

**ВІДЗИВ**  
**офіційного опонента на дисертаційну роботу**  
**Сергія Емільовича Притчина**  
**« Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію**  
**для виробів мікроелектроніки » ,**  
**представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних**  
**наук**  
**за спеціальністю 05.27.06 - технологія, обладнання та виробництво**  
**електронної техніки**

**1. Актуальність теми**

Актуальність і доцільність дисертаційної роботи С.Е. Притчина не викликає сумнівів. Перш за все тому, що завдання, які ставилися для виконання дисертації, є важливими для створення не тільки нових приладів, але і приладів з поліпшеною конструкцією і параметрами. Цьому сприяли складна обстановка, яка створилася в нашій країні і за її межами в кінці 80 – на початку 90 років минулого століття, пов'язана з аварією на ЧАЕС, розвалом Радянського Союзу, що в багатьох випадках викликало загострення боротьби з міжнародним тероризмом, контрабандою наркотиків, радіоактивних і вибухонебезпечних речовин. Уже тоді знадобилися нові типи детекторів для портативних гамма-спектрометрів, високочутливих моніторів для контролю несанкціонованого переміщення радіоактивних речовин та інших контрабандних товарів, системи детектування гамма-випромінювання для спектрометрії випромінювання людини. За останніх 20 років потреби в таких виробах тільки зростали, а межі їх використання розширювалися. Для цих цілей знадобилися підкладки арсеніду галію великого діаметру, технології отримання яких через складність і шкідливість даного виробництва в європейських і більшості інших розвинених країн не існувало. Базове виробництво на Заводі чистих металів (м.Світловодськ, Україна) при відповідній модернізації обладнання та розробці нових технологічних процесів було готове до вирішення даного завдання. Таким чином, актуальність теми дисертаційної роботи Притчин С.Е., яка вирішує важливу науково-технічну і народно-господарську задачу, не викликає сумнівів,

підтверджується її тісним зв'язком з науковими темами і програмами Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, перелік яких наведено в дисертації і авторефераті, в тому числі циклом робіт, виконаних автором в рамках ДЦТНП (Нанотехнології та наноматеріали 2011-2014 рр) і ряді НДР.

## **2. Мета і структура дисертаційної роботи**

Основною метою даної роботи було вирішення актуальної науково-практичної проблеми - підвищення якості підкладок арсеніду галію, які використовуються для виробів мікроелектроніки шляхом розробки і впровадження нової технології виготовлення підкладок, а також впровадження методів, методик і апаратури неруйнівного контролю якості підкладок. Дисертаційна робота виконувалася автором на кафедрі інформаційно-керуючих систем Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського в рамках ДНТП «Нанотехнології та наноматеріали» 2010-2014 та пов'язана з реалізацією наступних науково-дослідних робіт:

- НДР «Розробка способів і методів експрес-контролю структурних недосконалостей в злитках монокристалічного кремнію і арсеніду галію» ДР № 0106V000055;
- НДР «Дослідження механізму формування термопружних напруг в пластинах кремнію, германію та арсеніду галію методом ІЧ полярометрії» ДР №0109U002281;
- НДР «Дослідження впливу процесів тепломасопереносу на електрофізичні та структурні властивості монокристалічного кремнію і арсеніду галію в процесі їх вирощування» ДР №0106U000056;
- НДР «Створення сучасних технологій вирощування структурно досконалого арсеніду галію» ДР №0114U003986;
- НДР «Створення автоматизованих комплексів контролю параметрів напівпровідників» ДР №011U003987;

- Господоговірною НДР «Розробка автоматизованої системи управління групою технологічних установок вирощування монокристалів арсеніду галію», госпдоговір №214 / 11 «ІКС-Галар» від 12.12.2011г замовник ПП «Галар», м. Світловодськ.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів забезпечується:

- Несуперечливістю наукових результатів, що відповідають сучасним уявленням в даній області і підтверджуються аналізом наукових даних;
- Детальним порівнянням отриманих аналітичних результатів та їх кількісним узгодженням з експериментальними результатами автора дисертації і з незалежними експериментальними результатами;
- Комплексним характером роботи, використанням цілого ряду експериментальних методик, сукупністю використаних в дисертації методів рішень поставленої наукової проблеми.

Дисертація складається з вступу, шести розділів і списку використаних джерел (207 джерел). Повний обсяг дисертації становить 332 стор, 145 малюнків, 25 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів

У **першому** розділі проведений критичний аналіз існуючої технології вирощування злиwkів GaAs, технології виробництва підкладок GaAs, методів і приладів контролю якості підкладок. Розглянуто вплив параметрів технологічного процесу на властивості підкладок GaAs

У **другому** розділі розглянута розробка математичних моделей для визначення структурної досконалості підкладок арсеніду галію. Розроблено математичні моделі, які описують вплив кристалографічної орієнтації та залишкових напружень на механічні властивості і густину дислокацій в підкладках GaAs. Розроблено модель, за допомогою якої можна

розраховувати вплив залишкових напружень на механічні властивості підкладок GaAs

У третьому розділі розглянута розробка методик контролю структурних порушень в підкладках GaAs. Розроблено методики неруйнівного контролю залишкових напружень густини дислокацій і відхилення від площинності.

У четвертому розділі проведено вдосконалення методів і розробка приладів неруйнівного контролю якості підкладок GaAs. Запропоновано структурну схему приладу вимірювання залишкових напружень в підкладках GaAs. Для графічного відображення результатів вимірювань розроблена окрема підпрограма, що виводить дані у вигляді 3D-графіка, кольірних полів або ізонапруг.

У п'ятому розділі проведена розробка елементів технології виробництва підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки. Досліджено вплив різних режимів відпалу на рівень залишкових напружень, за допомогою математичного моделювання розраховані значення залишкових напружень для різних режимів відпалу.

У шостому розділі проведено дослідження якості підкладок GaAs, розроблених по запропонованій технології. Зокрема, проведено ряд промислових випробувань підкладок GaAs, підготовка половини з яких проводилася за існуючою технологією, а половини - за розробленою. Отримано розподіл залишкових напружень по довжині злитка.

У висновках коротко формулюються основні результати роботи, отримані на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

**3. Основні результати дисертації, що становлять предмет її наукової новизни і практичної значущості.**

1) Удосконалено математичну модель, що описує вплив кристалографічної орієнтації на механічні властивості підкладки GaAs, в якій, на відміну від існуючих, з метою формалізації алгоритму обчислення і

підвищення точності розрахунків значень механічних властивостей підкладок GaAs для довільного кристалографічного напрямку було використано обчислення тензору пружної піддатливості в поверненій системі координат щодо базової, що забезпечує відхилення між розрахунковими значеннями модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона і експериментальними даними, що не перевищує 4,7%.

2) Удосконалено математичну модель, що дозволяє математично 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 решіток, що дозволяє визначити умови забезпечення механічної стійкості підкладок GaAs. Встановлено, що в діапазоні залишкових напруг до 60 Мпа підкладки GaAs залишаються механічно стабільними показано, що відбувається порушення стійкості при величині остаточних напруг 100 МПа;

3) Удосконалено математичну модель, що враховує вплив кристалографічної орієнтації підкладок GaAs на густину дислокацій, яка, на відміну від існуючих, описує механізм розмноження дислокацій для підкладок GaAs кристалографічної орієнтації (100) по кристалографічних напрямках [010] і [100];

4) Удосконалено метод контролю залишкових напружень в підкладках GaAs, заснований на поляриметрії з обертовими аналізатором і поляризатором, в якому для зменшення похибки вимірювання вперше враховується несоосність аналізатора, поляризатора і чвертьхвильових пластин, і анізотропія підкладки;

5) Удосконалено метод контролю густини дислокацій в підкладках GaAs, в якому вперше за рахунок математичних методів обробки відеозображення дислокацій забезпечується контроль як скупчень дислокацій, так і окремих дислокацій. Метод забезпечує проведення контролю густини дислокацій підкладок GaAs кристалографічної орієнтації (100) і (111) з відносною похибкою 30%. Встановлено, що найбільшу густину

дислокацій мають підкладки, виготовлені з верхньої частини злитка, а найменшу - із середньої частини.

Встановлено, що найкращі результати виявлення дислокацій в GaAs досягаються при використанні щавлевої кислоти. Запропоновано план, що дозволяє отримати карту розподілів дислокацій в підкладках GaAs. Розроблено методику автоматизованого контролю відхилення від густини підкладок GaAs. Встановлено, що основні похибки контролю викликаються похибкою механічної конструкції похибкового індуктивного датчика, похибкою реакції розпізнавання інтерференції. Розроблено методики калібрування системи контролю відхилень.

Удосконалена механічна модель залежності модуля Юнга і координат Пуассона від кристалографічної орієнтації.

6) Отримав подальший розвиток ваговий метод вимірювання діаметра злитка GaAs в процесі його вирощування, в якому для зменшення похибки вимірювання діаметра вперше методом повнофакторного експерименту визначено збужуючі фактори, що впливають на точність вимірювання ваги злитка. Метод забезпечує абсолютну похибку вимірювання діаметром не більше 1,5 мм для злитка діаметром 100 мм, що дозволило отримувати підкладки з густиною дислокацій менш, ніж  $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

7) Уточнено наукові дані про механізм відпалу підкладок GaAs і встановлено, що значну роль в процесі релаксації залишкових напруг при відпалі грають температурні градієнти, а температура відпалу має менш значний вплив. Обґрунтовано параметри відпалу, які становили: нагрівання з температурним градієнтом  $100^\circ\text{C}$  на годину до температури  $920^\circ\text{C}$ , витримка при температурі  $920^\circ\text{C}$  протягом 5 годин, охолодження з температурним градієнтом  $100^\circ\text{C}$  на годину, що дозволило знизити рівень залишкових напружень до значень, що не перевищують 40 МПа.

8) Уточнено наукові дані про механізм шліфування підкладок GaAs, зокрема, показана необхідність враховувати анізотропію GaAs при розміщенні підкладки при шліфуванні. Встановлено, що для зменшення

порушеного шару необхідно враховувати непаралельності поверхні підкладки коригування режиму шліфування з урахуванням, цього параметра що дозволило знизити рівень порушеного шару в підкладці GaAs до 10 мкм.

#### **4. Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному:

Отримані в дисертації результати по розробці технології виготовлення підкладок GaAs дозволяють підвищити якість підкладок в умовах промислового виробництва за рахунок розроблених методик і приладів, зокрема:

1. Розроблено прилад «Полярон-1» для вимірювання залишкових напруг в підкладках GaAs, який забезпечує проведення неруйнівного контролю залишкових напруг з абсолютною похибкою 2 МПа.

2. Розроблено прилад «Тв-Діслок-1» для визначення щільності дислокацій в підкладках GaAs телевізійним методом з відносною похибкою 33%.

3. Розроблено пристрій «АКІДП-1», який дозволяє будувати профіль деформації підкладки. Величина абсолютної похибки методу становить 0,8 мкм.

4. Розроблено технологію відпалу підкладок GaAs, яка дозволила зменшити рівень залишкових напруг до 40 МПа.

5. Розроблено пристрій для шліфування підкладок «САШ-АМ», який забезпечує режими шліфування зі зменшенням глибини порушеного шару до 10 мкм

6. Розроблено пристрій контролю діаметру злитка в процесі його росту, який забезпечує точність контролю не менше  $\pm 1,5$  мм для злитка діаметром до 100 мкм, що дозволило отримувати підкладки з щільністю дислокацій менш  $1,3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

7. Розроблено технологію виробництва підкладок GaAs, що забезпечує збільшення відсотка виходу придатних приладів на 5-7%

### **5. Достойнства і недоліки в оформленні дисертації**

Ознайомившись з дисертацією, можна сказати, що вона в цілому написана чітко і лаконічно, що характерно для фізико-технологічних і конструкторських розробок. Автор повністю розкриває суть отриманих результатів. Дисертація добре ілюстрована. Крім графічного матеріалу включає переконливі дані у вигляді таблиць і фотографій. Однак, відзначаючи загальне позитивне враження від дисертації, все ж слід вказати на існуючі недоліки.

1. В меті дисертаційної роботи на стор.8 зазначено «... вирішення важливої наукової проблеми - підвищення якості підкладок для приладів на основі GaAs конкурентоспроможних на світовому ринку ...», проте, в тексті дисертації відсутні прямі порівняльні дані, що підтверджують такий високий рівень розробок

2. В роботі використовується не зовсім вдала термінологія, наприклад, «люмінесцентна здатність» на стор.33, «живильна напруга» на стр.219.

3. При створенні моделі для визначення структурного удосконалення підкладок GaAs автор не використовує дані інших авторів. Наприклад. Концевого Ю.А. (Див. Ю.А. Концевий, Ю.М. Литвинов, Е.А. Фаттахов «Пластичність і міцність напівпровідникових матеріалів і структур» М., «Радіо і зв'язок», 1982, стр.10-18).

4. При дослідженні напруженого і деформованого стану підкладок GaAs автор використовує коло Мора, але не вказує його конкретного місця в роботі.

5. Як в дисертації, так і в авторефераті мають місце прикрі одруківки.

У дисертації розроблено математичну модель для визначення структурної досконалості підкладок GaAs. Розроблено методики контролю структурних порушень в підкладках GaAs, вдосконалені методи і розроблені



пристрої для неруйнівного контролю структурних порушень в підкладках GaAs. Розроблено технологію виробництва підкладок GaAs діаметром 4 // і досліджено якість підкладок GaAs, виготовлених згідно розробленої технології.

#### **6. Достовірність і новизна результатів роботи**

Основні результати дисертаційної роботи добре обґрунтовані і перевірені експериментально за допомогою сучасних методів досліджень. Є хороше узгодження між відповідними даними, отриманими різними методами. Представлені до захисту результати, згідно яких сформульована наукова новизна і практична значущість роботи, отримані вперше і не викликають сумнівів.

Результати роботи знайшли широке застосування в цілому ряді областей науки і техніки і, в тому числі в ВАТ Науково-дослідний інститут особливо чистих матеріалів (м.Москва, РФ), Інституті фізики напівпровідників ім. Лашкарьова (м.Київ Україна), ПП «Голар» (г.Світловодськ, Україна) Результати роботи можуть бути використані для подальшого створення нових і вдосконалення існуючих приладів на основі GaAs в різних фізичних інститутах Національної Академії наук України, наприклад, Інституті фізики напівпровідників ім. Лашкарьова НАНУ (м.Київ Україна), Інституті ядерних досліджень НАНУ, Інституті фізики НАНУ, а також в Національному Університеті ім. Тараса Шевченка, НТУ «Київський політехнічний інститут», організаціях Національного космічного агентства України, ДП НДІ «Оріон» (Київ, Україна), ВО «Карат» (м.Львів, Україна) інших зацікавлених організаціях.

#### **7. Висновок**

Оцінюючи весь комплекс науково-технічних розробок і досліджень, які представлені в роботі, слід зазначити, що дисертаційна робота Притчина С.Е. є своєчасною і пов'язана із замовленнями і потребами розвитку нових розділів GaAs матеріалознавства і приладів на його основі. Вона є завершеним науковим дослідженням, яке включає нове рішення актуального

завдання створення промислових підкладок GaAs для виробів мікроелектроніки, обґрунтоване вагомими експериментальними результатами і впровадженням ряду розробок у виробництво нової техніки.

Основні наукові результати дисертації опубліковані в профільних журналах та апробовані на профільних міжнародних конференціях. Автореферат повністю відображає зміст дисертації, основні наукові положення і практичну значущість роботи. Матеріали докторської дисертації Притчина С.Е. не включають матеріалів його кандидатської дисертації «Удосконалення вирощування злитків кремнію з рівномірним розподілом кисню» (Харків, 2003).

Виходячи з вищесказаного вважаю, що дисертація «Розробка технології виробництва підкладок арсеніду галію для виробів мікроелектроніки» відповідає вимогам МОН України, що пред'являються до дисертацій, а її автор Притчин Сергій Емілійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 - технологія, обладнання і виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,  
зав. лабораторією  
фізико-технологічних проблем  
твердотільної НВЧ електроніки



Р.В.Конакова

Підпис Р.В.Конакової засвідчую

Вчений секретар

Інституту фізики напівпровідників

ім.В.С.Лашкарьова

НАН України

доктор хімічних наук, професор



В.М.Томашик