

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ім. В.Є. ЛАШКАРЬОВА**

Гудименко Олександр Йосипович

УДК: 539.213; 539.23+621.793.79; 539.26

**РЕНТГЕНІВСЬКА ДИФРАКТОМЕТРІЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ
ШАРІВ ТА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ Si(Ge) та
In(Ga)As**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

**Науковий
керівник:**

доктор фізико-математичних наук, професор,
Кладько Василь Петрович,
Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ),
завідувач відділом

**Офіційні
опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор
Кисловський Євген Миколайович,
завідувач лабораторії Інституту металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ)

доктор фізико-математичних наук, ст. наук. співр.,
Ткач Василь Миколайович,
завідувач лабораторії Інституту надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

Захист відбудеться ”18” січня 2012 р. о 16¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.199.01 при Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України за адресою: 03028, м. Київ, пр. Науки, 41.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ, пр. Науки, 45), та на сайті відділу дифракційних досліджень структури напівпровідників:
<http://www.x-ray.net.ua/prints.php>.

Автореферат розісланий ”14” грудня 2011 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради Д26.199.01
кандидат фізико-математичних наук

О.Б. Охріменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Метод іонної імплантації (ІІ) знаходить широке застосування в багатьох областях промисловості. Завдяки своїм властивостям він є перспективним методом легування, котрий дозволяє вводити домішки з заданою концентрацією і локальністю, створювати контрольовані профілі концентрації в заданих областях. При цьому перелік матеріалів, в котрих можна використовувати ІІ практично необмежений. По багатьох параметрах ІІ більш придатна для легування ніж термодифузія чи легування в процесі росту. Однак при легуванні методом ІІ виникає значна кількість радіаційних точкових дефектів (ТД), які приводять до структурних і відповідно електрофізичних змін. Крім того виникають деформаційні поля, в котрих можуть відбуватись не класичні дифузійні процеси. Механізми утворення ТД та деформаційних полів і їх трансформація при різних зовнішніх діях є актуальною проблемою яка вирішувалась в даній роботі.

Багатошарові структури SiGe/Si, InGaAs/GaAs є одними із перспективних напівпровідникових матеріалів наноелектроніки. При виготовленні ефективних напівпровідникових приладів значні зусилля спрямовані на одержання матеріалу з необхідними електрофізичними властивостями. Однією з основних проблем при керуванні цими властивостями є однозначне визначення впливу деформацій на кількісні характеристики шарів цих структур, зокрема, таких як співвідношення товщин яма – бар'єр, розподіл компонентного складу, процеси дифузії та інтердифузії. Також необхідно відмітити, що вплив термічних відпалів в багатошарових структурах на процеси дефектоутворення і релаксацію деформацій практично недосліджений і тому на етапі виконання роботи звичайно є актуальною задачею. Окрім того, виникає ряд проблем в діагностиці процесів релаксації деформацій в структурах з товщинами шарів порядку декількох моношарів (МШ).

Серед арсеналу методів дослідження параметрів і характеристик приповерхневих областей напівпровідникових структур найбільш чутливими та інформативними є Х-променеві дифракційні методи, які до того ж є неруйнівними та експресними.

Вдосконалені експериментальні методи та чисельне моделювання процесів розсіювання Х-променів реальними кристалами дають унікальну інформацію про розподіл нормальних та паралельних до поверхні росту складових деформацій кристалічної ґратки на глибинах від декілька моношарів до десятків нанометрів. Отже, аналіз закономірностей розсіювання Х-променів багатошаровими епітаксійними структурами на сьогодні залишається актуальною проблемою і потребує подальшого вивчення з виходом на кількісні оцінки структурних характеристик.

Тому, подальший розвиток експериментальних основ дифракції на приповерхневих шарах з різним градієнтом деформації, багатошарових структурах, в тому числі і з квантовими точками для адекватної їх характеристики є дуже актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає основним напрямкам наукової діяльності Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України і виконана у відповідності до тем:

1. „Комплексні структурні та морфологічні дослідження гетероепітаксійних (у тому чи-

числі нанорозмірних) систем на основі напівпровідників IV групи та сполук A^3B^5 і A^2B^6 (№ державної реєстрації 0103U000380) – виконавець.

2. Науково-технічна програма “Розробка науково-технічних методів, засобів і автоматизованих систем контролю параметрів напівпровідникових матеріалів, структур і приладів”. Проект „Рентгеноспектральна методика і апаратура для контролю хімічного складу в ході технологічного процесу” (№ державної реєстрації 0197U008669) – виконавець.
3. Державна цільова науково-технічна програма «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010-2014 роки», проект "Розроблення апаратури для високороздільної рентгенівської діагностики наноматеріалів, наноструктур та аморфних сплавів" (№ державної реєстрації 0110U006038) – виконавець.

Роль автора у виконанні науково-дослідних робіт полягала в отриманні експериментальних спектрів та карт оберненого простору, їх обробці та аналізі структурних властивостей приповерхневих та епітаксійних нанорозмірних шарів.

Мета і завдання роботи.

Мета дисертаційної роботи полягала у подальшому розвитку експериментальних методик дифракції Х-променів на багатошарових структурах та приповерхневих шарах напівпровідників, підданих зовнішнім впливам, а також в дослідженні їх деформаційних та композиційних властивостей, з метою оптимізації їх структурних характеристик.

Для досягнення поставленої мети, вирішувалися наступні наукові завдання:

1. Встановлення особливостей дефектоутворення в приповерхневих шарах монокристалів кремнію при акустостимульованій імплантації іонів бору та миш'яку.
2. Проведення комплексу високороздільних дифрактометричних досліджень особливості релаксації SiGe шарів при імплантації He при ультразвукових обробках.
3. Аналіз впливу анізотропії пружних деформацій в багатошарових структурах InGaAs/GaAs на просторове впорядкування квантових точок.
4. Дослідження впливу швидкого термічного відпалу на еволюцію деформаційних та інших характеристик багатошарових структур InGaAs/GaAs.
5. Дослідження впливу інтердифузії на релаксацію механічних напружень та компонентний склад в самоорганізованих SiGe наноострівцях.
6. Дослідження особливостей зародження та упорядкування GeSi наноострівців в багатошарових структурах, сформованих на Si та $Si_{1-x}Ge_x$ буферних шарах.

Об'єкт дослідження – іонно-імплантовані приповерхневі шари кристалів кремнію, одно- та багатошарові структури SiGe/Si з квантовими точками, багатошарові структури InGaAs/GaAs з різним вмістом індію.

Предмет дослідження – фізичні особливості дифракції в багатошарових структурах та приповерхневих областях монокристалів; процеси взаємодифузії компонент та релаксація деформацій на границях шарів під дією зовнішніх чинників (іонної імплантації, швидких термічних відпалів, температури росту).

Методи дослідження – комплекс експериментальних та розрахункових методів, який включає в себе високороздільну Х-дифрактометрію; моделювання спектрів дифракції, а також аналіз двовимірних карт розподілу інтенсивності в оберненому просторі.

Наукова новизна одержаних результатів.

В даній роботі вперше отримано ряд нових наукових результатів:

- встановлено, що в приповерхневих шарах кремнію, підданих імплантації іонів B^+ і As^+ при одночасній (in situ) дії ультразвуку (УЗ) відбувається не лише зменшення напруг, але й зміна знаку деформації, яка викликана перерозподілом точкових дефектів, а також варіаціями їх розмірів. Відпал зразків при $T = 800\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$ призводить до релаксації напруг як у вихідних зразках, так і в імплантованих, незалежно від типу іонів, а УЗ ще більше стимулює процес релаксації;
- встановлено, що при застосуванні ультразвукового впливу при імплантації He в SiGe шари постійного складу, вирощені на Si підкладках можна керувати ступенем їх релаксації. Показано зростання рівня релаксації SiGe шарів при УЗ дії;
- розглянуто вплив анізотропних спотворень кристалічної ґратки у надґратці на кріві дифракційного відбиття (КДВ), отримані методами високороздільної рентгенівської дифрактометрії. Методами динамічної теорії дифракції визначено параметри спотвореної кристалічної ґратки шарів та форму й параметри інтерфейсу між шарами;
- встановлено, що в InGaAs/GaAs структурах з квантовими нитками (КН), підданих швидкому термічному відпалу (ШТВ) ($550^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$) рушійним механізмом структурних перетворень є релаксація залишкових деформацій внаслідок термічно-активованих і деформаційно-підсилених процесів інтердифузії атомів In/Ga на межі поділу КН-2D. Існування в досліджуваних зразках двох надґраткових вертикальних періодів, та їх зміну під час ШТВ пояснено на основі анізотропного характеру розподілу пружної деформації і пониження симетрії структури.

Практичне значення результатів, одержаних здобувачем, полягає в тому, що в дисертації приведені експериментальні методи досліджень з використанням картографування оберненого простору, які можна використовувати для встановлення цілого спектру характеристик як багатошарових структур, так і приповерхневих шарів, зокрема профілів деформації, композиційних профілів, геометричних параметрів. Отримані результати дозволяють оптимізувати фізико-технологічні основи процесів росту складних багатошарових систем та тонких плівок для створення приладів на їх основі.

Результати дисертації можна рекомендувати для використання в наукових лабораторіях та підприємствах, які займаються вирощуванням та дослідженням властивостей епітаксійних систем, зокрема в Інститутах: фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, металофізики ім. Г.В. Курдюмова, фізики НАН України, Київському Національному Університеті ім. Тараса Шевченка та Чернівецькому Національному Університеті ім. Ю. Федьковича, а описані в роботі методичні підходи при вивченні таких спецкурсів, як фізика твердого тіла та структурний аналіз.

Особистий внесок здобувача.

В опублікованих працях особистий внесок дисертанта полягає в експериментальних вимірюваннях [1,4-5,7-11,13] та моделюванні спектрів відбиття [1,4,5,7,9], розрахунку параметрів деформації в шарах структур [1,4-6,8-14]. Здобувач також приймав участь у дослідженнях профілів розподілу компонентів в областях інтерфейсів в роботах [1,7,10-14]. Також, в усіх роботах дисертант приймав активну участь у аналізі та інтерпретації результатів досліджень та написанні статей.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати досліджень, що викладені у дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на наукових конференціях: II Українська наукова конференція з фізики напівпровідників – УНКФН-II (Чернівці, Україна, 20-24 вересня, 2004); Second International SiGe Technology and Device Meeting (Frankfurt, Germany, 16-19 May, 2004); 1-ша Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» НМІТФ-2011 (Кременчук, Україна, 5-7 травня, 2011); XV Международний симпозиум «Нанозифізіка и нанозелектроніка» (Нижній Новгород, Росія, 14-18 марта, 2011).

Публікації.

За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових праць, з яких 9 статей в наукових журналах та 5 тез доповідей на конференціях. Список основних публікацій наведено в кінці автореферату.

Структура та об'єм дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, літературного огляду з теми дослідження, методичного та трьох оригінальних розділів, які присвячені основним результатам роботи, висновків та списку цитованої літератури з 136 найменувань. Дисертація викладена на 138 сторінках тексту, містить 55 рисунків та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовані мета та основні завдання роботи, її наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок дисертанта, а також відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** дано загальну характеристику об'єктів дослідження та методів дифракції X-променів від нанорозмірних структур на основі кінематичної та динамічної теорій. Окремий підрозділ присвячено загальноприйнятим методам розрахунку параметрів ґратки та деформаційних характеристик кристалів та багатошарових структур. Крім цього в першому розділі приведено огляд робіт з методів діагностики структурної досконалості кристалів та наноструктур при використанні аналізу дифузного розсіювання рентгенівських променів.

На основі критичного аналізу приведених даних окреслені рамки завдань дисертації, сформульовані переваги вибору даних методів дослідження багатошарових структур та тонких приповерхневих шарів.

У **другому розділі** приведено основні експериментальні методики дослідження приповерхневих областей монокристалів та багатошарових наноструктур.

Розглянуті можливості різних експериментальних схем дифракції X-променів. Коротко викладена теорія дво- та трикристальної X-променевої дифрактометрії. Показана конструкція схем дифракції як в прямому, так і в оберненому просторі. Відмічені основні переваги тривісної схеми дифракції перед двокристальною: можливість розділити розорієнтацію та дилатацію кристалічної ґратки.

Велика увага приділена опису методики картографування оберненого простору та аналізу особливостей отриманих дифракційних картин.

Описано загальноновживані методики контролю структурної досконалості шарів та вказані межі використання і допущення при отриманні їх параметрів. Досить значна увага приділена методиці контролю деформаційного стану багатошарових структур.

Розділ 3 присвячений дослідженням особливостей дефектоутворення та процесів релаксації деформацій в приповерхневих шарах кремнію та гетероструктурах на основі кремнію, підданих іонній імплантації при одночасній дії ультразвукового поля.

В першому параграфі розділу досліджуються особливості трансформації системи точкових дефектів і пружних деформацій в приповерхневих шарах кремнію, підданих імплантації іонів B^+ і As^+ при одночасній (in situ) дії ультразвуку (УЗ). Методом мас-спектрометрії вторинних іонів досліджені товщинні розподіли імплантованих домішок після термічного відпалу зразків і вплив на них УЗ

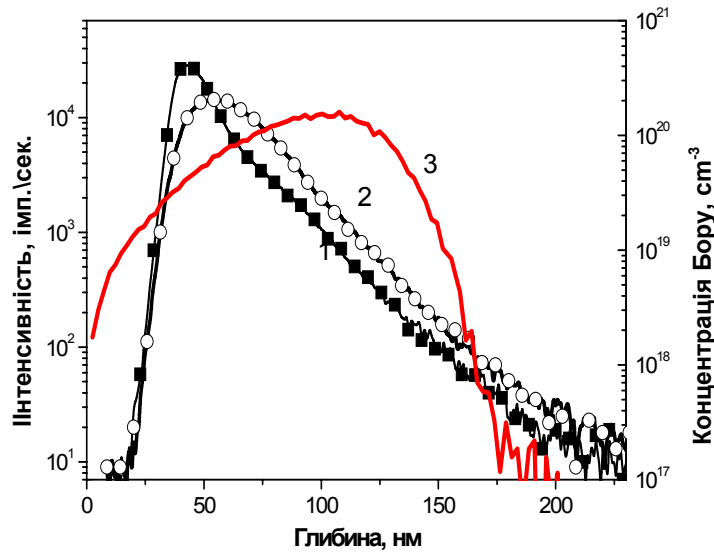


Рис.1. Профілі розподілу імпантованих іонів бору в кристалі кремнію після відпалу $800^{\circ}C$, 3 хв.: 1) без УЗ; 2) з УЗ-обробкою (9 МГц, 1 Вт/см²); 3) після імплантації, $E=35\text{keV}$.

(рис.1).

Структурна досконалість (концентрація і розміри точкових дефектів) оцінювалася з аналізу розподілу дифузної інтенсивності Х-променів. Аналіз кутового розподілу дифузного розсіяння (ДР) дозволяє визначити не лише розміри точкових дефектів (ТД), але й симетрію деформаційних полів, а також тип дефекту — вакансійний або міжвузловий.

Встановлено, що імплантація іонів As^+ і B^+ приводить до додаткових стискуючих напруг в структурі, а ефект зростання напруг пропорційний дозі імплантації.

При імплантації легких іонів (бор) в Si формуються окремі ТД і невеликі розупорядковані області. При використаних в роботі дозах іонної імплантації бору (10^{15} - 10^{16} см⁻²), аморфна фаза не утворюється. В імпантованих зразках без УЗ (до відпалу) для рефлексу Si (400) не спостерігається розширення КДВ щодо неімпантованого зразка. Для

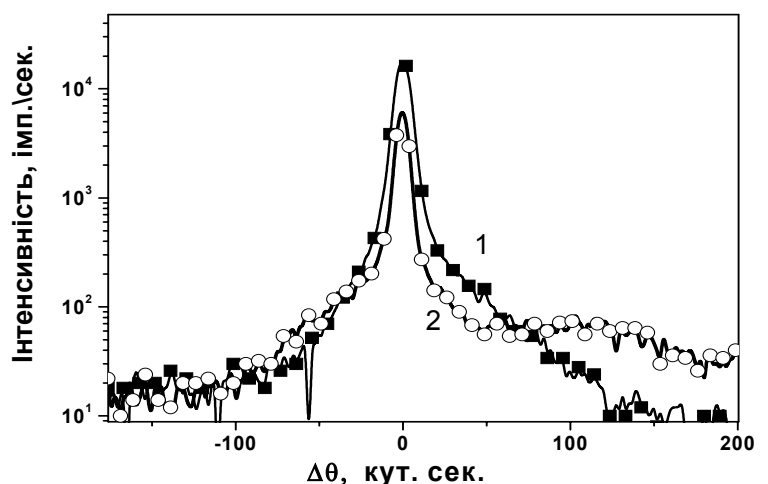


Рис.2. КДВ від Si(400) (легкування бором, до відпалу). 1) без УЗ-обробки; 2) з УЗ-обробкою.

асиметричного рефлексу Si (113) спостерігається деяке збільшення ДР в області малих кутів, що викликано введенням дефектів в ґратку Si.

З аналізу КДВ слідує (рис. 2), що в процесі імплантації збільшується концентрація ТД невеликих розмірів (зростання інтенсивності ДР на “хвостах” в далекій від вузла оберненої ґратки області). Для більш глибоких областей кристала (відбиття Si(400)) концентрація ТД міжвузлового типу домінує в зразках, імпантованих іонами бору при УЗ дії. Розташовані біля поверхні області більш насичені дефектами вакансійного типу.

Наявність ДР в областях великих кутів пов'язано із стимулюючою дифузією міжвузлових атомів Si під дією УЗ і накопиченням вакансій в поверхневих шарах Si, що викликає зменшення параметра ґратки в приповерхневій області. Таким чином, в областях тестування зразка при відбитті Si (400) переважають напруги стиску, викликані міжвузловими атомами кремнію, які дифундують на значну глибину під дією УЗ. Ближче до поверхні спостерігається незначний розтяг ґратки за рахунок вакансійних дефектів ($\epsilon = 0.28 \cdot 10^{-4}$), який частково компенсується міжвузловими атомами імпантованого бору.

Імплантація іонів різної маси (бор, миш'як) при дії УЗ призводить до двох різних розподілів ТД. При імплантації бору міжвузлові атоми під впливом УЗ дифундують на значну глибину, так що їх рекомбінація з вакансіями утруднена. Імплантація важких атомів миш'яку призводить до виникнення сильно розупорядкованих областей, їх перекриття та аморфізації імпантованої області. При цьому має місце незначне просторове розділення ТД і значна їх частина може рекомбінувати при відпалі. УЗ дія незначно впливає на стимулюючу дифузію міжвузлових атомів, оскільки в сильно розвиненому каскаді розупорядкувань є значна кількість пасток для міжвузлових дефектів. Потенційний рельєф для дифузії міжвузлових атомів глибший, в порівнянні з випадком імплантації бору, коли створюються одиночні міжвузлові атоми вздовж трека гальмування іонів бору. Оскільки ковалентний радіус As (0.58 нм) більший, ніж Si (0.42 нм), і міжвузлові атоми просторово розділені з вакансіями лише на невеликі відстані, то в цьому випадку спостерігається стиснення ґратки.

Таким чином, при імплантації легких атомів (бор) УЗ стимулює активне просторове розділення вакансій і міжвузлових атомів. При подальшому відпалі йде захоплення атомів бору вакансіями, а надмірні міжвузлові атоми Si конденсуються в кластери.

Імплантація важких іонів (миш'як) призводить до аморфізації приповерхневої області, і ефект просторового розділення ТД при УЗ хоча й має місце, але істотно менший. Про наявність розділення дефектів свідчить збільшення накопичення миш'яку біля поверхні і зменшення розмірів дефектів після відпалу в зразках, імпантованих з УЗ.

Наступний параграф даного розділу присвячений особливостям релаксації SiGe шарів при імплантації He⁺ при УЗ. Показано, що шари SiGe, при рості на підкладках Si товщиною 80-150 нм, можуть бути релаксованими через імплантацію іонами H⁺ чи He⁺ та термічний відпал.

Встановлено, що імплантація з застосуванням УЗ дозволяє зменшити напруги аморфізації та стимулює дифузію міжвузлових атомів та вакансій Si. При зміні інтенсивності та частоти УЗ хвиль можна модифікувати кінетику формування дефектів.

В роботі, для росту метастабільних буферних шарів Si_{0.8}Ge_{0.2} товщиною 100 та 300 нм на підкладці Si (100) товщиною 200 мкм, використовувалось швидке хімічне

осадження з газової фази. Потім структури імпантувались іонами He^+ (50 кеВ) дозами $1\text{--}8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Частина зразків під час імпантациї була піддана обробці ультразвуковими хвилями з частотами 5-6 МГц та потужністю $0.01\text{--}1 \text{ Вт/см}^2$. Зразки були відпалені в Ar при температурах від 650°C до 850°C протягом 60 сек.

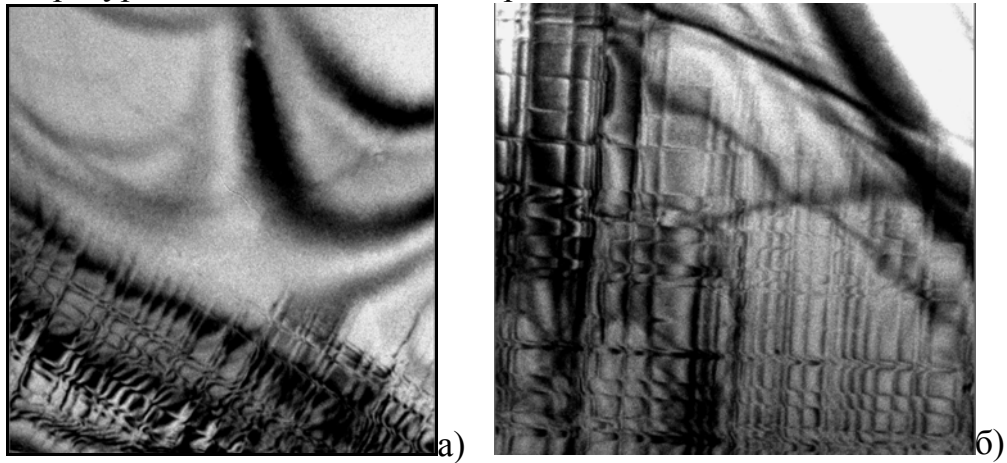


Рис. 3. Мікрофотографії ПЕМ імпантованих He^+ (50 кеВ) та відпалених при температурі 850°C зразків SiGe (100 нм) без УЗ (а) та з УЗ (б).

На рис.3 показані мікрофотографії ПЕМ імпантованих та відпалених при температурі 850°C протягом 60 сек. зразків (SiGe 100 нм) без УЗ (а) та з УЗ (б). На них видно формування прямокутної дислокаційної сітки відповідальної за релаксацію деформацій. Дислокації локалізуються в тонкому перехідному шарі на границі Si та шару SiGe і їх густина становить $10^9\text{--}10^{10} \text{ см}^{-2}$.

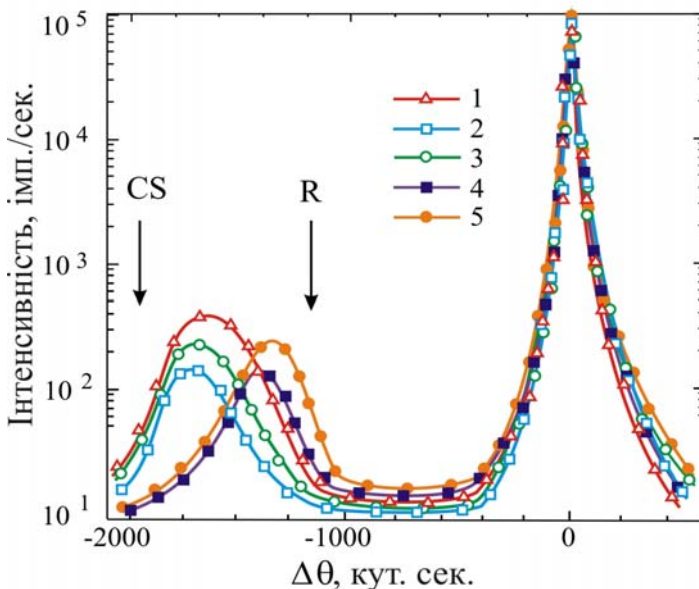


Рис.4. Х-променеві КДВ для SiGe/Si зразків з різною обробкою: вирощений (1), імпантований без УЗ (2), імпантований з УЗ (3), відпалений після імпантациї без УЗ (4), та з УЗ (5). Стрілками показані теоретичні положення повністю релаксованих (R) і когерентно напружених (CS) SiGe шарів.

На рис.4 представлено Х-променеві дифракційні спектри гетероструктур SiGe/Si (300 нм) на різних стадіях технологічної обробки.

Оскільки, товщина 300 нм для шару SiGe є надкритичною, релаксація спостерігалась вже після його осадження. Величина релаксації даного шару досягала $\sim 48\%$. Очевидно, релаксація відбувається протягом росту шару при температурі 600°C . Для шару SiGe , товщиною 100 нм, релаксація після осадження була близько 5% . Короткий відпал неімпантованих структур при температурі 650°C значно не вплинув на рівень релаксації. Зростання рівня релаксації починається при температурі відпалу 750°C .

В імпантованих зразках активуються процеси релаксації за рахунок утворення преципітатів та формування бульбашок, в порівнянні з релаксацією

яка відбувається при рості товстого буферного шару. Для імпантованих He^+ зразків після відпалу було отримано рівень релаксації, аж до 72%.

Використання ультразвукових хвиль протягом імплантації стимулює дифузію міжвузлових атомів Si в об'єм підкладки. Також це може стимулювати дифузію атомів He і впливати на кінетику формування бульбашок і преципітатів протягом послідувочої термічної обробки, це впливає на утворення дислокацій невідповідності в структурі.

Як видно з рис.4, використання УЗ дозволяє збільшити релаксацію (рис.4, крива 5) при конкретних дозах імплантації та умовах відпалу. Для зразків з товщиною шарів SiGe 300 нм рівень релаксації досягав $R = 82\%$. Ефект впливу УЗ залежить від амплітуди та частоти ультразвукових хвиль. При зміні амплітуди від 0.5 до 10 В спостерігалась різниця в ступені релаксації до 5%.

Четвертий розділ присвячений дослідженню ролі деформацій у формуванні багатшарових структур на основі GaAs. Зокрема перший параграф присвячено рентгенодифракційним дослідженням 2D-3D структурним переходам.

Досліджувались восьмиперіодні структури: (14 МШ InGaAs/40 МШ GaAs), вирощені молекулярно-променевою епітаксією (МПЕ). Концентрація індію становила, відповідно: 0.2, 0.25, 0.28, 0.3 та 0.35.

Експериментальні, а також теоретичні КДВ для відбиття GaAs (004) від зразків з різним вмістом індію приведені на рис.5. Крім піка підкладки і основного максимуму, викликаного середньою ґраткою структури (нульовий сателіт), на хвостах КДВ спостерігається складна інтерференційна структура, що являє собою взаємодію хвиль із однаковими періодами коливань. Осциляції з малим періодом відповідають за товщину всієї структури, а більш довгоперіодні осциляції свідчать про формування періодичної структури з досконалих шарів. Аналіз КДВ показав, що всі структури, в тій чи іншій мірі є псевдоморфними.

Зміна складу КЯ відбувається при внутрішній дифузії деякої кількості індію із двох граничних шарів КЯ в бар'єрний шар GaAs, а атоми

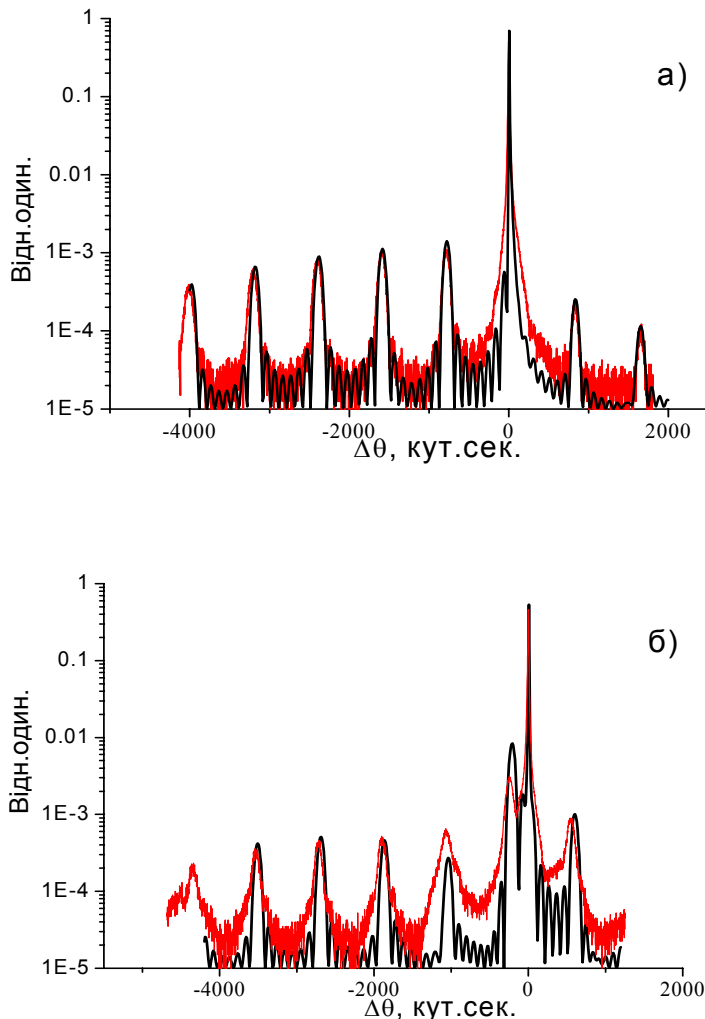


Рис.5. 004 КДВ восьмиперіодної (14 МШ InGaAs/40 МШ GaAs) структури з вмістом індію: а) $x = 0.25$; б) $x = 0.35$. Розрахункова (чорна) і експериментальна (сіра) крива.

Ga дифундують в КЯ. Структура квантових ям така, що верхні й нижні шари виявляються розмитими й з меншим вмістом індію, ніж більш глибокі стосовно інтерфейсу частини квантової ями.

Значення деформації в напрямку паралельному гетерограниці свідчать про значну релаксацію ґратки, тобто про частковий зрив псевдоморфного росту і появу тривимірного росту острівцевих структур.

Аналіз КДВ для зразків з $x = 0.3$ та 0.35 свідчить про те, що КЯ складається із двох областей, які відрізняються по складу від заданого. Перша область з композицією ($x = 0.17$) і друга – з більшим складом ($x = 0.9$), яка імовірно, включає острівцеві структури. Про утворення тривимірних острівцевих структур свідчить розширення піків сателітів низьких порядків. В цьому випадку на фоні подавлених когерентних піків добре видно пік, утворений дифузною компонентою інтенсивності від квантових точок.

В наступному параграфі приведені результати рентгеноструктурних досліджень багатошарових InGaAs/GaAs

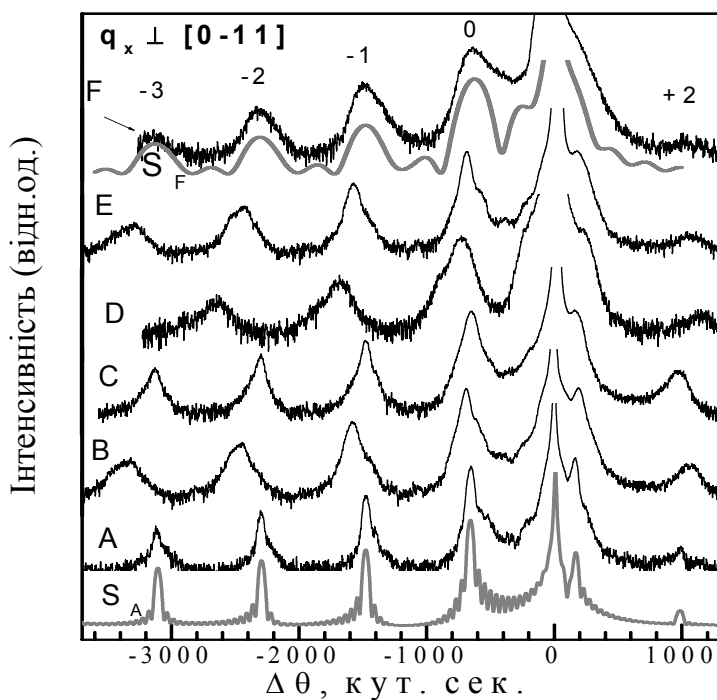


Рис.6. КДВ для симетричного відбиття GaAs (004). 17-ти періодна InGaAs/GaAs структура.

КН: середні їх значення дорівнюють 3.5 і 6.5 нм. КН орієнтовані вздовж напрямку $[0-11]$ і мають довжину більше 5 мкм. На рис.6 показані дифракційні криві відбиття GaAs (004) вихідного і відпалених зразків для випадку, коли площина дифракції співпадає з кристалографічним напрямом $[011]$, перпендикулярним напрямку орієнтації КН: А (вихідний), В (500°C), С (600°C), D (650°C), Е (750°C), і F (850°C). Крива S_A і крива S_F відповідають симульованим кривим гойдання зразка А і зразка F, відповідно.

КДВ вихідного зразка (рис.6, крива А) містить: пік підкладки GaAs; нульовий пік або пік середньої невідповідності ґратки для двошарової структури, та набір вторинних піків – „сателітів”, які симетрично розташовані відносно нульового піка. Звернемо увагу

на багатопіковість багатопікових InGaAs/GaAs (100) структур із самоорганізованими квантовими нитками (КН), підданими швидкому термічному відпалу (ШТВ).

Досліджувалися сімнадцяти-періодні (11.5 МШ) InGaAs/(67 МШ) GaAs) на GaAs(100) структури з номінальною концентрацією індію $x = 0.35$. ШТВ проводився в атмосфері аргону при температурах 550°C – 850°C на протязі 30 сек. Час встановлення робочих температур дорівнював 10 сек.

АСМ зображення верхнього шару досліджуваної структури являє собою масив періодично розміщених КН, середня відстань між якими складає ≈ 90 нм, а ширина їх основи змінюється від ≈ 35 до ≈ 41 нм. Має місце бімодальний розподіл висот

на те, що форма піків відбиття є асиметричною з боку менших кутів, що можна пояснити наявністю азимутальної анізотропії розподілу пружних деформацій.

Однак, при збільшенні температури ШТВ, крім зсуву положення сателітів, спостерігаються два ефекти: зменшення інтенсивності всіх піків в порівнянні з інтенсивністю піка GaAs і асиметричне збільшення напівширини піків сателітів. Розширення піків сателітів може бути зумовлено декількома причинами: - дислокаціями, які не змінюють їх кутового положення, а приводять до розширення і появи дифузного розсіяння; - шорсткістю інтерфейсів і градієнтом компонентного складу; - мозаїчністю структури плівки – повертанням площин частини областей плівки як цілого відносно підкладки GaAs; - дисперсією періоду в багатошаровій структурі.

Встановлено, що з ростом температури ШТВ спостерігається незначний зсув нульового сателіта в бік менших кутів від піка GaAs і його розширення. Цей зсув відповідає збільшенню $x_{\text{сер}}$ внаслідок термічно-активованих процесів інтердифузії In/Ga, наприклад, концентрація In в InGaAs КН зменшується, а в 2D InGaAs шарі – збільшується. Інше пояснення спостережуваних структурних змін ґрунтується на моделі „зародження плюс розчинення”. Згідно цієї моделі під час ШТВ середня квантова нитка, розташована в латеральній площині, розчиняється в 2D шарі, що приводить до зростання концентрації індію в 2D шарі (можливо і в КН) і збільшення відстані між КН. Можливою рушійною силою процесу розчинення InGaAs КН є наявність залишкових деформацій в багатошаровій структурі зумовлених значними ортогональними спотвореннями структури. Таким чином, можна припустити, що при $T_{\text{відп}} \leq 750^{\circ}\text{C}$ відбувається перерозподіл (релаксація) деформацій в областях на межі поділу КН - 2D шар. Релаксація залишкових деформацій внаслідок термічно-активованих і деформаційно-підсиленних процесів інтердифузії атомів In/Ga є рушійним механізмом структурних перетворень під час ШТВ InGaAs КН.

Аналіз КДВ вихідного і відпаленого при $T_{\text{відп}} = 750^{\circ}\text{C}$ зразків, отриманих в двох взаємно-перпендикулярних азимутальних напрямках падаючого випромінювання: паралельного і перпендикулярного до напрямку орієнтації (In,Ga)As КН вказує на асиметричне розширення дифракційних піків відбиття у вихідному зразку, яке збільшується при ШТВ і особливо чітко проявляється із збільшенням порядку відбиття.

Встановлено що основним і домінуючим ефектом, який зумовлює асиметричне розширення піків є залежність кутового положення піків від напрямку площини розсіяння. Тобто, розширення відповідає асиметричному розщепленню піків відбиття, що пояснюється існуванням в досліджуваних зразках двох НГ періодів 22.05 і 22.8 нм.

Поява таких періодів зумовлена анізотропним відносно кристалографічних напрямків сімейства площин $\{011\}$ квазіперіодичним розподілом пружної деформації в періодичній структурі InGaAs/GaAs, виникнення якого зумовлено релаксацією пружних напружень, внесених квантовими нитками. Цей висновок підтверджує порівняння дифракційних кривих відбивання GaAs (004) з площиною розсіяння вздовж $[0-11]$ і $[011]$ напрямів.

Для цих двох напрямів спостерігається ефект анізотропного розподілу деформацій, обумовлений анізотропією поверхневої дифузії атомів. Останнє приводить до анізотропного вбудовування атомів In при формуванні на ростовій поверхні квантових ниток. Як наслідок, в багатошаровій структурі формується анізотропний характер роз-

поділу деформацій, що приводить до орторомбічних відхилень від тетрагональної псевдоморфної деформації характерної для гетеросистеми з квантовими ямами. Таким чином, спостережуваний ефект розщеплення сателітів є результатом двох ефектів – релаксації деформації і пониження симетрії структури. Підтвердженням зробленого припущення є також зміна вертикального періоду структури при температурному відпалі.

Однією із можливих причин зміни періоду є орторомбічні спотворення кристалічної структури 2D шарів, що приводить до зміни відстані між кристалографічними площинами і кута їх нахилу. Однак, наші оцінки показують, що таке пониження симетрії структури може змінити період лише на 2–3%.

Зміна кутового положення сателітів та їхнє розширення при відпалі може свідчити про зміну латерального періоду і наявність флуктуацій періоду КН. При підвищенні температури ШТВ ($T_{\text{відп}} = 600^\circ\text{C}$) латеральний період збільшується до 106.5 нм. Це є прямим підтвердженням протікання термічно-стимульованих процесів латерального масопереносу зумовлених інтердифузією атомів In/Ga.

Наступний параграф присвячено дослідженням впливу анізотропії полів деформації в багатошарових структурах InGaAs/GaAs на спектри відбиття рентгенівських променів. Одним з факторів, який може призвести до помилкових висновків про

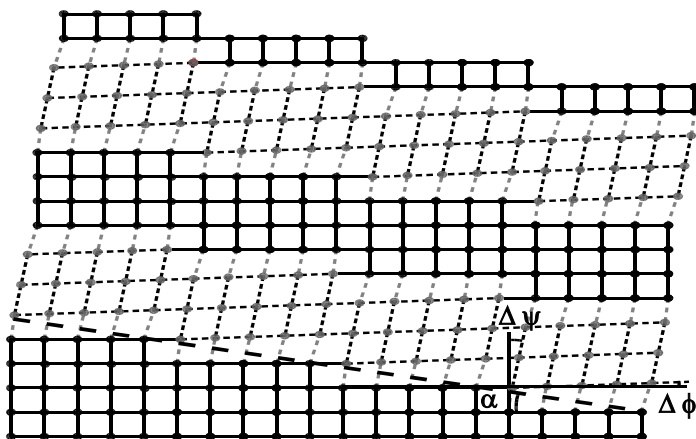


Рис.7. Модель деформації кристалічної ґратки $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ структури. Суцільні чорні точки – атоми ґратки GaAs, штрихові сірі – атоми ґратки InGaAs. (α – кут розорієнтації підкладки, $\Delta\psi$ і $\Delta\phi$ – нормальні та тангенційні кути розорієнтації атомних площин InGaAs).

структуру є анізотропія деформацій. Якщо з деяких причин кристалу вигідно деформувати свою ґратку так, щоб напруги в різних напрямках були різними, то для правильного визначення структури необхідно проводити виміри в різних напрямках. Для зменшення деформаційної енергії в шарах, які утворені різними матеріалами їх кристалічна ґратка може анізотропно спотворюватись.

Асиметричне спотворення ґратки призводить до зсуву брегівського піку відносно азимутальної орієнтації зразка. Ці зсуви можуть призводити до помилок при інтерпретуванні КДВ, так вони можуть бути інтерпретовані як композиційні коливання або як нахили площин в релаксаційних механізмах.

Таким чином, коректне визначення па-

раметрів розорієнтованих псевдоморфних зразків повинно базуватися на припущенні про асиметричне спотворення деформованих елементарних ґраток [1].

Оскільки шари InGaAs мають більшу постійну ґратки ніж GaAs, то при наявності анізотропії, в структурі можуть виникнути деформації, які збільшать параметр ґратки для InGaAs шарів та викличуть розорієнтацію вектора дифракції підкладки відносно поверхні.

На рис.7 представлена модель спотвореної таким чином ґратки. Подібна деформація стає енергетично вигідною для даної системи. Крім того необхідно відмітити що така деформація не супроводжується виникненням дислокацій невідповідності, так що збільшення енергії за рахунок їх виникнення не відбувається.

З аналізу КДВ для було визначено кут розорієнтації всієї структури $\alpha = 40^\circ$, і локальний кут розорієнтації InGaAs шарів $\Delta\phi = 145''$ в напрямку [011].

П'ятий розділ присвячений особливостям дифракції в багатошарових SiGe структурах з квантовими острівцями.

Перший параграф присвячений вивченню впливу просторового упорядкування квантових острівців у багатошарових SiGe наноструктурах на брегівську дифракцію. З метою вивчення процесів формування квантових точок у НГ структурах і визначення їх основних параметрів, а також впливу цих параметрів на дифракційні спектри розсіювання рентгенівських променів досліджувалися надґраткові структури Si/Ge.

На підкладці кремнію (100) МПЕ було вирощено 10-ти періодні Si/Ge надґратки. Товщина шарів германію складала 4 і 7 моношарів.

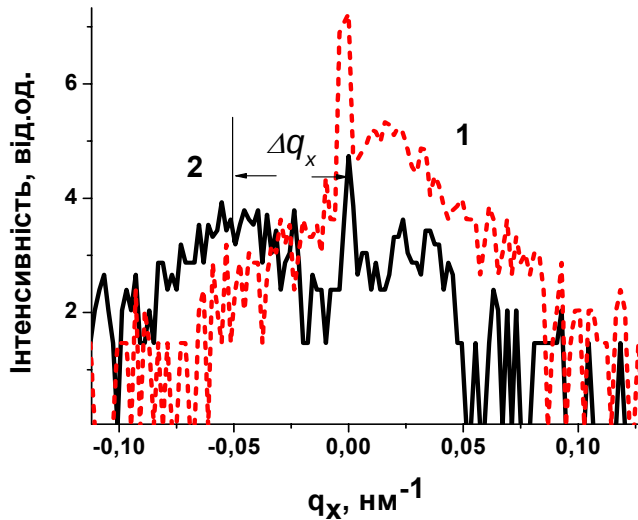


Рис.8. Проекції перерізів піків дифузного розсіювання біля сателітів SL_0 (1) і SL_1 (2) на вісь q_x (ω скани), зняті навколо вузла Si (224). Зразок в якому по 7МШ Ge в надґратці.

піки дифузного розсіювання, викликані упорядкованою структурою квантових точок.

На рис.8 приведені перетини цих карт поблизу сателітів НГ нульового і першого порядків. Поблизу сателіта нульового порядку дифузне розсіювання визначене областю деформації і розсіюванням ґратки Si далеко від острівців. Максимум дифузної інтенсивності навколо SL_0 , зміщений у позитивному q_x напрямку, що відповідає стискаючій деформації ґратки кремнію в областях між точками яка рівна 5.062×10^{-4} . Поблизу сателіта першого порядку SL_1 дифузне розсіювання визначене областю деформації і розсіюванням ґраткою острівців. Максимум дифузної інтенсивності навколо SL_1 зміщений у бік менших значень q_x , що відповідає деформації розтягу кристалічної ґратки точки. Середнє

Однаковий період коливань інтенсивності сателітів для двох структур з різною товщиною шару Ge свідчить про те, що вони модулюються змочувальним і буферним шарами однакової товщини. Відомо, що при товщині шару Ge, яка перевищує 4МШ починається формування острівців по методу Странські-Крастанова. Отже, надлишковий Ge (понад 4 МШ) іде на їхнє формування. Аналіз КДВ вказує на те, острівці не приймають участі в модуляції надґраткової структури, однак впливають на картину деформаційних полів у НГ структурі.

На двовірних картах розподілу інтенсивності рентгенівських променів (РП) навколо вузлів оберненої ґратки спостерігається розсіювання від підкладки, сателітна структура від НГ, а також

значення цієї деформації складає 1.119×10^{-3} . З відстані Δq_x між латеральними максимумами визначимо середню відстань $\langle L \rangle$ між квантовими точками, яка в нашому випадку дорівнює 83.8 нм. Розміри точкових областей складають 67.5 нм.

Період НГ формується тільки змочувальним шаром і шаром кремнію. Слабко корельовані точки дають малий внесок у формування надграткової структури. Це виявляється тільки в перерозподілі полів пружних напружень при збереженні значення періоду НГ. З цього слідує, що наявність острівців у НГ і розкид значень їх висоти не гасять модуляцію.

В наступному параграфі досліджено вплив інтердифузії на компонентний склад та релаксацію механічних напружень в самоіндукованих SiGe nanoострівцях.

Встановлено, що розподіл самоіндукованих Ge острівців за розмірами по поверхні зразка, як правило, має бімодальний характер. Це обумовлено тим, що nanoострівці можуть набувати двох різних форм: піраміди та куполу. Боковими гранями пірамід є площини типу $\{105\}$, в той час як для куполів – $\{113\}$, $\{102\}$. В загальному випадку, розташування та розміри nanoострівців по поверхні зразка носять статистичний характер і мають значний розкид. Серед способів покращення однорідності розмірів острівців можна виділити наступні: використання кремнієвих підкладок з відхиленням на деякий кут від (100) та застосування методу синхронного зародження острівців.

Об'єктом досліджень були гетеросистеми Ge/Si(001) із nanoострівцями, отримані при різних технологічних режимах методом МПЕ на Si (001). Для всіх зразків, германієві шари були однакової товщини (9 МШ), а епітаксія проводилася при температурах (600, 700, 750°C).

Аналіз АСМ зображень показав, що найбільша щільність ($1.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) острівців спостерігається при температурі 600°C. У цьому випадку лише ~11% острівців мають форму піраміди. При температурі росту 700°C щільність острівців значно зменшується ($2.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$), і незважаючи на те, що об'єми як пірамід, так і куполів зростають, відносна кількість пірамід збільшується (37%). Ця тенденція ще більше проявляється при температурі росту 750°C (щільність острівців зменшується до $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, а відносна кількість пірамід зростає до 58%). Варто зазначити, що на спектрах КДВ структур з nanoострівцями, вирощених при 600°C спостерігається область деформації стиску.

Встановлено, що релаксація механічних напружень в острівцях з захисним кремнієвим шаром менша в порівнянні з острівцями, сформованими при тих же умовах, але без покриття кремнієм. Nanoострівці знаходяться в стані стиску $(\Delta a/a_{\perp})/(\Delta a/a_{\parallel}) > 1$ і при зростанні температури епітаксії величини пружної деформації стиску зменшуються.

Показано, що із збільшенням температури епітаксії вміст кремнію в острівцях значно зростає за рахунок збільшення коефіцієнта дифузії атомів Si із підкладки, яке стимулюється значними неоднорідними напруженнями навколо основ острівців. Цей процес стає дуже важливим в процесі зародження та росту пірамід. У результаті збільшення вмісту кремнію у цих острівцях, їх пружна, а також повна енергії зменшується і вони залишаються стабільними до значно більших критичних об'ємів. При досягненні критичного об'єму в подальшому пірамідальні острівці трансформуються в куполоподібні за рахунок виникнення біля основи бокових граней, які мають більший кут (25°) з підкладкою, ніж бокові грані пірамід (11.3°). Ріст куполоподібних острівців після їх

трансформації з пірамідальних, відбувається в основному за рахунок збільшення їх висоти, що забезпечує більшу релаксацію.

Наступний параграф цього розділу присвячено аналізу особливостей зародження та упорядкування GeSi nanoострівців в багатошарових структурах, сформованих на Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ буферних шарах та дослідженню впливу типу буферного шару $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на просторове впорядкування nanoострівців Ge.

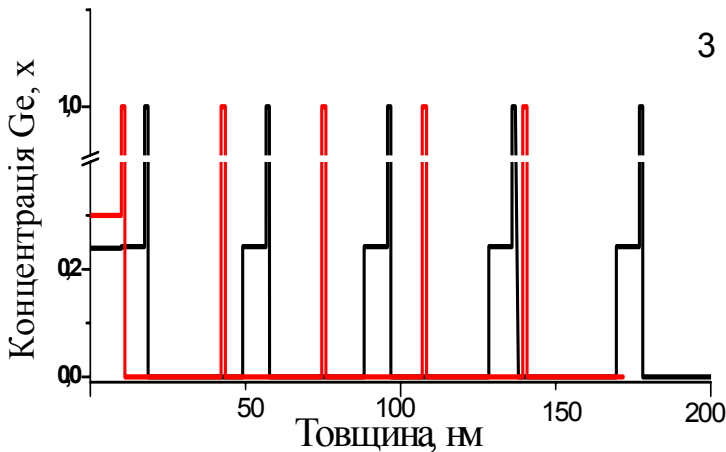


Рис.9. Розподіл германію в структурі № 3 (чорна крива – фітування, сіра – технологічно задані параметри).

шаром Si товщиною 31 нм.

Встановлено розщеплення когерентних сателітів НГ, яке може бути обумовлене наявністю двох різних періодів НГ вздовж осі росту, або/і областей з різним значенням Ge в шарах вздовж осі росту. Друга причина є більш імовірною, оскільки значення величин розщеплених періодів практично співпадає між собою (рис.9).

Встановлено, що GeSi в багатошарових структурах SiGe/Si товщина розділяючого шару кремнію в періоді НГ впливає на просторове формування впорядкованої системи nanoострівців SiGe. При цьому показано, що товщина та компонентний склад буферного шару впливають на латеральне впорядкування nanoострівців завдяки різній чутливості до впорядкованої модуляції деформацій на поверхні шару. Формування острівців обумовлене впливом полів деформацій, створених острівцями, які знаходяться в нижніх шарах. При товщині кремнієвого спейсера ~ 100 нм, і висоті острівців ~ 5 нм і більше, поля напружень когерентно передаються до наступного шару Ge. Це приводить до формування острівців лише в тих місцях, де наявні максимальні напружки розтягу в Si спейсері. В процесі епітаксії Ge на такий Si шар, наявні в ньому напружки приводять до переходу від пошарового росту до острівцевого при меншій товщині змочувального шару Ge.

Просторове впорядкування nanoострівців в НГ задається виключно латеральним впорядкуванням вже в першому періоді. Встановлено, що у випадку товстих буферних шарів пластична релаксація з виникненням дислокацій невідповідності починається на границі поділу буферний шар–підкладка, а шари НГ є когерентними відносно буферного шару.

3

Досліджувались три типи багатошарових структур отриманих методом МПЕ германію на Si (001). Структура №1 формувалася осадженням 7.5 МШ Ge на Si шар, після чого сформовані острівці покривалися шаром Si товщиною 26 нм. Процедура повторювалася шість разів. Структура №2 була отримана осадженням 6 періодів наступної послідовності шарів: 10 нм $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$ / 10 МШ Ge / 40 нм Si. Структура №3 формувалася осадженням 5 періодів з 9 МШ Ge на попередньо вирощений 10 нм $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ шар, після чого сформовані острівці покривалися

Встановлено, що збільшення товщини осаженного в процесі формування острівців Ge призводить до переходу від бімодального розподілу розмірів та форми острівців типу hut-кластерів і пірамід, який спостерігається при 9 МШ германію, до одномодального розподілу тільки куполоподібних острівців при товщині германію 10 МШ і подальшому звуженню цього розподілу при 11 МШ. Зменшення відстані між острівцями призводить до більш сильної їх взаємодії за допомогою полів пружних деформацій, які вони створюють. Пружна взаємодія призводить до появи просторового впорядкування в розташуванні острівців.

Показано, що збільшення кількості осаженного германію приводить до покращення впорядкування острівців і до більш чіткого прояву еліптичного характеру основ острівців в напрямках $\langle 100 \rangle$. Анізотропія форми основ острівців в деякій мірі говорить про інтенсивність пружної взаємодії між ними і дифузійного масопереносу. При збільшенні товщини Ge чітко фіксується зменшення періоду розміщення острівців, і в напрямку $[010]$ становить 200 нм, 188 нм і 184 нм при 9 МШ, 10 МШ і 11 МШ германію відповідно.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі обґрунтовано та апробовано комплекс методів високороздільної рентгенівської дифрактометрії для кількісної характеристики реальної структури приповерхневих і перехідних шарів монокристалів напівпровідників і вирощених на них багатшарових гетеросистем. Зокрема:

1. Встановлено, що в приповерхневих шарах кремнію, підданих імплантації іонів B^+ і As^+ при одночасній (in situ) дії ультразвуку (УЗ) відбувається не лише зменшення напруг, але й зміна знаку деформації, яка викликана перерозподілом точкових дефектів, а також варіаціями їх розмірів. Відпал зразків при $T = 800\text{--}950^\circ\text{C}$ призводить до релаксації напруг як у вихідних зразках, так і в імплантованих, незалежно від типу іонів, а УЗ ще більше стимулює процес релаксації.
2. Встановлено, що при застосуванні ультразвукового впливу при імплантації He в SiGe шари, вирощені псевдоморфно на Si підкладках можна керувати ступенем їх релаксації. Показано зростання рівня релаксації SiGe шарів при УЗ дії.
3. Досліджено вплив анізотропних спотворень кристалічної ґратки у надґратці на криві дифракційного відбиття (КДВ), отримані методами високороздільної рентгенівської дифрактометрії. Методами динамічної теорії дифракції визначено параметри спотвореної кристалічної ґратки шарів та форму й параметри інтерфейсу між шарами.
4. Встановлено, що в InGaAs/GaAs структурах з квантовими нитками (КН), підданих швидкому термічному відпалу (ШТВ) ($550^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$, 30 сек.) рушійним механізмом структурних перетворень є релаксація залишкових деформацій внаслідок термічно-активованих і деформаційно-підсилених процесів інтердифузії атомів In/Ga на межі поділу КН-2D шар. Існування в досліджуваних зразках двох НГ вертикальних періодів та їх зміну під час ШТВ пояснено на основі анізотропного характеру розподілу пружної деформації і пониження симетрії структури.
5. Показано, що збільшення товщини Ge, осаженного на напружений буферний шар стимулює просторове впорядкування острівців за рахунок більшої взаємодії полів

пружних деформацій між сусідніми острівцями, обумовленої збільшенням заповнення поверхневого простору структури острівцями. Просторово неоднорідні поля напруг в системі збільшують роль інтердифузійних процесів, забезпечуючи аномально інтенсивні потоки атомів із буферного шару в острівці, в яких відбувається часткова релаксація напруг.

6. Встановлено, що в багатошарових структурах SiGe/Si товщина розділяючого шару кремнію в періоді НГ впливає на просторове формування впорядкованої системи наноострівців SiGe. Показано, що товщина та компонентний склад буферного шару впливають на латеральне впорядкування наноострівців завдяки різній чутливості до впорядкованої модуляції деформацій на поверхні шару.
7. Показано, що просторове впорядкування наноострівців в НГ задається латеральним впорядкуванням вже в першому періоді. Встановлено, що у випадку товстих буферних шарів пластична релаксація з виникненням дислокацій невідповідності починається на границі поділу буферний шар–підкладка, а шари НГ є когерентними до буферного шару.

Список цитованої літератури

1. Єфанов О.М., Кладько В.П., Мачулін В.Б., Молодкін В.Б. Динамічна дифракція Х-променів у багатошарових структурах. (Київ: Наукова Думка: 2008), 223 с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кладько В.П., Мачулін В.Ф., Стрельчук В.В., Прокопенко І.В., Гудыменко А.І., Корчевой А.А. Рентгенодифракционные исследования структурных 2D-3D структурных переходов в наноразмерных многослойных периодических структурах // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2003. – Т.1, №2. – с.447-457.
2. Діагностика тонкої структури границь розділу фаз в надграткових структурах бінарних напівпровідників методом квазізаборонених відбиттів рентгенівських променів. 2 Українська Наукова Конференція з Фізики Напівпровідників (Чернівці, Україна, 20- 24 вересня 2004) с.161.
3. Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in-situ ultrasonic treatments Proc. 2nd Intern. SiGe Technol. and Device Meeting (ISDTM) 2004. (Germany, Frankfurt/Oder). p.173-174.
4. Валах М.Я., Кладько В.П., Мачулін В.Ф., та ін. всього 9 осіб. Вплив інтердифузії на релаксацію механічних напружень та компонентний склад в самоорганізованих SiGe наноострівцях. Металлофизика и нов. технологии, 2004. Т.26, №6. с.741-751.
5. Kladko V., Romanjuk B., Melnik V., та інші всього 8 осіб Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in-situ ultrasonic treatments. Materials Science in Semiconductor Processing, 2005. V.8, Issue 1-3. p.171-175.
6. Вплив теплової та ультразвукової обробок на релаксацію механічних напружень в імплантованих Si/SiGe гетероструктурах 2 Українська Наукова Конференція з Фізики Напівпровідників (Чернівці, Україна, 20- 24 вересня 2004) с.193.
7. Мачулін В.Ф., Єфанов О.М., Когутюк П.П., та ін. всього 7 осіб. Прояв просторового упорядкування квантових острівців у багатошарових наноструктурах SiGe у рентгенівській дифракції. УФЖ. 2005, Т.50, № 9. с.976-980.

8. Стрельчук В.В., Кладько В.П., Єфанов О.М., та інші всього 7 осіб. Anisotropy of elastic deformations in multilayer (In,Ga)As/GaAs structures with quantum wires: X-ray diffraction study. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2005. V.8, N1. p.36-45.
9. Yefanov O., Kladko V.P., Strelchuk V., та ін. всього 7 осіб. Fields of deformation anisotropy exploration in multilayered (In,Ga)As/GaAs structures by high-resolution X-ray scattering. Phys. Status Sol. (a), 2006. V.203, Issue 1. p.154-157.
10. Єфанов А.Н., Кладько В.П., Стрельчук В.В., та інші всього 7 осіб. Влияние анизотропии полей деформации в многослойных структурах (InGa) As/GaAs на спектры отражения рентгеновских лучей. Металлофизика и новейшие технологии. 2006, Т. 28, № 4. с.441-448.
11. Кладько В.П., Мельник В.П., Оліх Я.М., та інші, всього 8 осіб. Особливості дефектоутворення в приповерхневих шарах монокристалів кремнію при акустостимульованій імплантації іонів бору та миш'яку. УФЖ. 2008, Т.53, №2.с.140-145.
12. Эффекты латерального упорядочения самоорганизованных SiGe наноструктур, выращенных на напряженных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ буферных слоях. XV Міжнародний симпозиум «Нанофізика і наноелектроніка», Нижній Новгород, 2011.
13. В.О. Юхимчук, М.Я. Валах, В.П. Кладько, та інші, всього 7 осіб. Особливості зародження та упорядкування SiGe наноструктур в багатошарових структурах, сформованих на Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ буферних шарах. УФЖ, 2011, Т. 56, № 3. с.254-262.
14. Особливості зародження та упорядкування SiGe наноструктур в багатошарових структурах, сформованих на Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ буферних шарах. 1-ша міжнародна науково-практична конференція ;НМІТФ-2011 (Кременчук, Україна, 5-7 травня, 2011).

АНОТАЦІЯ

Гудименко О.Й. Рентгенівська дифрактометрія приповерхневих шарів та гетероструктур на основі Si(Ge) та In(Ga)As – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, 2011.

Дисертація присвячена розробці експериментальних методів дослідження параметрів багатошарових структур та приповерхневих шарів, розрахунку їх основних структурних властивостей із спектрів відбиття X–променів в бреггівській геометрії дифракції.

Встановлено, що в приповерхневих шарах кремнію, підданих імплантації іонів B^+ і As^+ при одночасній дії ультразвуку і відпалу зразків при $T = 800\text{--}950^\circ\text{C}$ відбувається стимульований процес релаксації. Встановлено, що при застосуванні ультразвукового впливу при імплантації He в SiGe шари постійного складу, вирощені псевдоморфно на напружених Si підкладках можна керувати ступенем їх релаксації. Показано зростання рівня релаксації SiGe шарів при УЗ дії.

Методами динамічної теорії дифракції визначено параметри спотвореної кристалічної ґратки шарів, форму та параметри інтерфейсу між шарами.

Встановлено, що в InGaAs/GaAs структурах з квантовими нитками (КН), підданих швидкому термічному відпалу (ШТВ) ($550^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$, 30 сек) рушійним механізмом структурних перетворень є релаксація залишкових деформацій внаслідок термічно-

активованих і деформаційно-підсилених процесів інтердифузії атомів In/Ga на межі поділу КН-2D шар.

Ключові слова: дифракція X–променів, приповерхневі імплантовані шари, квантово-розмірні шари, деформація, градієнт складу, надгратки.

АННОТАЦИЯ

Гудыменко А.И. Рентгеновская дифрактометрия приповерхностных слоев и гетероструктур на основе Si(Ge) и In(Ga)As. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев, 2011.

Диссертация посвящена разработке экспериментальных методов исследования параметров многослойных планарных структур, расчету структурных свойств пленок по спектрам отражения X–лучей в геометрии Брэгга.

Показано, что в приповерхностных слоях кремния, подверженных имплантации ионами B^+ и As^+ при одновременном (in situ) действии ультразвука (УЗ) происходит не только уменьшение напряжений, но и изменение знака деформации, которое вызвано перераспределением точечных дефектов, а также вариациями их размеров. Отжиг образцов при $T = 800–950^\circ C$ приводит к релаксации напряжений как в исходных, так и в имплантированных образцах, не зависимо от типа ионов, а УЗ еще больше стимулирует процесс релаксации. Установлено, что при использовании ультразвукового влияния при имплантации He в SiGe слои, выращенные псевдоморфно на напряженных Si подложках можно управлять степенью их релаксации. Показано возрастание уровня релаксации SiGe слоев при УЗ действии.

Рассмотрено влияние анизотропных искажений кристаллической решетки в сверхрешетке на кривые дифракционного отражения (КДО), полученные методами высоко-разрешающей рентгеновской дифрактометрии. Методами динамической теории дифракции определены параметры искаженной кристаллической решетки слоев, форму и параметры интерфейса между слоями.

Показано, что рост толщины Ge, осажденного на напряженный буферный слой стимулирует пространственное упорядочение островков за счет большего взаимодействия полей упругих деформаций между ними, обусловленного увеличением заполнения поверхности структуры островками. Неоднородные поля напряжений в системе увеличивают роль интердиффузионных процессов, обеспечивая аномально интенсивные потоки атомов из буферного слоя в островки, где происходит частичная релаксация напряжений.

Установлено, что в InGaAs/GaAs структурах с квантовыми нитками (КН), подающихся быстрому термическому отжигу (БТО) ($550^\circ C – 850^\circ C$, 30 сек) движущим механизмом структурных преобразований является релаксация остаточных деформаций вследствие термически-активированных и деформационно-усиленных процессов интердиффузии атомов In/Ga на границе раздела КН-2D шар. Существование в исследуемых образцах двух сверхрешеточных периодов и их изменение под действием БТО пояснено на основе анизотропного характера распределения деформации и понижения симметрии структуры.

Ключевые слова: дифракция X-лучей, приповерхностные имплантированные слои, квантово-размерные слои, деформация, градиент состава, сверхрешетки.

ABSTRACT

Gudymenko O.Yo. *X-ray diffractometry of subsurface layers and heterostructures based on Si(Ge) and In(Ga)As* – Manuscript.

Dissertation for the Ph.D. degree by speciality 01.04.07 – solid state physics. V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2011.

Dissertation is devoted to the development of experimental methods for multi-layered planar structures characterization and calculation of basic structural properties from the X-ray reflectivity spectra in Bragg geometry.

It is established that it is possible to control the degree of relaxation of SiGe layers grown pseudomorphically on strained Si substrates using the ultrasonic treatment at the implantation of He-ion into SiGe. The increase of degree of relaxation in SiGe at ultrasonic treatment was shown.

The influence of anisotropic distortions of crystal lattice in the superlattice on diffraction rocking curves (DRC) obtained by high resolution X-ray diffraction has been studied. The parameters of distorted crystal lattice of layers, shape and parameters of interfaces between them were determined with help of dynamical diffraction theory.

It is established that in InGaAs/GaAs structures with quantum wires (QW) at rapid thermal annealing (RTA) (550°C – 850°C, 30 sec.) the driving mechanism of structure transformation is the relaxation of residual strain due to the thermal-activated and deformation-enhanced processes of In/Ga interdiffusion on the QW-2D layer interface. Existing of two periods of superlattice and their changing at RTA for investigated samples explains on base of anisotropic deformation distribution and decreasing of structural symmetry.

Keywords: X-ray diffraction, subsurface implanted layers, quantum layers, deformation, gradient of composition, superlattices.