

«Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

1. Актуальність теми

Велика кількість наукових і технічних публікацій у галузі напівпровідників і напівпровідникових приладів присвячено дослідженню сполук типу A^3B^5 . Сполуки цього класу отримали в останні роки широке поширення в якості матеріалу для виготовлення різних напівпровідникових приладів. Інтенсивне вивчення властивостей цих сполук привело до відкриття ряду явищ, створення принципово нових і важливих для техніки електронних приладів і істотно сприяло розвитку фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, а також технології та виробництву електронної техніки. Характеристики електронних приладів, які виготовляються на основі GaAs, багато в чому перевищують параметри приладів, що виготовляються на основі кремнію та германію. Широке застосування цієї сполуки обумовлюється її унікальними властивостями, при тому високочистий монокристалічний арсенід галію (GaAs) є одним з основних напівпровідникових матеріалів, який використовується у сучасній електронній промисловості. Найважливішим із властивостей матеріалу є висока (у шість разів більша, ніж в кремнії) рухливість електронів в електричних полях низької напруженості, що потенційно дозволяє створити НВЧ прилади з поліпшеними характеристиками. Мала величина часу життя неосновних носіїв і більша, ніж у кремнію, ширина забороненої зони робили GaAs перспективним матеріалом для створення радіаційностійких приладів та інтегральних схем (ІС).

Виробництво світлодіодів з високою яскравістю випромінювання є одним стабільних сегментів ринку арсеніду галію. Сьогодні вони можуть використовуватись для плоскопанельних екранів комп'ютерних моніторів і телевізорів. Напрямактам застосування електронних приладів з GaAs є НВЧ електроніка (створення приладів з частотами понад 250 ГГц.), силова електроніка у вигляді швидкодіючих надпотужних ключів. Різні приладові структури на GaAs і AlGaAs, які можуть використовуватися при створенні аналогових і цифрових інтегральних схем мають самі різні призначення. Найбільш часто використовуваним елементом при розробці як цифрових, так і аналогових інтегральних схем, безумовно, є польовий транзистор на GaAs. Велику роль GaAs відіграє у виробництві датчиків радіаційного випромінювання і у виробках ІЧ – оптики.

Сьогодні тема альтернативних джерел енергії стає дуже актуальною. Одним з таких джерел, притому невичерпних, є енергія Сонця, яку можна отримати без жодних проблем за допомогою сонячної батареї. Найефективнішими пристроями для перетворення сонячної енергії у електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) на GaAs, без яких сьогодні не можна бачити майбутнє космічної техніки. Внаслідок оптимізації структури та параметрів перетворювача, спрямованої на зниження незворотних втрат енергії, цілком реально вдалося підняти практичний ККД лабораторних сонячних батарей до 51%. Теоретичні дослідження та практичні розробки, у сфері фотоелектричного перетворення сонячної енергії підтвердили можливість настільки високих значень ККД ФЕП і визначили основні шляхи досягнення цього.

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.

Тому проблеми підвищення якості підкладок GaAs, конкурентоздатних на світовому ринку, що можливий шляхом розробки технології виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки, результатом яких буде збільшення виходу придатних виробів, мікроелектроніки на основі арсеніду галію, які вирішуються в даній дисертаційній роботі безумовно є актуальними.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується також її тісним зв'язком з основним науковим напрямом роботи кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, відповідно до державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології й наноматеріали на 2010–2014 роки». Вона виконувалася у відповідності до наукових програм, планів та тем.

2. Мета і структура дисертаційної роботи

Метою дисертаційної роботи було 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 методів, методик і апаратури неруйнівного контролю якості підкладок.

Для реалізації поставленої мети були:

1. Проаналізовані стани і тенденції розвитку технології вирощування злитків GaAs і виробництва підкладок, обґрунтовані необхідності розробки нових або промодернізованих існуючих технологічних процесів виробництва підкладок GaAs;
2. визначені впливи механічних властивостей GaAs на залишкові напруження у підкладках в залежності від кристалографічних орієнтацій;
3. удосконалені методи, методики і розроблено апаратуру неруйнівного контролю рівня залишкового напруження, відхилення від площинності та густини дислокацій у підкладках GaAs;
4. удосконалені методи 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 $1.3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$;
5. розроблено технологію для відпаалу злитків, що забезпечує рівень залишкових напружень не більше 40 МПа на краях підкладки;
6. розроблено технологію й устаткування для шліфування підкладок, що забезпечує рівень порушеного шару не більше 10 мкм;
7. визначено вплив технологічних обробок підкладок GaAs на їх деградаційну стійкість в ІЧ області.

У вступі приведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми, сформульована мета досліджень, викладені основні положення, що виносяться на захист, наведені відомості про практичне значення отриманих результатів та їх апробацію.

Перший розділ – оглядовий. Наводиться огляд літературних даних про стан проблеми 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.

Проведений аналіз існуючих методів визначення внутрішніх напружень у підкладках GaAs і вимірювання відхилення від площинності підкладок GaAs. Проведене узагальнення вже досягнутих результатів та виділені найсуттєвіші невирішені проблеми.

У другому розділі наводяться результати розроблених математичних моделей, які описують вплив кристалографічної орієнтації та залишкових напружень на механічні властивості і густину дислокацій у підкладках GaAs.

Удосконалено модель, яка описує вплив кристалографічної орієнтації на механічні властивості підкладок GaAs, які як відомо є анізотропними кристалами. 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.

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

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, для чого розроблено модель, за допомогою якої можна розрахувати вплив залишкових напружень на механічні властивості підкладок GaAs.

Результати моделювання показують, що збільшення рівня залишкових напружень призводить до збільшення значення констант пружної жорсткості. Розроблено модель, що описує вплив кристалографічної орієнтації підкладок GaAs на густину дислокацій, яка, крім термопружних напружень, враховує кристалографічні напрямки.

Третій розділ присвячений розробленню методики неруйнівного контролю залишкових напружень, густини дислокацій та відхилення від площинності.

Для промислового застосування підкладки GaAs товщиною 650 мкм виготовляються діаметром 100,0 мм що призводить до похибок вимірювання. Для вимірювання рівня залишкових напружень в промислових умовах використовують метод полярископії. Якщо величина залишкових напружень є порівняно невеликою, для даного методу необхідно готувати зразки товщиною в кілька міліметрів.

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 роботі розроблена методика контролю густини дислокації телевізійним методом.

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; похибка індуктивного датчика переміщення об'єктиву; похибка розпізнавання лінії інтерференції.

У четвертому розділі для підвищення чутливості вимірювання залишкового напруження в підкладках GaAs, в роботі запропоновано структурну схему пристрою вимірювання 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.

Створено загальний алгоритм роботи пристрою «Полярон - 4», а інтерфейс програми, яка реалізує алгоритм, повинен забезпечувати можливість обліку фонові перешкоди,

установки параметрів фільтрації, установки параметрів сканування з вибором моделі сканування, відображення даних. Для графічного відображення результатів вимірювання була розроблена окрема підпрограма, що виводить дані у вигляді 3D графіка, у вигляді кольірних полів і у вигляді ізонапружень.

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.

Метрологічні характеристики пристрою контролю відхилення від площинності були визначені методом зворотного зв'язку з еталоном (метрологічна перевірна пластина плоскопаралельна скляна типу ПП100). Загальне середнє значення абсолютної похибки пристрою «Полярон-4» склало 0,8 мкм.

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

Оптимізувати процес управління вирощуванням можливе при контролі діаметра злитка в процесі його вирощування. 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.

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.

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.

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

Дослідження якості підкладок GaAs, розроблених за запропонованою технологією виконано у шостому розділі.

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. Після вирощування злитки калібрували та розрізали на пластини товщиною 650 нм. Надалі відбиралися три пластини, вирізані відповідно з верхньої, середньої і нижньої частини злитка для подальшого виготовлення підкладок.

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.

Було проведено ряд промислових випробувань підкладок GaAs, які використовувалися для оцінки рівня залишкової напруги. 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 даних дозволяє зробити висновок, що використання запропонованої технології дозволило домогтися зменшення щільності дислокацій у підкладках GaAs до рівня не більш, ніж на $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Слід відмітити, що зміст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи.

3. Основні результати дисертації, які складають предмет її наукової та практичної вагомості

Дана дисертаційна робота є завершеним дослідженням та вирішенням важливої наукової проблеми пов'язаної з дослідженням особливостей механічних та геометричних властивостей підкладок GaAs.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень за допомогою розроблених методів, методик та пристроїв отримані результати важливі не тільки з практичної, а й з фундаментальної точки зору. Серед найбільш цікавих з них слід відзначити:

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. Удосконалену математичну модель, що описує вплив кристалічної орієнтації на механічні властивості GaAs та розраховані значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона для довільних кристалографічних напрямків. При тому відхилення між розрахованими й експериментальними даними не перевищує 4,7 %.

3. Удосконалену математичну 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. При тому починаючи зі значення 60 МПа константи c_{11} , c_{44} починають зменшуватися, значення константи c_{44} змінюється найбільше. Показано, що порушення стійкості, яке призводить до руйнування підкладки, відбувається при величині залишкових напружень більше 100 МПа.

4. Удосконалену математичну 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.

5. Збільшили точність вимірювання залишкових напружень у підкладках GaAs товщиною від 40 до 800 мкм використовуючи метод виміру залишкових напружень у підкладках GaAs, в якому враховується зсув фаз, а також неспіввісність елементів оптичної системи.

6. Встановлено, що кращі результати виявлення дислокацій досягаються при використанні травників на основі щавлевої кислоти, використовуючи методику визначення густини дислокацій у підкладках GaAs телевізійним методом. Відносна похибка методу склала 33 %.

7. Впроваджено у виробництво метод неруйнівного контролю відхилення від площинності підкладок GaAs, використовуючи розроблену методику контролю відхилення від площинності підкладок GaAs. Величина абсолютної похибки методу дорівнює 0,8 мкм.

8. 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. Пристрій забезпечує точність контролю не менше ± 1.5 мм для злитка діаметром до 100 мм. Густина дислокацій знижується у верхній частині злитку на 10%, та у нижній частині приблизно на 5%.

9. Розроблено та впроваджено технологію відпалу злитків. Застосування технології дозволило знизити рівень залишкових напружень до рівня 40 МПа.

10. Встановлено, що введення у підкладку лігатури з великим ковалентним радіусом поліпшує деградаційну стійкість до впливу подальших технологічних обробок.

11. Розроблені математичні моделі, методи, методики й пристрої, що реалізують технологію виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки, які 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 %.

4. Зауваження до роботи та недоліки в оформленні дисертації

Автор провів детальне дослідження процесів, при вирішенні актуальної науково-практичної проблеми – підвищення якості підкладок GaAs, які застосовуються для виробів мікроелектроніки, шляхом розробки та впровадження нової технології виготовлення підкладок GaAs, а також впровадження методів, методик і апаратури неруйнівного контролю якості підкладок, створив низку математичних моделей для кристала. Разом з тим необхідно вказати на ряд існуючих недоліків.

1. У запропонованих в роботі методикам що розроблялися, не приділяється занадто багато уваги власне похибкам методики, і не до кінця розкрито питання підготовки підкладки до проведення вимірювання, не розглянуто питання допоміжних засобів вимірювання.

2. У роботі слабо представлено порівняння існуючих методів і методик контролю параметрів з запропонованими в роботі. Бажано було-б привести порівняння параметрів.

3. При визначенні метеорологічних параметрів пристрою «Полярон-4» було вибрано всього 17 точок, що є не зовсім достатньо. Калібрування було проведено тільки на підкладці марки АГЧХ, слід було б ще взяти і інші марки підкладок.

4. У роботі розглянута технологія відпалу злитків арсеніду галію, але не розглянута можливість відпалу безпосередньо підкладок арсеніду галію, що могло б призвести до поліпшення характеристик підкладок.

5. Деякі малюнки виконані з недостатньою якістю, наприклад: рис. 1.4, стор.38; рис.2.5, стор. 65; рис.5.8., стор. 228. Деякі терміни вживаються неточно. Наприклад: термін «ваговимірювальний канал», стосовно до датчика ваги злитка правильніше було б замінити на «канал вимірювання ваги злитка»; термін «діаметром...» потрібно замінити на «толщиной...» стор.289.

6. Не завжди дотримувалися правила оформлення дисертації, в особливості нижні береги заповнення сторінки текстом (наприклад стор. 52, 56, 64, 68, 90, 96, 116, 120, 222, 223, 227, 236, 159, 158, 184, 186, 262). Но при тому прорахований обсяг основного тексту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук повністю вкладається в кількість потрібних авторських аркушів.

5. Достовірність результатів роботи

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів базується на комплексному підході до постановки та проведення експериментів, застосуванні сучасних методів досліджень, відтворюваності і несуперечливості результатів. Отримані результати добре узгоджуються з існуючими уявленнями і широко апробовані в авторитетних наукових журналах, матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій, симпозіумів та семінарів. Представлені до захисту результати, сформульована наукова новизна та практична значимість роботи не викликають сумнівів. Практична значимість роботи підтверджується наданими Актами про впровадження.

Результати роботи являються важливими для подальшої розробки та промислового виготовлення приладів НВЧ електроніки, світлодіодів з високою яскравістю

випромінювання, високоефективних сателітарних фотоелектричних перетворювачів тощо. Отримані результати також можуть бути використані в наукових дослідженнях різних явищ в напівпровідникових структурах, які ведуться у вищих навчальних закладах України та фізичних та хімічних інститутах Національної академії наук України.

6. Висновок


На підставі всієї сукупності отриманих результатів, які представлені в роботі, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Притчина С.Е. є своєчасною, представляє собою завершене наукове дослідження, та є рішенням актуальної проблеми в області технологія, обладнання та виробництво електронної техніки, а саме підвищення якості підкладок GaAs, які застосовуються для виробів мікроелектроніки, шляхом розробки та впровадження нової технології виготовлення підкладок, а також впровадження методів, методик і апаратури неруйнівного контролю їх якості. Підсумовуючи викладене вважаю, що дисертація «Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки», відповідає вимогам п.10, п.12, п.13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор Притчин Сергій Емільович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Доктор технічних наук, доцент,
Професор кафедри напівпровідникової електроніки
Національного університету «Львівська політехніка»


Ерохов В.Ю.

Підпис д.т.н., проф. каф. НПЕ. Ерохова В.Ю. засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»




Р.Б.Брилинський