

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

**ЛИТВИН ОКСАНА СТЕПАНІВНА**

УДК: 539.25+539.26

**МОРФОЛОГІЧНІ ТА СТРУКТУРНІ ЗМІНИ В  
НАПІВПРОВІДНИКАХ  $A^3B^5$  І  $A^2B^6$  ТА  
СИСТЕМАХ НА ЇХ ОСНОВІ, СТИМУЛЬОВАНІ  
ПІСЛЯРОСТОВИМИ ОБРОБКАМИ**

01.04.07 - фізика твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2001

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників  
Національної академії наук України

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук  
**Прокопенко Ігор Васильович,**  
Інститут фізики напівпровідників НАН України,  
завідуючий відділом електроннозондових методів структурного аналізу  
напівпровідникових матеріалів і систем.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Фекешгазі Іштван Вінцейович,**  
Інститут фізики напівпровідників НАН України,  
завідуючий відділом нелінійних оптичних систем;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Фодчук Ігор Михайлович,**  
Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича Міністерства  
освіти та науки України,  
професор кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету.

**Провідна установа:** Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,  
м.Київ

**Захист відбудеться** "19" жовтня 2001 р. о 14<sup>15</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.199.01  
в Інституті фізики напівпровідників НАН України  
за адресою: 03028, Київ - 28, проспект Науки, 45

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України (03028, Київ - 28, проспект Науки, 45).

Автореферат розісланий "15" вересня 2001 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат фізико-математичних наук

Охріменко О.Б.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Останні кілька десятиріч значно інтенсифікувались дослідження, що привели до широкого застосування в електроніці полікристалічних плівок з нових матеріалів і сполук, які характеризуються принципово новими властивостями та можливостями у створенні напівпровідникових приладів. Так, наприклад, вченими відділень та спеціального конструкторсько-технологічного бюро Інституту фізики напівпровідників НАН України та Державного науково-дослідницького інституту “Оріон” розроблені нові методи одержання та післяростових обробок напівпровідникових приладних структур плівка-підкладка різного типу на основі технологічно важливих бінарних сполук  $A^3B^5$  і  $A^2B^6$ . Подальша оптимізація методів та їх розвиток до рівня промислових технологій вимагає досліджень, направлених на виявлення структурних змін використуваних матеріалів, зумовлених зовнішніми впливами. Це, зокрема, дослідження структурних та фізико-хімічних властивостей систем в залежності від умов росту плівки, а також при моделюванні екстремальних умов експлуатації.

Наявність перехідної області між контактними матеріалами, розмірний ефект, фазова та структурна нерівноважності (напруги, дислокації та їх скупчення, двійники, дефекти упаковки, точкові дефекти, мікропори, вакансійні кластери тощо) в системах плівка-підкладка ведуть до того, що в процесі одержання плівок та експлуатації приладів на їх основі можливий перехід в більш рівноважний стан. Такі процеси супроводжуються зміною властивостей, деградацією параметрів пристроїв та виходу їх з ладу. Необхідність розуміння характеру і походження вказаних вище структурних нерівноважностей та можливість прогнозування їх поведінки вимагає пошуку нових методів структурних досліджень та їх експериментальної бази. Зокрема, розвиток електронно-обчислювальної техніки та інтегральної електроніки дозволяють поєднати на новому науково-технічному рівні планування фізичного експерименту, його проведення, обробку та аналіз результатів.

Яскравим прикладом такого поєднання може слугувати новітня галузь мікроскопії – атомно-силова мікроскопія поверхні (АСМ). За спектром об’єктів, умовами досліджень та інформативністю метод АСМ цілком співмірний з таким класичним неруйнівним методом досліджень як рентгеноструктурний. Разом з тим, залишається актуальною задача встановлення взаємозв’язку характеристик поверхні із фундаментальними властивостями матеріалів, зокрема, структурними. Комплексне використання цих двох методів дозволяє з одного боку отримати найбільш повну інформацію про структурні властивості об’єктів досліджень, а з іншого – виявити кореляцію властивостей поверхні та внутрішньої кристалічної структури.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася в рамках наступних тем та програм: “Комплексні дослідження впливу міждефектної взаємодії в кристалах Si, Ge, GaAs, КРТ і МРТ на кінетику електронних процесів в термодинамічно рівноважних і нерівноважних умовах”, 1995-1999 рр. (Постанова Бюро ВФА НАН України № 9 від 20.12.1994 р., номер держ. реєстрації 0195U024512); “Комплексні дослідження формування та еволюції дефектних структур технічно важливих напівпровідникових матеріалів (Ge, Si, SiC, сполук  $A^2B^6$ ,  $A^3B^5$ ), систем на їх основі в залежності від умов одержання і впливу технологічних факторів”, 2000-2001 рр. (Постанова Бюро ВФА НАН України № 12 від 16.11.1999 р., номер держ. реєстрації 0100U000149); “Рентгеноспектральна методика і апаратура для контролю хімічного складу на шляху технологічного прогресу” (Проект ДФФД 2.15/11 за договором № Ф4-313-97 від 26.09.1997).

### **Мета і задачі дослідження**

**Мета** даної роботи полягала у виявленні зв'язку морфології поверхні полікристалічних плівок, що є компонентами напівпровідникових приладних структур, з внутрішньою кристалічною структурою та процесами на межі поділу фаз, спричиненими післяростовими обробками.

**Об'єкт дослідження** – морфологія і кристалічна структура напівпровідникових сполук  $A^3B^5$  і  $A^2B^6$  та систем на їх основі в залежності від режимів одержання і післяростових обробок.

**Предметом дослідження** були морфологічні та структурні зміни в сполуках GaAs і ZnS та системах плівка-підкладка на їх основі під впливом швидкого та звичайного високотемпературного відпалу.

Дослідження проведено для кількох груп зразків. Першу групу складали структури з полікристалічною люмінесцентною плівкою сульфїду цинку, легованого міддю, виготовлені різними методами, які представляють значний інтерес в якості випромінювачів зеленого і синього кольору. Основною проблемою використання тонкопліткових люмінофорів з ZnS:Cu, виготовлених відомим методом електронно-променевого напилення, є швидка деградація люмінесцентних властивостей таких плівок. Але останні дослідження показали, що високотемпературний відпал (800-900 °C) підвищує їх стійкість на 1-2 порядки. Цей факт дозволяє вважати їх перспективними для подальшого дослідження на предмет методів одержання та післяростових обробок для досягнення потрібних параметрів.

Другу групу складали бар'єрні структури  $TiB_2/n-n^+$ -GaAs, Au- $TiB_2/n-n^+$ -GaAs і Au-Mo- $TiB_2$ -AuGe/ $n^+$ -GaAs, піддані швидкому термічному відпалу. Вибір дибориду титану в якості металевої плівки на арсенідгалієвій підкладці зумовлений тим, що він, володіючи металічним

типом зв'язку атомів, водночас характеризується унікальними властивостями порівняно з чистими металами. Такі характеристики дибориду титану, як високі електро- та теплопровідність, твердість, температура плавлення, стійкість до хімічного впливу дозволяють застосовувати його в якості бар'єрних та захисних шарів у виробництві напівпровідникових приладів. Інертність  $TiB_2$  до благородних металів, зокрема, золота, дає можливість використовувати їх як антидифузійний шар між золотом та напівпровідником в приладних структурах.

Реалізація поставленої мети вимагала вирішення наступних *наукових задач*:

1. Виявити залежність морфології поверхні та кристалічної структури полікристалічних плівок  $ZnS:Cu$  від режимів осадження та типу підкладки при вирощуванні плівок традиційним методом електронно-променевого напилення (EBE – electron beam evaporation) та вперше застосованим методом термічного розкладу металоорганічних сполук міді та цинку (MOCVD – metalorganic chemical vapour deposition).
2. Дослідити перебіг рекристалізаційних процесів в плівках  $ZnS:Cu$ , одержаних методом EBE, які викликані високотемпературним відпалом з легуванням галієм за новим методом, та відображення їх на поверхні плівок.
3. Визначити рівень механічної деформації, розподіл точкових дефектів в приповерхневих шарах підкладки GaAs, а також фазовий склад плівки і границі розділу (ГР) плівка-підкладка в бар'єрних структурах з антидифузійним шаром  $TiB_2$  ( $TiB_2/GaAs$ ,  $Au-TiB_2/GaAs$ ,  $Au-Mo-TiB_2-AuGe/GaAs$ ), одержаних методом магнетронного розпилення.
4. Дослідити вплив швидкого високотемпературного відпалу (ШТВ) на зміну морфології поверхні металічних плівок та процеси структурної релаксації в приповерхневих шарах підкладки GaAs і на ГР в багатошарових структурах  $TiB_2/GaAs$ ,  $Au-TiB_2/GaAs$  та  $Au-Mo-TiB_2-AuGe/GaAs$ .

Вибір *методів дослідження* визначався поставленими задачами. Вірогідність отриманих результатів забезпечувалась комплексними дослідженнями морфологічних і структурних властивостей зазначених матеріалів методами атомно-силової мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу при доповненні їх даними фото- та електролюмінесценції, електрофізичних вимірювань, оже-спектроскопії, одержаними колегами з інших відділів Інституту.

**Наукова новизна одержаних результатів.** При дослідженні морфології та структурної досконалості багатошарових систем із полікристалічними плівками, а також характеру релаксаційних процесів в них при післяростових обробках в даній роботі отримано ряд *нових наукових результатів*:

1. Встановлено стабільність фазового складу плівок  $ZnS:Cu$  та дію домішок галію як активатора

процесів рекристалізації при безвакуумному високотемпературному відпалі плівок з одночасним легуванням галієм.

2. Виявлено морфологічні та структурні особливості плівок ZnS:Cu, отриманих методом термічного розкладу сірковмісних металоорганічних сполук цинку і міді. Показано, що розмір зерен поверхні визначає енергетичний спектр електролюмінесценції (зменшення розміру призводить до зміщення максимуму світіння в бік нижчих енергій).
3. Вперше рентгеноструктурними методами показано, що при магнетронному розпиленні шару TiB<sub>2</sub> на підкладинку GaAs на границі розділу фаз утворюється перехідний шар твердих розчинів заміщення Ga<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>As та Ga<sub>x</sub>B<sub>1-x</sub>As, процес формування якого визначається товщиною плівки.
4. Швидкий термічний відпал бар'єрних систем TiB<sub>2</sub>/GaAs, Au-TiB<sub>2</sub>/GaAs та Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs приводить до структурної релаксації шляхом розпаду твердих розчинів титану і бору, анігіляції та генерації дислокацій, їх взаємодії з точковими дефектами і, як наслідок, перерозподілу полів пружних напруг.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень важливі для вдосконалення технології виготовлення твердотільних структур для мікроелектронних та оптичних пристроїв, оптимізації їх параметрів, підвищення ефективності роботи. Зокрема, вони були використані при розробці методу високотемпературного безвакуумного відпалу електролюмінесцентних приладних структур та отримання структур ZnS:Cu методом термічного розкладу сірковмісних металоорганічних сполук цинку і міді. Результати досліджень контактних систем метал-GaAs використані на ДП НДІ "Оріон" при виготовленні дослідних партій мікроелектронних приладів (діодів Ганна, Шотткі).

Комплекс неруйнівних методів атомно-силової мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу, реалізований при виконанні роботи для вивчення морфологічних та структурних особливостей матеріалів і структур, дозволяє отримати вичерпну інформацію про рівень їх структурної досконалості та кінетику релаксаційних процесів, викликаних технологічними обробками та впливом зовнішніх факторів.

Отримані в роботі результати щодо кореляції властивостей поверхонь виявлених методами АСМ та структурних характеристик за даними рентгеноструктурного аналізу дозволяють розвинути модельні уявлення, які можуть бути використані при аналізі та інтерпретації результатів АСМ вимірювань.

**Особистий внесок здобувача.** Участь здобувача в отриманні представлених в дисертації наукових результатів полягала в обговоренні проблемних завдань, теоретичних розра-

хунках, підготовці та проведенні експериментів. Здобувачем здійснено більшість вимірювань методом атомно-силової мікроскопії та рентгенодифракційних досліджень, числову обробку результатів, моделювання властивостей. Постановка завдання та інтерпретація результатів проведені у співдружності зі співавторами наукових робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи були представлені на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях: 7th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (Goteborg, Sweden, 1999); VIII International Symposium "Advanced Display Technologies (Crimea, Ukraine, 1999); Науковій конференції молодих вчених "Лашкарьовські читання" (Київ, 2000); 8<sup>ми</sup> Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, Україна, 2001).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації опубліковано в 8 роботах, в тому числі 5 статтях в реферованих фахових журналах та 3 тезах доповідей на міжнародних конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 232 найменування робіт, 2-х додатків та переліку умовних скорочень. Робота викладена на 112 сторінках машинописного тексту, включає 47 рисунків, 11 таблиць. Повний обсяг 153 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

**Перший розділ** містить огляд сучасної літератури, що висвітлює питання стосовно особливостей кристалічної структури полікристалічних плівок та механізмів дефектоутворення як при їх вирощуванні, так і внаслідок впливу післяростових обробок (швидкого та звичайного високотемпературних відпалів). Приведено огляд можливостей та обмежень дослідження і аналізу поверхні матеріалів за допомогою скануючи зондових мікроскопів. Розглянуті особливості аналізу дифракції рентгенівських променів (РП) в моно- та полікристалах з структурними дефектами різного типу: наявність пружної мікро- і макродеформації, відхилення від стехіометрії, дрібнозернистість.

Показано, що широке використання плівок з нових матеріалів в приладних структурах вимагає високоефективного неруйнівного контролю їх структурних параметрів після вирощування, а також при моделюванні екстремальних умов експлуатації для забезпечення стабільної роботи приладів в будь-яких навколишніх умовах. Тому реалізація та апробація комплексу

практичної діагностики технологічно важливих напівпровідникових матеріалів та багатошарових структур на основі методів зондової мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу для характеристики структур різного типу, виявлення термостимульованих процесів структурного впорядкування в них та взаємозв'язку наноморфології поверхні і структурних особливостей є важливою науковою та прикладною задачею.

У **другому розділі** описано експериментальні методики та особливості методів вивчення морфології поверхні та визначення структурних параметрів досліджуваних об'єктів. Використання методу атомно-силової мікроскопії для вивчення морфології та статистичного аналізу поверхні зумовлене його високою роздільною здатністю (0,1 – 1,0 нм) та експресністю. В розділі приведено опис спеціальних функцій, використаних при статистичному аналізі поверхні досліджуваних плівок: максимальний розмах висот, середньоарифметична та середньоквадратична шорсткість поверхні, асиметрія, ексцес, середня кривизна вершини локальних максимумів, середньоквадратичне відхилення кута нахилу вершини, відносна площа поверхні.

Було розроблено емпіричний метод, який дає можливість надійного контролю сили тиску голки на поверхню безпосередньо в процесі ручної корекції відстані зонд-поверхня при АСМ-вимірюваннях. Для підвищення точності вимірювань, можливості комп'ютерного накопичення числових даних у форматах зручних для подальшого детального аналізу були розроблені і виготовлені з використанням стандартного та оригінального програмного забезпечення автоматизована система керування та накопичення даних рентгенодифрактометричних вимірювань та система цифрового запису зображень оптичного модуля АСМ.

Комплекс використаних методів рентгеноструктурного аналізу підбирався з метою отримання інформації про структурну релаксацію та перебудову дефектів різного типу при зовнішніх впливах, а саме для здійснення фазового аналізу досліджуваних матеріалів; визначення рівня механічних напруг в системах і середнього розміру кристалітів полікристалічної плівки; виявлення відхилень від стехіометрії в приповерхневих шарах підкладки з монокристалічного GaAs.

У **третьому розділі** викладено результати досліджень морфологічних та структурних змін полікристалічних плівок ZnS:Cu, вирощених методом ЕВЕ на різних підкладках (кераміка BaTiO<sub>3</sub>, скло, монокристалічний кремій) та відпалених при температурі 850 °C протягом 1 год. з одночасним легуванням галієм за новим без вакуумним методом. В цьому ж розділі наведено аналіз особливостей морфології та структурної будови плівок ZnS:Cu на підкладках із BaTiO<sub>3</sub> і скла температурою від 220 до 300 °C, вперше одержаних методом МOCVD. Проведено порівняльний аналіз поверхні плівок ZnS:Cu/BaTiO<sub>3</sub>, одержаних мето-



дами EBE та MOCVD.

Морфологія поверхні досліджуваних полікристалічних плівок ZnS:Cu, осаджених методом EBE, визначається типом підкладки та режимом післяростової обробки (табл.1). Хоча до відпалу більшими розмірами зерен та нижчим рівнем напруг характеризується плівка на кремнієвій підкладці (0,49 ГПа поряд з 4,55 ГПа на кераміці та 6,09 ГПа на склі), під час відпалу внаслідок великої різниці коефіцієнтів теплового розширення ZnS і Si плівка руйнується. Таким чином, з точки зору структурної досконалості та можливості застосування післяростової високотемпературної обробки, найбільш перспективним матеріалом для використання в якості підкладок для описаних структур є полікристалічний BaTiO<sub>3</sub>. Відпал з одночасним легуванням галієм викликав рекристалізацію полікристалічної плівки: середній розмір зерен збільшився в 3-4 рази, напруги зменшились з 4,55 до 0,024 ГПа, поверхня стала значно одноріднішою.

**Таблиця 1.**

Середні розміри зерен поверхні плівок ZnS:Cu (нм).

Структура	EBE			MOCVD
	вихідні	відпалені при 800 °C	відпалені+Ga	
ZnS/BaTiO <sub>3</sub>	250*	600	900	25 (260), 150 (300)**
ZnS/скло	120*	–	–	200
ZnS/Si	300*	–	–	–

Примітки: \* плівки товщиною ~ 0,6 мкм;

\*\* в дужках вказана температура підкладки, °C.

Як показали дослідження люмінесцентних властивостей плівок, проведені нашими колегами, вказані структурні зміни привели до підвищення інтенсивності фото- і електролюмінесценції (ФЛ, ЕЛ) на кілька порядків та зниження порогової напруги збудження останньої з 100 до 10 В.

Морфологія плівок, одержаних хімічним методом, порівняно з “EBE-плівками”, визначається не тільки типом підкладки, але й дуже чутлива до температури підкладки (див. табл.1), оскільки в цьому випадку осаджувані атоми володіють значно нижчою енергією. Така залежність розмірів зерен від температури підкладки дає можливість керувати процесом зерноутворення, тобто одержувати плівки ZnS на кераміці з розмірами зерен кілька сотень нанометрів і, навпаки, на скляній підкладці – розмірами в декілька десятків нанометрів. Дійсно, дослідження ЕЛ плівок ZnS:Cu, осаджених методом MOCVD, підтвердили пряму залежність їх випромінювальних властивостей від умов формування – температури і структури підкладки. Плівки на склі характеризувались зеленим кольором випро-

мінювання ( $\lambda_{\max} \sim 520$  нм), тоді як плівки на  $\text{BaTiO}_3$  температурою  $260$  °С – жовтим ( $\lambda_{\max} = 570$  нм). Збільшення температури підкладки  $\text{BaTiO}_3$  до  $300$  °С призводило до зміщення піку інтенсивності випромінювання в високоенергетичну область спектру ( $\lambda_{\max} = 520$  нм).

Слід відмітити, що ми спостерігали значну різницю рельєфів поверхні плівок, відпалених з галієм, в залежності від розподілу (однорідний – пластина, неоднорідний – порошок) галію під час легування. При однорідному розподілі джерел галію зерна характеризуються гладкою поверхнею і розмірами в межах  $400\text{-}1200$  нм; в той час як неоднорідний розподіл спричинює суттєвий розкид розмірів зерен на поверхні – приблизно від  $40$  нм до  $1000$  нм (зерна великого розміру локалізуються, в основному, на вершинах зерен підкладки). Такі скупчення великих зерен можна інтерпретувати як область, збагачену галієм.

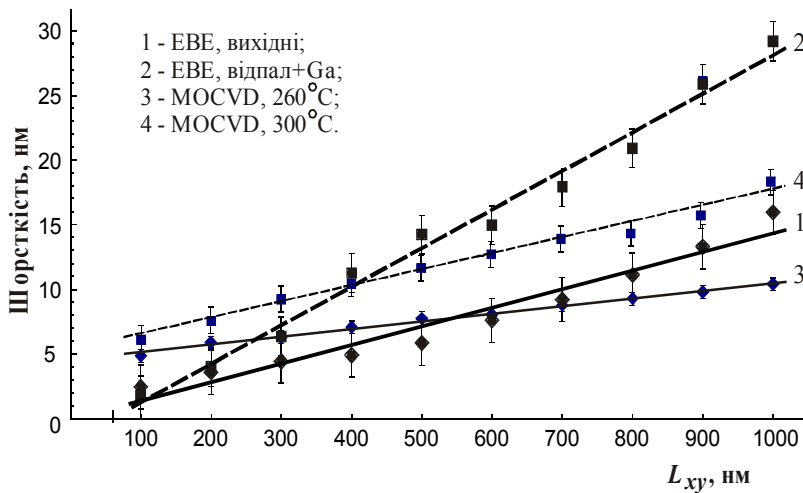
Для пояснення різкого впливу легування галієм на розміри зерен можна припустити, що в цьому випадку галій виступає не тільки як легуюча домішка, але й як активатор рекристалізації, який полегшує утворення крупнозернистої текстурованої структури. До чого конкретно зводиться роль активаторів на даний час до кінця не з'ясовано. Одним з пояснень впливу активатора на процес рекристалізації може бути припущення, що в той час як частина атомів активатора дифундує в глибину плівки, частина залишається по границям зерен у вигляді частинок іншої фази. Такі мікрочлени впливають на зернограничну енергію цих зерен і призупиняють їх ріст, що прискорює ріст “вільних” зерен. З другого боку, присутність включень рідкої фази галію (температура плавлення  $302,9$  К) також може прискорювати процеси масопереносу під час міграції границь зерен.

Оскільки, морфологію поверхні можна розглядати як дзеркало змін внутрішніх структурних властивостей матеріалу, ми досліджували залежність параметрів шорсткості поверхні від методу осадження і післяростових обробок, порівнюючи поверхні плівок  $\text{ZnS}:\text{Cu}$  на підкладці  $\text{BaTiO}_3$ .

Масштабний характер шорсткості зернистої поверхні полікристалічного сульфід цинку, що спостерігався нами, в межах площини  $1 \times 1$  мкм описується лінійною залежністю  $R_a$  від розміру аналізованої області зображення  $L_{xy}$  (рис.1). Це дозволяє прийняти коефіцієнт нахилу прямої як новий параметр для оцінки властивостей поверхні, що характеризує однорідність висоти рельєфу по аналізованій площі (назвемо його масштабною однорідністю рельєфу). Очевидно, що  $k$  не може приймати від'ємних значень, а при  $k = 0$  шорсткість поверхні постійна незалежно від величини аналізованої площі, тобто будь-яка мала область поверхні подібна як завгодно великій площі тієї ж поверхні.

Нами була здійснена перевірка збереження такого вигляду залежності по поверхні площею понад  $1$  мкм<sup>2</sup> шляхом підстановки різних значень  $L_{xy}$  в рівняння апроксимуючої прямої

$R_a(L_{xy})$  і порівняння їх з експериментальними значеннями шорсткості. Було одержано, що для вихідних плівок сульфїду цинку, одержаних методом ЕВЕ, залежність зберігається. Рекристалізація плівки під впливом відпалу та легування, веде до зміни залежності  $R_a(L_{xy})$  в точці 3 мкм: значення шорсткості перестає рости за лінійним законом і досягає в точці 5 мкм "насичення". Аналогічну особливість поверхні бачимо і у випадку МOCVD-плівок з  $T_S = 260$  °С. При підвищенні температури підкладки до 300 °С ми спостерігали таке "насичення" шорсткості вже в точці 2 мкм. Фізичний зміст «насичення» шорсткості при збільшенні аналізованої поверхні, як ми вважаємо, наступний: зображення володіє так званою характеристичною областю неоднорідності  $L_{xy}^*$ , якою можна обмежитися при аналізі, оскільки будь-яка поверхня більша цієї області – однорідна. Зрозуміло, що чим менша ця область, тим однорідніша поверхня в горизонтальній (латеральній) площині.



**Рис.1** Залежність шорсткості поверхні плівок ZnS:Cu/BaTiO<sub>3</sub> від розміру аналізованої площі, коефіцієнти нахилу прямих ( $k$ ) відповідно рівні: 0,0144 (1); 0,0299 (2); 0,0059 (3); 0,0137 (4).

Комплекс параметрів шорсткості поверхні, що характеризують її по вертикальному напрямку та латеральній неоднорідності (масштабна однорідність рельєфу  $k$ , характеристична область неоднорідності  $L_{xy}^*$ ), дозволили провести достатньо повний порівняльний аналіз морфології плівок сульфїду цинку в залежності від особливостей її одержання.

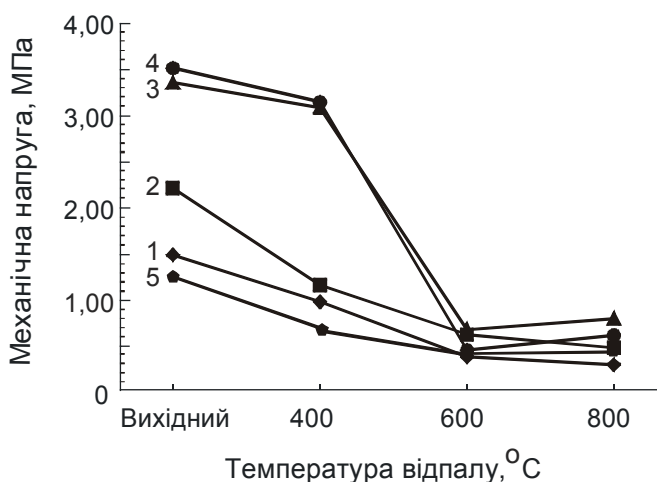
На основі проведених АСМ- та рентгеноструктурних досліджень плівок сульфїду цинку, легovanого міддю, вирощених різними методами, показано, що плівки ZnS:Cu, отримані хімічним методом з металоорганічних сполук – дітіокарбаматів цинку та міді, – характеризуються більш упорядкованим рельєфом, ніж плівки, отримані методом електронно-променевого напилення у вакуумі без додаткових обробок. Для використання нового методу відпалу з одночасним легуванням галієм для ЕВЕ-плівок в якості підкладки найоптимальніша кераміка BaTiO<sub>3</sub>. Під час відпалу і легування галієм проходить рекристалізація плівок – перехід до більш структурно рівноважного стану, що веде до значного покращання їх фото- та електролюмінісцентних характеристик.

Виявлені параметри однорідності поверхні – масштабна однорідність рельєфу, характеристична область неоднорідності – доповнюють вже відому систему метричних параметрів аналізу шорсткості поверхні та дозволяють припустити існування відповідних залежностей шорсткості поверхні від  $L_{xy}$  для плівок різного типу.

У **четвертому розділі** досліджено процеси, що проходять в області межі розділу метал-GaAs та в металічних плівках внаслідок швидкого (1800 °C/сек.) температурного відпалу контактних структур TiB<sub>2</sub>/GaAs, Au-TiB<sub>2</sub>/GaAs і Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs та залежність цих процесів від режиму нанесення (досліджувались зразки із плівкою, нанесеною при струмі 0,3 та 0,4 А), товщини плівки (10 та 50 нм) та температури відпалу (400, 600 та 800 °C протягом 1 хв.).

Відомо, що високі температури викликають наближення до рівноважного стану структурно недосконалих та напружених матеріалів і систем, яке реалізується активованими високою температурою дифузійними процесами та генерацією і рухом дислокацій. Але, незважаючи на значну кількість публікацій щодо закономірностей впливу відпалу на структуру різних матеріалів, робіт пов'язаних із вивченням властивостей напівпровідникових структур, в яких використані антидифузійні плівки TiB<sub>2</sub> досить мало, а особливо, статей, в яких розглядалися б структурні аспекти релаксаційних процесів, що відбуваються біля ГР TiB<sub>2</sub>/GaAs. Крім того, вимагають детальнішого вивчення дифузійні процеси, що призводять до зміни межі розділу та збільшенню її локальної гетерогенності при високих температурах.

За даними рентгенодифракційних вимірювань кривизни найбільш структурно нерівноважна система одержується при струмі наплення 0,4 А та товщині плівки дибориду титану 50 нм (рис.2). Наплення плівки золота (50 нм) компенсує початкові внутрішні деформації за рахунок різних коефіцієнтів теплового розширення контактуючих матеріалів.



**Рис. 2.** Зміна механічної напруги в приповерхневих шарах підкладки GaAs, спричинена відпалом: 1, 2 - товщина плівки TiB<sub>2</sub> 10 нм, струм розпилення 0,3 А та 0,4 А, відповідно; 3, 4 - товщина плівки TiB<sub>2</sub> 50 нм, струм розпилення 0,3 А та 0,4 А, відповідно; 5 - товщини плівок Au і TiB<sub>2</sub> 50 нм, струм розпилення 0,4 А.

З аналізу зміни механічних напруг, а також зміни інтегральної відбиваючої здатності структурного та квазізабороненого відбивань об'єктів дослідження ми одержали якісну ін-

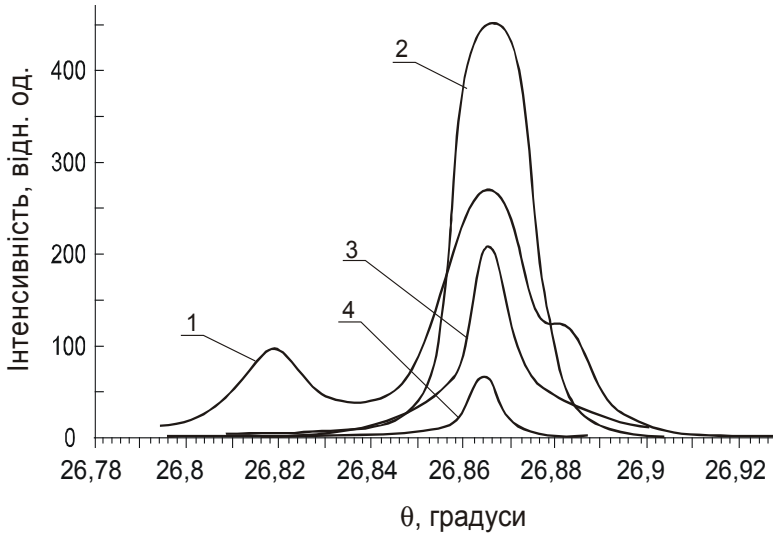
формацію про поведінку структурних недосконалостей в приповерхневих шарах підкладки під впливом ШТВ.

Для структур  $\text{TiB}_2/\text{GaAs}$  показано, що в процесі відпалу в областях, близьких до ГР, поряд із зменшенням пружних напруг проходять інтенсивні процеси генерації дислокацій та перерозподілу точкових дефектів і зокрема вакансій галію та миш'яку. При температурі  $800\text{ }^\circ\text{C}$  відбувається взаємодія дислокацій і поширення їх в глибину підкладки, а також активна дифузія атомів галію і миш'яку в плівку  $\text{TiB}_2$ , що веде до утворення розмитої ГР товщиною порядку  $50\text{ нм}$ .

Для вихідної структури  $\text{Au-TiB}_2/\text{GaAs}$  спостерігався значно більший інтегральний коефіцієнт відбивання порівняно із структурою  $\text{TiB}_2/\text{GaAs}$ . Враховуючи менший рівень деформації для вихідних структур з подвійною металізацією, можна зробити висновок про наявність значно більшої кількості дислокацій в приповерхневому шарі підкладки до відпалу. Активізацію процесів структурної релаксації та взаємодію дислокацій викликав відпал вже при температурі  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . При вищих температурах відпалу – навпаки, спостерігається генерація нових дислокацій та порушення стехіометрії в бік надлишку миш'яку. Ймовірно, галій при цьому виділяється у вигляді мікрочлеників.

Аналіз кривих дифракційного відбивання РП вихідних структур  $\text{TiB}_2/\text{GaAs}$  із товщиною плівки  $50\text{ нм}$  виявив наявність перехідного шару між плівкою і підкладкою, а саме – шару твердих розчинів заміщення  $\text{Ga}_x\text{Ti}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,8601$ ) та  $\text{Ga}_x\text{V}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,9956$ ). Дослідження таких же систем із плівкою  $10\text{ нм}$  твердих розчинів не виявило. Напилення плівки золота на готову структуру  $\text{TiB}_2(50\text{ нм})/\text{GaAs}$  на склад сформованого перехідного шару майже не впливає (рис.3).

Після відпалу при температурі  $400\text{ }^\circ\text{C}$  відбувається трансформація твердих розчинів, що приводить до формування перехідного шару з градієнтом концентрацій титану і бору. Відпал при вищих температурах призводить до розпаду твердих розчинів та упорядкування домішкових дефектів шляхом утворення мікрочлеників фаз  $\text{Ti}$  та  $\text{V}$ , як в одношарових структурах, так і в структурах із золотою плівкою, з тією різницею, що при наявності плівки золота ці процеси проходять активніше.



**Рис. 3.** Криві дифракційного відбивання структур Au-TiB<sub>2</sub>/GaAs (ковзаюча геометрія, відбиття (311)): 1 – вихідний зразок; 2, 3 (інтенсивність збільшена в 12,5 раз), 4 (інтенсивність збільшена в 25 раз) – зразки, відпалені при температурах 400, 600 та 800 °С, відповідно.

Щодо кристалічної будови самої плівки, то рентгенівські дифрактограми вказують на те, що плівка містить дві фази дибориду титану: полікристалічну гексагональну та квазіаморфну. Причому для структур з товщиною плівки 10 нм явно виражена переважаюча орієнтація кристалітів у напрямку  $\langle 0001 \rangle$ , яка частково порушується після відпалу. Відпал зразків при температурі 800 °С веде до перекристалізації квазіаморфної фази в полікристалічну незалежно від топології досліджуваних структур.

АСМ-дослідження виявили суттєво більші шорсткість  $R_a$  та неоднорідність рельєфу поверхні вихідних плівок золота, ніж вихідних плівок дибориду титану, що зумовлено нанесенням Au на плівку TiB<sub>2</sub> із власними нерівностями, тоді як TiB<sub>2</sub> наносився на гладку поверхню підкладки (табл.2).

З таблиці видно, що залежність середньої шорсткості поверхні від температури відпалу як плівок TiB<sub>2</sub> так і плівок Au немонотонна. Масштабна однорідність рельєфу в обох випадках росте із збільшенням температури.

Різке збільшення шорсткості поверхні і неоднорідності рельєфу плівок TiB<sub>2</sub> при температурі 800 °С ймовірно зумовлена дифузією атомів Ga і As на поверхню плівки, про що свідчить оже-аналіз структури TiB<sub>2</sub>/GaAs.

**Таблиця 2.**

Зміна шорсткості поверхні плівок Au та TiB<sub>2</sub> внаслідок відпалу (поверхня 1x1 мкм).

Температура відпалу	Au-TiB <sub>2</sub> /GaAs			TiB <sub>2</sub> /GaAs		
	$R_a$ , нм	$k$	$L_{xy}^*$ , нм	$R_a$ , нм	$k$	$L_{xy}^*$ , нм
Вихідний	4,274	0,0057	500	0,597	0,0005	–
400 °С	5,304	0,0071	500	0,299	0,0002	–
600 °С	6,030	0,0078	500	1,016	0,0012	200

800 °C	4,735	0,0079	400	2,502	0,0024	600
--------	-------	--------	-----	-------	--------	-----

Немонотонна зміна шорсткості плівок золота під час відпалу може бути викликана суперпозицією двох процесів:

- 1) формування на поверхні плівки металічних “краплин” внаслідок високого коефіцієнту поверхневого натягу золота, що може спостерігатися вже при температурах порядку 400 °C і приводити до збільшення шорсткості та неоднорідності;
- 2) дифузія атомів золота до підкладки, тобто втрата шаром  $TiB_2$  антидифузійних властивостей при температурах  $\sim 800$  °C, що супроводжується зменшенням шорсткості.

Таким чином, швидкий термічний відпал досліджуваних структур з бар’єрними контактами при температурах 400 і 600 °C з одного боку активізує процеси структурної релаксації та встановлення дислокаційно-домішкової рівноваги, а з другого – практично не веде до погіршення характеристик приладу (зменшення висоти бар’єру, росту надлишкових зворотних струмів тощо). Відпал при 800 °C систем з плівкою Au приводить до руйнування шару  $TiB_2$ , що може викликати деградацію бар’єрних властивостей контактів.

Структурні зміни в омичних контактах Au-Mo- $TiB_2$ -AuGe/GaAs під впливом швидкого термічного відпалу дещо відрізняються від розглянутих вище, що може бути зумовлене наявністю шару евтектики AuGe між шаром  $TiB_2$  і підкладкою та концентраційним розшаруванням атомів Au і Ge в GaAs внаслідок перерозподілу дифундуючих в підкладку атомів металів в полі пружних напруг.

Напруги, присутні в системах, оцінювались за величиною стріли прогину поверхні зразка, визначеною за даними профілометрії. Знайдені значення показали, що в системах із багатшаровою топологією і проміжним шаром золото-германієвої евтектики після їх формування присутні механічні напруги того ж порядку, що і в контактах  $TiB_2$ /GaAs і Au- $TiB_2$ /GaAs (табл.3.).

**Таблиця 3.**

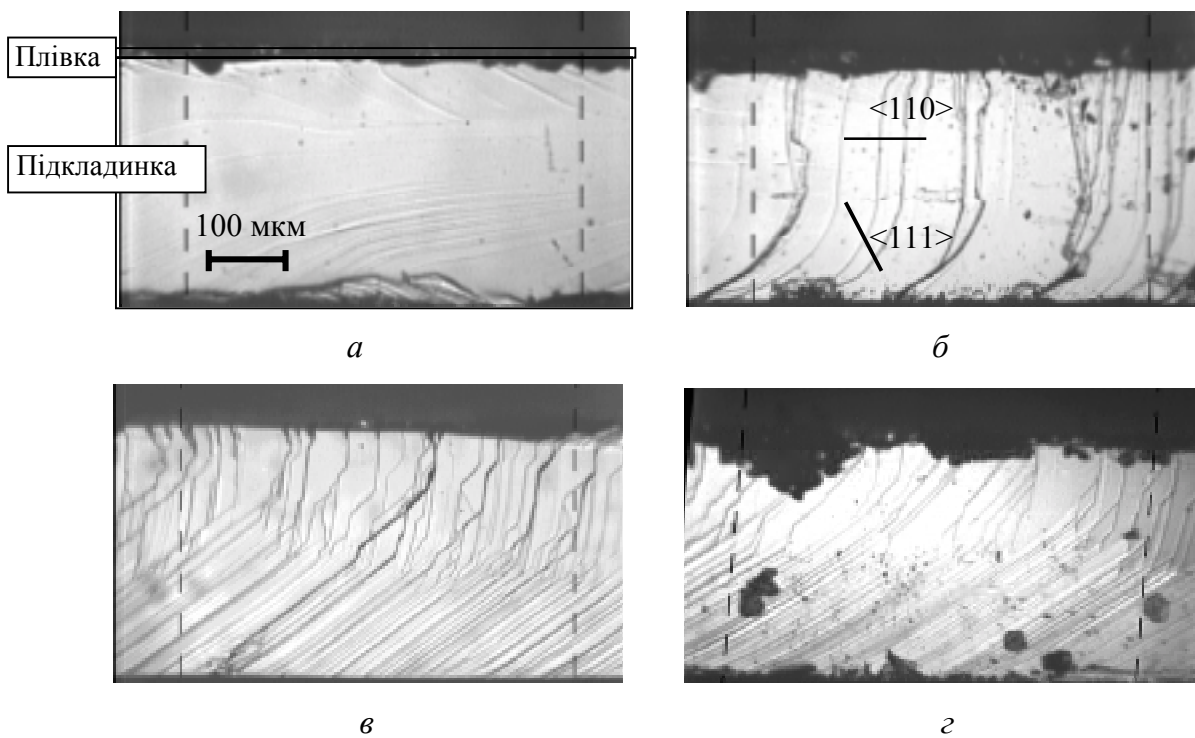
Зміна механічної напруги контактів Au-Mo- $TiB_2$ -AuGe/GaAs внаслідок ШТВ

Температура відпалу, °C	Напруги	
	підкладина, МПа	плівка, ГПа
Вихідний	7,612	1,228
400	3,282	0,529
600	5,882	0,949
800	7,399	1,194

Значна зміна величини залишкових внутрішніх напруг в досліджуваній системі ме-

тал-GaAs при відпалах веде до зміни параметрів дифузійних потоків у міжфазній границі, що в свою чергу, спричинює різну ступінь її розмиття. Визначення кривизни системи за рентгенодифракційними даними чи даними профілометрії дає тільки інтегральну оцінку напруг, не вказуючи на розподіл напруг в перерізі системи. Застосування рентгенодифракційних методик, які б показали профіль деформації досліджуваних структур обмежене малою товщиною перехідного шару та різним ступенем його структурного впорядкування – від аморфізованого до впорядкованого. З огляду на це, ми спробували оцінити розподіл полів деформацій в системі метал-GaAs на основі досліджень свіжих сколів отриманих внаслідок крихкого руйнування структур. Сколювання проводилось по площині підкладинки GaAs (110).

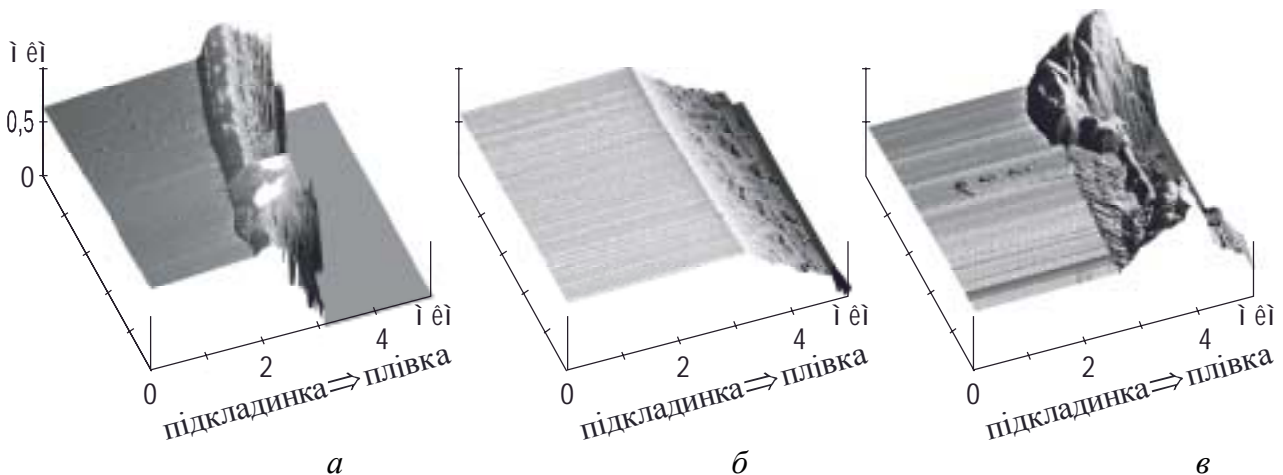
Аналіз даних оптичної мікроскопії (рис. 4) виявив різний характер пластичної релаксації на сколах вихідних структур і структур після ШТВ. Мінімальна густина терас, які утворились при сколюванні і змінюють свій напрям на глибині  $\sim 225$  мкм, характерна для структур, підданих ШТВ при температурі  $400^\circ\text{C}$ , що характеризуються найнижчим рівнем механічних напруг. З ростом температури відпалу в перерізі структури густина терас збільшується. Зі сторони ГР тераси поширюються в напрямку  $\langle 110 \rangle$ , а на глибині близько 150 мкм змінюють напрям на  $\langle 111 \rangle$ .



**Рис.4.** Зображення сколів (110) контактних структур Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs, одержане за допомогою оптичного мікроскопу: *a* – вихідний; *б, в, г* – після відпалу при температурах 400, 600 і 800 °C, відповідно.



На нанорівні поверхня сколів була досліджена АСМ (рис.5). Оскільки приповерхневі шари підкладинки GaAs у вихідних структурах знаходились в стані стиску, то сколювання структури викликало пластичну релаксацію, яка проявилась в утворенні вздовж всього сколу (вимірювання проводились в п'яти точках в різних ділянках) виступу максимальною висотою 600 нм та шириною порядку 570 нм (рис. 5а). Характерною особливістю виступу є наявність чіткої границі з боку підкладинки. На поверхні сколу системи після ШТВ при 400 °С особливостей, які б вказували на перебіг процесів пластичної релаксації чи їх неоднорідність при сколюванні не виявлено. Край представляє собою гладку рівну поверхню із слідом відшарованої плівкової структури (рис. 5б). Цей результат узгоджується із даними про рівень механічних напруг в структурі, які вказують на їх зменшення більше ніж у два рази після відпалу. Величина напруг в контактних структурах після відпалу при температурі 800 °С збільшується практично до рівня вихідної структури (див. табл.3). В цих структурах пластична релаксація при крихкому сколюванні спричиняє утворення в області гетерограниці неоднорідної поверхні із виступами і заглибинами, що свідчить про формування в області ГР неоднорідних полів пружної деформації (рис. 5в).

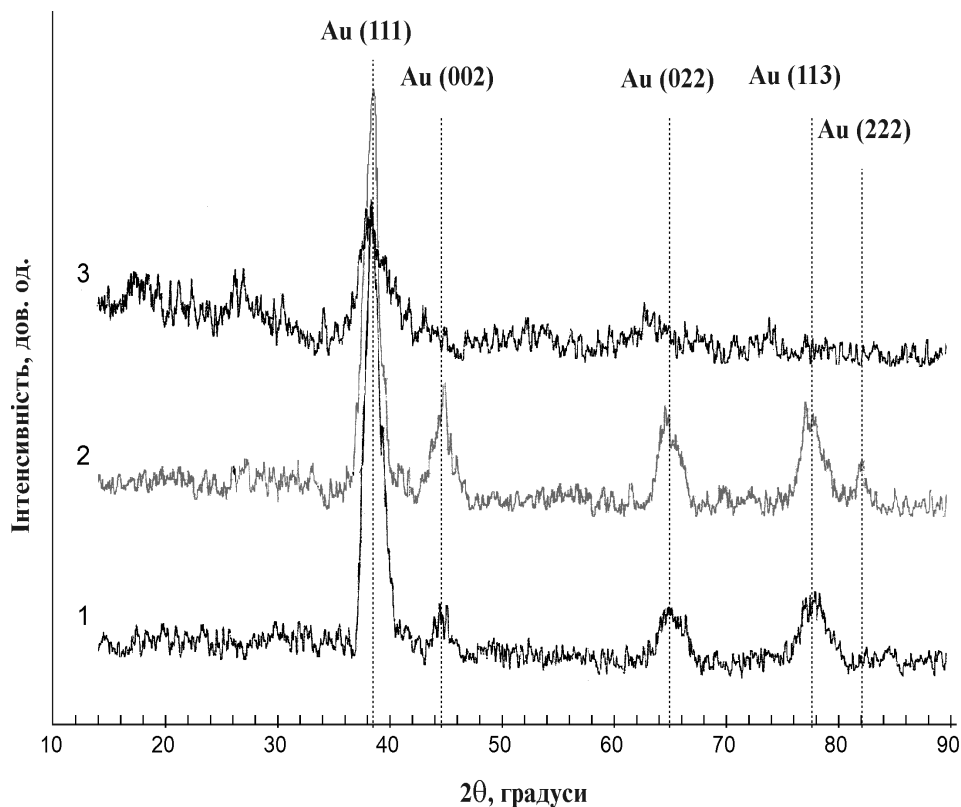


**Рис.5.** АСМ-зображення сколів (110) контактних структур Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs:

*a* – вихідні; *б, в* – відпалені при 400 і 800 °С, відповідно.

Морфологія поверхні плівки золота систем Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs дещо відрізняється від розглянутої в попередньому пункті тієї ж плівки золота, але без шарів Mo і AuGe. Поверхня плівки до відпалу складалась із щільно упакованих зерен неправильної форми із середніми розмірами 140 нм. Кристалічна структура вихідних плівок, визначена при аналізі дифракції РП в ковзаючій геометрії, відповідає полікристалічному золоту з переважаючою орієнтацією кристалітів в напрямку <111> (рис.6, крива 1). Відпал при 400 °С до зміни форми і розміру зерен не привів.

Різка зміна морфології поверхні золота спостерігалась при відпалі 600 °С. Розмір окремих зерен досяг 900 нм, хоча найбільш характерними є розміри близько 200 нм. На нашу думку, в цьому випадку відбулась рекристалізація плівки, що і проявляється на поверхні. Підтвердженням такого висновку є одержана на рентгенодифрактограмі більша відповідність інтенсивності максимумів відбиття РП стандартному полікристалу, що вказує на порушення переважаючої орієнтації кристалітів (рис.6, крива 2). Поверхня плівки Au після відпалу при 800 °С складається з гладких щільно упакованих зерен еліпсоїдної форми розмірами близько 200 нм, орієнтованих в одному напрямку, на фоні яких спостерігаються включення розмірами ~ 1 мкм. Полікристалічна структура плівки частково руйнується (рис.6, крива 3), що може вказувати на руйнування плівки шляхом взаємодифузії атомів шару золота з сусідніми шарами металізації, тобто на втрату шаром  $TiB_2$  своїх антидифузійних властивостей.



**Рис.6.** Рентгенівські дифрактограми плівки золота в системі Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs до відпалу (1) та після відпалу при температурі 600 °С (2) і 800 °С (3).

Отже, виконані дослідження показують перспективність використання диборидів титану при створенні багатошарових контактних структур як таких, які володіють високими бар'єроутворюючими та антидифузійними властивостями і зберігають їх при достатньо високих температурах (~ 600 °С). Крім того, варіюючи умови магнетронного напилення та описаного вище режиму швидкого термічного відпалу, можна забезпечити виготовлення

арсенідгалієвих бар'єрних контактів з шаром  $\text{TiB}_2$  із задовільними структурними характеристиками.

## ВИСНОВКИ

1. Структурні характеристики (фазовий склад, структурна досконалість і розмір зерен, наявність текстури) плівок  $\text{ZnS}:\text{Cu}$  в процесі формування по різному залежать від методу та режимів осадження та впливу наступних обробок. Для плівок, отриманих методом електронно-променевого напилення, структурні властивості, які відповідають покращанню люмінесцентних характеристик, спостерігаються для систем на керамічній підкладинці, відпалених з одночасним легуванням галієм за новим без вакуумним методом. Морфологія поверхні та структура плівок  $\text{ZnS}:\text{Cu}$ , вперше одержаних хімічним методом з металоорганічних сполук, визначається типом підкладки та її температурою, що дає можливість контролювати розмір зерен плівки в процесі росту на різних підкладках.
2. Люмінесцентні плівки сульфідів цинку, леговані міддю, вперше отримані методом термічного розкладу металоорганічних сполук характеризуються більш упорядкованою структурою та одно ріднішим рельєфом поверхні, ніж плівки на тих же підкладках, отримані методом електронно-променевого напилення у вакуумі без додаткових обробок. Після відпалу і легування галієм розмір зерен плівок  $\text{ZnS}:\text{Cu}$ , отриманих методом електронно-променевого напилення, суттєво збільшується, що вказує на роль галію як активатора рекристалізації плівки. Спостережувані структурні зміни корелюють із високим значенням яскравості фото- та електролюмінесценції плівок, а також зниженням порогової напруги збудження останньої після відпалу плівок.
3. Величина механічних напруг в досліджуваних структурах  $\text{TiB}_2\text{-GaAs}$ , виготовлених методом магнетронного розпилення, мінімальна при струмі напилення 3 А і товщині плівки 10 нм. Під час осадження плівок  $\text{TiB}_2$  на монокристалічний GaAs на границі розділу утворюються тверді розчини заміщення  $\text{Ga}_x\text{Ti}_{1-x}\text{As}$  та  $\text{Ga}_x\text{B}_{1-x}\text{As}$  внаслідок дифузії титану і бору в приповерхневі шари підкладки, що викликає розмиття границі розділу двох фаз.
4. Зміна рівня механічних напруг в результаті швидкого термічного відпалу в структурах  $\text{TiB}_2/\text{GaAs}$  залежить від товщини плівки. В результаті швидкого термічного відпалу рівень механічних напруг в структурах з товщиною плівки 10 нм зменшується монотонно зі збільшенням температури відпалу. Процеси релаксації в структурах з товщиною плівки 50 нм протікають інтенсивніше, але за час відпалу не завжди встановлюється рівноважний стан.
5. Швидкий термічний відпал контактних систем  $\text{TiB}_2/\text{GaAs}$ ,  $\text{Au-TiB}_2/\text{GaAs}$  та  $\text{Au-Mo-TiB}_2\text{-AuGe}$ .

/GaAs приводить до структурної релаксації шляхом розпаду твердих розчинів титану і бору, анігіляції та генерації дислокацій і їх взаємодії з точковими дефектами і як наслідок, перерозподілу полів пружних деформацій. При температурі 800 °С в багат шарових системах Au-TiB<sub>2</sub>/GaAs та Au-Mo-TiB<sub>2</sub>-AuGe/GaAs внаслідок взаємодифузії атомів сусідніх шарів металів шар TiB<sub>2</sub> в основному руйнується, що може впливати на його антидифузійні властивості.

**Основні результати дисертаційної роботи** викладені в наступних публікаціях:

1. Dmitruk N.L., Ermolovich I.B., Konakova R.V., Lytvyn O.S., Lytvyn P.M., Milenin V.V., Prokopenko I.V., Venger E.F., Voitsikhovskyi D.I., Boltovets N.S., Ivanov V.N. On the nature layer and heat tolerance of TiB<sub>2</sub>/GaAs-based contact // Appl. Surface Sci. - 2000. - Vol. 166. - P. 520-525.
2. Kryshchab T.G., Gomes J.P., Lytvyn P.M., Lytvyn O.S. The influence of TiB<sub>2</sub>-thin film thickness on metal-GaAs structural characteristics // Thin Solid Films. - 2000. - Vol. 373. - P. 79-83.
3. Свечников С. В., Завьялова Л. В., Рощина Н. Н., Родионов В.Е., Хомченко В.С., Бережинский Л.И., Прокопенко И.В., Литвин П.М., Литвин О.С., Коломзаров Ю.В., Цыркунов Ю.А. Люминесцирующие плёнки ZnS:Cu, полученные химическим методом // Физика и техн. полупров. - 2000. - Т.34, вып.10. - С.1178-1182.
4. Lytvyn O.S., Khomchenko V.S., Kryshchab T.G., Lytvyn P.M., Mazin M.O., Prokopenko I.V., Rodionov V.Ye., Tzyrkunov Yu.A. Structural investigations of annealed ZnS:Cu, Ga phosphors // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. - 2001. - Vol. 4, №1. - P. 19-23.
5. Литвин О.С., Прокопенко І.В. Вивчення морфології поверхні полікристалічних плівок методом атомно-силової мікроскопії // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка. - 2001. - Вип. 112. - С.5-10.
6. Kryshchab T.G., Lytvyn O.S., Lytvyn P.M., Prokopenko I.V. Relaxation processes in Au-TiB<sub>2</sub>/GaAs structures under short-term thermal annealing// Proc. of 7th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces.- Goteborg, Sweden. - 1999. - P. 101.
7. Svechnikov S., Zavyalova L., Roshchina N., Khomchenko V., Rodionov V., Berezhinsky L., Prokopenko I., Lytvyn P., Lytvyn O., Tzyrkunov Yu., Kolomzarov Yu. Growth and characterization of ZnS-Cu thin film by MOCVD // Proc. of the VIII International Symposium "Advanced Display Technologies.- Crimea, Ukraine. - 1999.- P.67.
8. Литвин О.С., Хомченко В.С., Криштаб Т.Г., Литвин П.М., Родіонов В.Є., Циркунов Ю.А., Прокопенко І.В. Дослідження структури полікристалічних плівок ZnS-Cu, Ga рентгенодифракційними методами та методами атомно-силової мікроскопії// Матеріали 8<sup>ї</sup> Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок - Івано-Франківськ, Україна. -

2001. - С. 171.

**Литвин О.С.** Морфологічні та структурні зміни в напівпровідниках  $A^3B^5$  і  $A^2B^6$  та системах на їх основі, стимульовані післяростовими обробками. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла. - Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ, 2001.

Дисертація присвячена виявленню зв'язку наноморфології поверхні полікристалічних плівок, що є компонентами напівпровідникових приладних структур, з їх внутрішньою кристалічною структурою, рівнем механічних напруг в системах як цілому та процесами на границі розділу фаз, спричиненими високотемпературними відпалами. Встановлено зв'язок морфологічних та структурних характеристик полікристалічних плівок  $ZnS:Cu$  з умовами їх виготовлення та післяростових обробок. Досліджено залежність структурної досконалості контактних систем на  $GaAs$  з антидифузійним шаром дибориду титану від режиму магнетронного напилення та їх термічну стійкість. З використанням комплексу методів рентгеноструктурного аналізу та атомно-силової мікроскопії поверхні показано пряму залежність морфологічних характеристик поверхні полікристалічних плівок від процесів структурної релаксації та перебудови як всередині плівки, так і на границі розділу плівка-підкладка. Результати досліджень розвивають модельні уявлення про характер і походження структурних нерівноважностей багат шарових структур та процеси структурної релаксації в них, викликані зовнішніми впливами. Також вони важливі для вдосконалення технології виготовлення твердотільних напівпровідникових структур для мікроелектронних та оптичних пристроїв, оптимізації їх параметрів та підвищення ефективності роботи.

*Ключові слова:* полікристалічні плівки,  $ZnS:Cu$ , контакти метал- $GaAs$ , рентгеноструктурний аналіз, атомно-силова мікроскопія поверхні, високотемпературний відпал.

**Литвин О.С.** Морфологические и структурные изменения в полупроводниках  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$  и системах на их основе, стимулированные послеростовыми обработками. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 2001.

Диссертация посвящена обнаружению связи наноморфологии поверхности поликри-

сталлических пленок с их внутренней структурой, уровнем механических напряжений в полупроводниковых системах, компонентами которых они являются, а также процессами на границе раздела фаз, вызванными высокотемпературными отжигами.

Установлена связь морфологических и структурных характеристик поликристаллических пленок ZnS:Cu с условиями их получения и послеростовых обработок. А именно, показано, что система с пленками, полученными традиционным методом электронно-лучевого напыления, после высокотемпературного отжига ( $\sim 850$  °C) с одновременным легированием галлием отличается меньшим уровнем напряжения и большим размером кристаллитов и зерен на поверхности пленки по сравнению с исходными и отожженными без галлия. Этот факт позволяет определить роль галлия в этом случае как активатора рекристаллизации поликристаллической пленки под действием отжига. Структура и морфология пленок ZnS:Cu, впервые полученных химическим методом из металлоорганических соединений меди и цинка определяется как типом, так и температурой подложки, что дает возможность контролировать размер зерен растущей пленки на разных подложках.

Исследованы зависимость структурного совершенства контактных систем на GaAs антидиффузионным слоем диборида титана от режима магнетронного напыления и их термическая стойкость. При получении систем на базе контакта  $TiB_2/GaAs$  методом магнетронного напыления вследствие диффузии атомов титана и бора в приповерхностные слои подложки на границе раздела формируется переходной слой – твердые растворы замещения  $Ga_xTi_{1-x}As$  та  $Ga_xB_{1-x}As$ . Быстрый термический отжиг контактных систем  $TiB_2/GaAs$ ,  $Au-TiB_2/GaAs$  и  $Au-Mo-TiB_2-AuGe/GaAs$  приводит к структурной релаксации путем распада твердых растворов на границе раздела, аннигиляции и генерации дислокаций, их взаимодействия и как следствие – перераспределения полей упругих деформаций. При температуре 800 °C в многослойных системах  $Au-TiB_2/GaAs$  и  $Au-Mo-TiB_2-AuGe/GaAs$  слой  $TiB_2$  теряет свои антидиффузионные свойства, что обуславливает деградацию контактных систем.

С использованием комплекса методов рентгеноструктурного анализа и атомно-силовой микроскопии поверхности показана прямая зависимость морфологических характеристик поверхности поликристаллических пленок от процессов структурной релаксации и перестройки как внутри пленки, так и на границе раздела пленка-подложка.

Результаты исследований развивают модельные представления о характере и происхождении структурных неравномерностей многослойных структур и процессы структурной релаксации в них, вызванные внешними воздействиями. Также они важны для усовершенствования технологии изготовления твердотельных полупроводниковых структур для микроэлектроники и оптических приборов, оптимизации их параметров и повышения эф-

фективности работы.

*Ключевые слова:* поликристаллические пленки, ZnS:Cu, контакты металл-GaAs, рентгеноструктурный анализ, атомно-силовая микроскопия поверхности, высокотемпературный отжиг.

**Lytvyn O.S.** Morphological and Structural Changes in III-V and II-VI Semiconductors and Related Systems Caused by Post-growth Treatments - Manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by specialty 01.04.07 - solid state physics. - Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2001.

Relations between surface nanomorphology of polycrystalline thin films used in semiconductor device structures and their crystalline structure, level of mechanical strains in film-substrate structures as well as processes of structure ordering in interface at high temperature treatments were investigated using improved complex of X-ray diffraction and Atomic Force Microscopy methods. Correlation of morphological and structural characteristics of polycrystalline ZnS:Cu films with conditions of fabrication and post-growth treatments were determined. The structure perfection and thermoresistance of metal-GaAs systems with TiB<sub>2</sub> antidiffusion layers were investigated. The obtained results develop notions about the character and origin of structure irregularities in multilayer structures and structural relaxation processes stimulated by external influences. The results could be used in technology of microelectronic and optoelectronic devices for improvement of their parameters and efficiency.

*Key words:* polycrystalline thin films, ZnS:Cu, metal-GaAs contacts, X-ray, AFM, thermal annealing.