжений в подложках арсенид галлия / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, В. Р. Петренко, В. А. Тербан. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вып. 161. – С. 122–128.

14. Оксанич А. П. Метод и устройство измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания методом с жидкостной герметизацией / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, В. Р. Петренко, В. А. Тербан // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – Т. 11. – № 1. – С. 54–62.

15. Притчин С. Э. Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия / С. Э. Притчин // Технічна електродинаміка : Науково-прикладний журнал : у 4-х ч. – Ч. 3. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 209–211.

16. Притчин С. Э. Разработка математической модели влияния точечных дефектов монокристаллов арсенида галлия на его упругие характеристики / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 1 (72). – С. 23–27.

17. Оксанич А. П. Усовершенствование технологии отжига слитков и подложек арсенида галлия для изделий микро-, наноэлектроники и фотовольтаики / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 2 (79). – С. 14–19.

18. Оксанич А. П. Разработка устройств и систем выращивания слитков арсенида галлия для изделий микро, нано электроники и фотовольтаики / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, В. А. Тербан // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 54. – С. 136–143.

19. Притчин С. Э. Усовершенствование технологии подготовки подложек арсенида галлия / С. Э. Притчин, В. И. Орел, В. А. Тербан, Н. В. Рылова // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3. – С. 25–30.

20. Оксанич А. П. Усовершенствование метода и аппаратуры измерения плотности дислокаций в подложках кремния и арсенида галлия / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, М. Г. Когдась, В. А. Тербан // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вип. 163. – С. 53–59.

21. Притчин С. Э. Микроконтроллерный комплекс подготовки подложек арсенида галлия / С. Э. Притчин // Комп'ютерно-інтегровані технології : освіта, наука, виробництво. – 2013. – Вип. 12. – С. 134–141.

22. Притчин С. Э. Математическое моделирование влияния остаточных напряжений на механические свойства подложек арсенида галлия / С. Э. Притчин, В. В. Артамонов // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 4 (81). – С. 31–36.

23. Притчин С. Э. Усовершенствование математической модели зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона от кристаллографической ориентации подложек GaAs / С. Э. Притчин, В. В. Артамонов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вип. 162. – С. 68–73.

24. Притчин С. Э. Усовершенствование математической модели влияния кристаллографических направлений подложек арсенида галлия на плотность дислока-

ций / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 5 (82). – С. 27–32.

25. Притчин С. Е. Влияние термических відпалів на оптичні властивості пластин напівізолюючого арсеніду галію, легованих телуром / С. Е. Притчин, М. Г. Когдась, А. І. Ліптуга, В. Б. Лозінський, А. П. Оксанич, М. І. Клюй // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вып. 165. – С. 136–141.

26. Притчин С. Э. Уменьшение погрешности оптического тракта автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений / С. Э. Притчин, К. В. Макаров, А. П. Юрченко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1 (84). – С. 29–33.

27. Притчин С. Э. Разработка методики измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия / С. Э. Притчин // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 2 (85). – С. 21–25.

28. Klyui N. I. Tellurium effect on degradation stability of semiinsulating gallium arsenide crystals / N. I. Klyui, A. I. Liptuga, V. B. Lozinskii, A. P. Oksanich, S. E. Pritchyn, F. V. Fomovskii, V. O. Yukhymchuk // Ukr. J. Phys. – 2014. – Vol. 59. – No. 11. – P. 1093–1097.

29. Деклараційний патент України на винахід № 49479. Спосіб вирощування монокристала та пристрій для його здійснення / Оксанич А. П., Притчин С. Е., Ларкін С. Ю., Слюсаренко О. О., Третьяков О. В., Немчин О. Ф., Падалко В. Г., Аніщенко С. Є.; власник Товариство з обмеженою відповідальністю «Нова інтернаціональна корпорація». – № u2001128633; заявл. 14.12.2001 р.; опубл. 16.09.2002 р., Бюл. № 9 «Промислова власність». – 2002 р.

30. Патент України на корисну модель № 99669, МПК (2006.01). Спосіб з'єднання струмопровідних шин з металеві фольги / Макаров А. В., Клюй М. І., Авксентьева Л. В., Оксанич А. П., Притчин С. Е.; власник Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України. – № u 201408876; заявл. 06.10.2014 р.; опубл. 25.12.2014 р., Бюл. № 24 «Промислова власність». – 8 с.

31. Патент України на корисну модель № 97876, МПК (2006.01). Спосіб покращення пропускання ІЧ-світла та деградаційної стійкості оптичного елемента на основі GaAs / Клюй М. І., Ліптуга А. І., Лозінський В. Б., Кабалдін О. М., Неймаш В. Б., Оксанич А. П., Притчин С. Е.; власник Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України. – № u 201410935; заявл. 06.10.2014 р.; опубл. 10.04.2015 р., Бюл. № 7 «Промислова власність». – 6 с.

32. Оксанич А. П. Система автоматического управления процессом шлифовки кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, М. А. Ткаченко // Материалы III Международной научно-технической конференции «Информационная техника и электромеханика (ИТЭМ-2005)» (19–21 квітня 2005 р., м. Луганськ). – С. 45 - 46

33. Оксанич А. П. Формирование математической модели определения кинематических параметров шлифования кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, М. А. Ткаченко // Фізика і технологія тонких плівок : Матеріали Ювілейної X Міжнародної конференції (МКФТТП-Х) (16–21 травня 2005 р., м. Івано-Франківськ). – С. 193–194.

34. Оксанич А. П. Разработка процедуры определения температурных полей и термических напряжений в слитках ПИН GaAs, выращенных из расплава / А. П. Оксанич, П. А. Хозя, С. Э. Притчин // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології : Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції METIT-3, присвяченій 90-річчю НАНУ (21–23 травня 2008 р., м. Кременчук). – С. 142–144.

35. Оксанич А.П. Повышение точности измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-4) (16–20 серпня 2009 р., м. Запоріжжя) : Тези доповідей. – С. 24-26

36. Оксанич А. П. Синтез температурного профиля выращивания слитка GaAs по величине термоупругих напряжений в пластинах / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // III Міжнародна наукова конференція «Функціональна компонентна база мікро-, опто- і наноелектроніки» (28 серпня – 2 жовтня 2010 р., Харьков-Кацевели) : Тези доповідей. – С. 145

37. Оксанич А. П. Высокочувствительный аппаратно-программный комплекс для измерения внутренних напряжений в полупроводниковых материалах / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин, А. В. Вашерук // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології : Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції METIT-4 (19–21 травня 2010 р.). – Кременчук : КУЕІТУ, 2010. – С. 115.

38. Оксанич А. П. Метод определения плотности распределения микродефектов в монокристаллах GaAs, применяемых для γ -детекторов / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології : Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції СЕМСТ-4 (28 червня – 2 липня 2010 р., м. Одеса). – С. 89-91

39. Оксанич А. П. Метод неразрушающего контроля внутренних напряжений в кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // V Украинская научная конференция по физике полупроводников (9–15 октября 2011 р., м. Ужгород). – С. 142

40. Оксанич А. П. Контроль структурных микронеоднородностей подложек GaAs применяемых для производства фото-электронных преобразователей / Оксанич А. П., Притчин С. Э. // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ – 2011) : Тезисы докладов IV Международного радиоэлектронного форума (18–21 октября 2011 г., г. Харьков-Кацевели). – С. 284–287

41. Притчин С. Э. Применение поляризационно-оптического метода для исследования внутренних напряжений в кремниевых эпитаксиальных структурах / С. Э. Притчин // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2011) : Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції (5–7 травня 2011 р., м. Кременчук). – С. 77.

42. Притчин С. Э. Связь термоупругих напряжений и плотности дислокаций в слитках германия, применяемого для задач биомедицины / С. Э. Притчин, В. Ф. Шостак // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів : Тези доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції (7–9 листопада 2011 р., м. Кременчук). – С. 72-73

43. Оксанич А. П. Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия / А. П. Оксанич, С. Э. Притчин // Силовая электроника и энергоэффективность : Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции (17–21 сентября 2012 г., г. Алушта). – С. 91–92

44. Притчин С. Э. Автоматизированная система управления процессом выращивания монокристаллов арсенида галлия / С. Э. Притчин // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (14–16 березня 2012 р., м. Запоріжжя). – С. 213–214.

45. Загирняк М.В. Создание современных технологий выращивания структурно-совершенных слитков электронного арсенида галлия / М.В. Загирняк, В.Р.Петренко, А.П.Оксанич, Притчин С. Э. В.А. Тербан // Сборник материалов V Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники» (30 сентября – 5 октября 2012 г., Харьков-Кацевели). – С. 5–8.

46. Притчин С. Э. Математическая модель зависимости Модуля Юнга в подложках арсенида галлия от кристаллографической ориентации / С. Э. Притчин // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (2–4 листопада 2012 р., м. Кременчук). – С. 88–90.

47. Притчин С. Э. Математическое моделирование влияния дефектов в подложках арсенида галлия на механические свойства / С. Э. Притчин // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (13–16 березня 2013 р., м. Запоріжжя). – С. 214–216.

48. Оксанич А.П. Разработка устройства и систем выращивания слитков арсенида галлия для изделий микро-, нанoeлектроники и фотовольтаики / А.П. Оксанич, С. Э. Притчин, В.А. Тербан // Материалы Международной научно-технической конференции «Радиотехнические поля. сигналы, аппараты и системы» (11–15 марта 2013 г., г. Киев). – С. 204–205.

49. Притчин С. Э. Влияние параметров процесса отжига на плотность дислокаций в слитках арсенида галлия / С. Э. Притчин // II Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» : Тези доповідей. – Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2013. – С. 3–38

50. Притчин С. Е. Методи покращення деградаційної стійкості елементів ІЧ-оптики на основі напівізолюючого GaAs / А.І. Ліптуга, В.Б. Лозінський, А.П.Оксанич, М.І.Клюй, С. Е.Притчин // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників : Тези доповідей (вересень – жовтень 2013 р., м. Чернівці). – С. 116–117.

51. Оксанич А.П. Определение механических свойств арсенида галлия в произвольной кристаллографической ориентации / А.П.Оксанич, С. Э. Притчин // VI Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники» : Сборник научных трудов. – Харьков : ХНУРЭ, 2013. – С. 109–112.

52. Притчин С. Е. Розробка методики вимірювання залишкових напруг в підкладах арсеніду галію / С. Э. Притчин // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток наукових досліджень – 2013» (25–27 листопада 2013 р., м. Полтава). – Т. 6. – С. 67–68.

53. Притчин С. Е. Розробка методики вимірювання залишкових напруг у підкладах арсеніду галію / С. Э. Притчин // III Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 20–23 травня 2014 р. – С. 91–92.

54. Притчин С. Е. Підвищення чутливості прийомного каналу поляриметра для визначення полів залишкових напруг у підкладках GaAs / С. Э. Притчин // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 55–56.

55. Притчин С. Е. Автоматизація вимірювання залишкових напружень у напівпровідниках та напівпровідникових структурах / С. Э. Притчин // I Міжнародний форум «IT-Тренди: великі дані, штучний інтелект, соціальні медіа»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2014. – С. 65–67.

АНОТАЦІЯ

Притчин С. Е. Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми – підвищенню якості підкладок GaAs шляхом розробки нової технології виготовлення підкладок, удосконалення математичних моделей, удосконалення методик, методів і пристроїв неруйнівного контролю якості підкладок у промислових умовах.

За результатами математичного моделювання уточнено дані про значення механічних властивостей підкладок GaAs у довільних кристалографічних напрямках, визначено вплив величини залишкових напружень на константи пружності c_{11} , c_{12} , c_{44} . Визначені умови, за яких забезпечується механічна стійкість підкладки GaAs при впливі на неї залишкових напруг.

У роботі розроблено низку методик, пристроїв та удосконалено методи, зокрема:

- методика, пристрій «Полярон – 4» та удосконалено метод неруйнівного контролю залишкових напружень у підкладках GaAs;

- методика, пристрій «ТВ-Діслок 1» та удосконалено метод неруйнівного контролю густини дислокацій у підкладках GaAs;

- методика, пристрій «АКІДП – 1» та удосконалено метод неруйнівного контролю відхилення від площинності підкладок GaAs.

Розроблено пристрій контролю діаметра зливка в процесі його росту, який забезпечує точність контролю не менш ± 1.5 мм. Це дозволило за рахунок поліпшення роботи системи управління вирощуванням зменшити рівень залишкових напружень до значення менш ніж 40 МПа та густини дислокації менш ніж $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Запропонована технологія виготовлення підкладок GaAs забезпечила підвищення якості підкладок GaAs, зокрема, зменшення рівня залишкових напружень на 10 %, зменшення щільності дислокацій на 12 %, зменшення відхилення від площинності підкладок не менш ніж на 20 % у порівнянні з існуючою технологією, що дозволяє збільшити відсоток виходу придатних приладів на 5–7 %.

Ключові слова: підкладки арсеніду галію, залишкові напруження, густина дислокації, відхилення від площинності, неруйнівний контроль, відпал.

ABSTRACT

Pritch S. E. Development of technology for production of gallium arsenide substrates for microelectronic products. – Manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Doctor of Technical Science on the speciality 05.27.06 – Technology, equipment, and production of electronic technique. – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – Kremenchuk, 2015.

The dissertation is devoted to solving actual scientific-practical problem – improving the quality GaAs substrates by developing new manufacturing technology substrates, improvement of mathematical models, improvement of techniques, methods and devices of nondestructive control of substrates quality in industrial environments.

Due to results of mathematical modeling data on values of mechanical properties of GaAs substrates at random crystallographic directions are specified. The influence of the magnitude of residual stresses in the elastic constants c_{11} , c_{12} , c_{44} is defined. The conditions which provide mechanical stability of GaAs substrate under the influence of residual stresses on it are determined.

A number of methods and devices are developed in the paper. Also methods in terms of mass production are improved, including:

- method, device «Polaron – 4»; method of nondestructive testing of residual stresses in GaAs substrates is improved;
- method, device «TV-Dislok 1»; method of nondestructive testing dislocation density in GaAs substrates is improved;
- method, device «AKIDP – 1»; method of nondestructive testing of flatness deviation of GaAs substrates is improved.

The control device of bar diameter in the process of growth is developed. This device provides precision of control at least ± 1.5 mm. It allowed through better work of system of management of growth to reduce the level of residual stresses to a value less than 40 MPa and dislocation density less than $1.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$.

The proposed technology of substrates GaAs producing ensured improving the quality substrates GaAs, in particular, reducing residual stresses level by 10 %, reducing the dislocation density by 12 %, reducing the deviations from the flatness of substrates by at least 20 % compared with the existing technology that can increase the output of suitable devices for 5–7 %.

Keywords: GaAs substrates, residual stresses, dislocation density, deviation from flatness, nondestructive control, annealing.

АННОТАЦИЯ

Притчин С. Э. Разработка технологии производства подложек арсенида галлия для изделий микроэлектроники. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского. – Кременчуг, 2015.

В рамках диссертационной работы была решена важная научно-практическая задача, сутью которой является повышение качества подложек арсенида галлия, применяющихся для изделий микроэлектроники. Решение задачи было достигнуто за счет разработки новой технологии изготовления подложек GaAs, которая включает в себя разработку и усовершенствование методик, методов и аппаратуры неразрушающего контроля качества подложек в промышленных условиях, усовершенствование технологии шлифования подложек и технологии отжига, усовершенствование процесса выращивания слитков GaAs.

В работе также усовершенствовано ряд математических моделей, которые описывают влияние кристаллографии GaAs на качественные параметры подложек, в частности остаточные напряжения, плотность дислокации, отклонение от плоскостности.

При помощи математического моделирования уточнены расчетные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для произвольного кристаллографического направления. Повышение точности вычислений было выполнено путем вычисления тензора упругой податливости в повернутой системе координат относительно базовой. Полученное отклонение между расчетными и экспериментальными данными для углов, кратных 45° , не превышает 4,7 %. Выполнение расчетов производится разработанным в рамках работы программным обеспечением.

Теоретически были определены условия механической устойчивости подложек GaAs и усовершенствована модель, которая описывает связь между остаточными напряжениями и константами упругости c_{11} , c_{12} , c_{44} , которые определяют значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Впервые установлено, что в диапазоне остаточных напряжений до 60 МПа подложки GaAs остаются механически стабильными, при значении остаточного напряжения более 100 МПа происходит нарушение устойчивости с последующим разрушением подложки.

Усовершенствованная модель размножения дислокаций в зависимости от кристаллографической ориентации позволила установить, что механизм размножения дислокаций во всех 12 допустимых для арсенида галлия системах скольжения может быть описан 5-ю системами скольжения. Это позволило оценить плотность дислокаций в подложках GaAs кристаллографической ориентации (100) по кристаллографическим направлениям [010] и [100]. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 20 %.

Учитывая отсутствие либо недостаточную точность методик, методов и аппаратуры неразрушающего контроля качества подложек GaAs, в работе была выполнена их разработка и усовершенствование, в частности:

– методика, метод и аппаратура измерения остаточных напряжений в подложках GaAs. В основе лежал усовершенствованный метод поляриметрии. Определены источники погрешности метода, такие как погрешность приемного тракта и погрешность, вызываемая несоосностью элементов оптической системы. С учетом принятых решений по уменьшению погрешности метода разработано устройство «Полярон – 4», позволяющее измерять остаточные напряжения в подложках GaAs и отображать результаты в виде распределения остаточных напряжений в 2D и 3D виде. Усовершенствованный метод обеспечивает проведение неразрушающего контроля остаточных напряжений с абсолютной погрешностью ± 2 МПа.

– методика, метод и аппаратура определения плотности дислокаций в подложках GaAs. В основе лежит телевизионный метод подсчета числа дислокаций, что позволяет вести подсчет как одиночных дислокаций, так и скопления дислокаций в виде группы, и предложен план измерения, позволяющий получить карту распределения дислокаций. Метод поддерживает различные модели измерения плотности дислокаций, включая модель по ГОСТ 19658-81 и модель по SEMI M83-1112. Определены источники погрешности метода и разработано устройство «ТВ-Дислок1». Относительная погрешность метода составила 33 %.

– методика, метод и аппаратура контроля отклонения от плоскостности подложек арсенида галлия. Установлено что основные погрешности контроля вызывают погрешности механической конструкции, погрешность индуктивного датчика, погрешность распознавания линии интерференции. Для реализации предложенного метода и методики в работе было разработано устройство контроля отклонения от плоскостности подложек «АКИДП – 1», величина абсолютной погрешности которого составила 0,8 мкм.

Обоснованные параметры отжига, которые составили: нагрев с температурным градиентом 100 °С/ч. до температуры 920 °С, выдержка при температуре 920 °С в течение 5 часов, охлаждения с температурным градиентом 100 °С/ч., что позволило снизить уровень остаточных напряжений до такого, что не превышает 40 МПа.

Для снижения плотности дислокаций в слитках и подложках до уровня $1,3 \times 10^5$ см⁻² в рамках работы разработано устройство контроля диаметра слитка в процессе его роста, обеспечивающее точность контроля не более $\pm 1,5$ мм для слитка диаметром 100 мм, что позволило уменьшить колебания скорости выращивания на 15% и как следствие, уменьшить уровень остаточных напряжений в верхней части слитка на 25% и уменьшить плотность дислокаций в верхней части слитка на 10 %.

Итогом работы стала разработанная технология производства подложек GaAs, которая обеспечивает увеличение их качества, в частности: уменьшение уровня остаточных напряжений на 10 %, уменьшение плотности дислокаций на 12 %, уменьшение отклонения от плоскостности подложек не менее чем на 20 %, что позволяет увеличить процент выхода годных приборов на 5–7 %.

Ключевые слова: подложки арсенида галлия, остаточные напряжения, плотность дислокаций, отклонение от плоскостности, неразрушающий контроль, отжиг.