

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

УДК 535.37;621.315.592

БАЧЕРИКОВ КІРІЯ КІРІЯОВИЧ

"СПЕКТРОСКОПІЯ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ ТА КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ  
СВІТЛА ТОНКИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК ТА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА  
ОСНОВІ АРСЕНІДУ ГАЛІЮ".

01.04.10 - /фізика напівпровідників і діодів/ Київ/

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993



Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників АН України

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,  
професор Корбутяк Д.В.,

доктор фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
Артамонов В.В.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор Гнатенко Ю.П.

доктор фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
Остапенко С.С.

Провідна організація - Херсонський індустріальний інститут

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 р. о \_\_\_ годин \_\_\_ хв.  
на засіданні Спеціалізованої ради К 016.25.01 в Інституті  
фізики напівпровідників АН України (252650, Київ-28, проспект  
Науки, 45).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту  
фізики напівпровідників АН України.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчені печат-  
кою, прохання надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого сек-  
ретаря Спеціалізованої ради.

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради,  
доктор фізико-математичних наук

Беляев О.Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток напівпровідникової електроніки нерозривно пов'язаний з досягненнями в області технології напівпровідників. Рівне покращення якості традиційних і оволодіння новими напівпровідниковими матеріалами дозволили приступити до створення принципово нових типів (у тому числі швидкодіючих) інтегральних схем, оптоелектронних і НВЧ-приладів. Використання нових напівпровідникових матеріалів і приладів вимагає досконального дослідження їх фізичних властивостей.

Основним об'єктом дослідження у даній роботі було обрано GaAs отриманий методом молекулярно-променевої епітаксії (МРЕ), як матеріал, що широко використовується в опто- і мікроелектроніці, а також гетероструктури і  $\delta_1\delta_2$ -надструктури на його основі.

Метод  $\delta$ -легування є досить перспективною технологією, оскільки дозволяє здійснити намірене розташування донорних атомів Si і акцепторних атомів Be в точній кількості з точністю до одного атомарного шару. Методика  $\delta$ -легування використовується для створення надграток з V-подібними квантовими ямами. Однак, у даній роботі основну увагу було приділено не квантовим властивостям  $\delta_1\delta_2$ -структур, а дослідженню впливу  $\delta$ -шарів на властивості матриці GaAs.

Вирощування шарів GaAs на кремнієвій підкладці методом молекулярно-променевої епітаксії, уявляється також перспективною технологією, оскільки використання Si як матеріалу підкладки для вирощування шарів GaAs дозволяє комбінувати Si-схеми і GaAs, що, в свою чергу, дає можливість використовувати переваги обох матеріалів для створення швидкодіючих приладів. Крім того, кремній має більшу теплопровідність ніж GaAs, що дає можливість покращити тепловідвід. І, нарешті, що не менш важливо, Si набагато дешевший і механічно міцніший від GaAs. Однак, з цілого ряду причин, таких як 4.1% розугодження параметрів ґратки GaAs і Si, переходом від ковалентного напівпровідника до напівпровідника з частково іонним зв'язком, порушенням порядку в підґратках Ga і As у процесі епітаксії і відмінністю коефіцієнтів температурного розширення GaAs і Si, на межі розділу плівки-підкладки виникають значні за величиною механічні напруги, які породжують різного роду дефекти і дислокації в плівці GaAs. Тому зараз багато уваги приділяється пошуку засобів, які дозволяють впливати на

дефектність самих плівок і областей, що прилягають до гетерокордонів. Це ставить перед дослідниками ряд питань, які торкаються особливостей протікання фізичних процесів як в об'ємі таких шарів, так і їх впливу на приповерхневі області і на гетерокордони.

Крім того, у даній роботі було приділено багато уваги дослідженню властивостей ФЛ смуги, яка лежить в області, що перевищує ширину забороненої зони GaAs і має максимум в  $h\nu=1.551$  еВ. Раніше вже зустрічалися роботи, в яких досліджувались лінії ФЛ з  $E_{\text{max}}=E_g + \Delta$  в GaAs. Однак, явища, пов'язані з "закраєвим" випромінюванням ФЛ, досить рідкісні. Тому враховуючи це і те, що смуга 1.551 еВ зустрічалась в спектрах ФЛ гетероструктур GaAs/Si і  $\delta_i\delta_i$ -структур GaAs, які є одним з основних об'єктів дослідження, стало причиною дослідження її властивостей.

Важливість цих задач визначила актуальність роботи.

Важливо при цьому відзначити, що метод фотолюмінесценції дозволяє контролювати фундаментальні характеристики напівпровідникових матеріалів, параметри домішкових центрів і дефектів кристалічної ґратки. Вимір характеристик люмінесценції дає довідки про чистоту матеріалів, наявність електрично-активних і неактивних домішок і дефектів, їх природу і, як наслідок, вплив технологічних операцій на якість і параметри напівпровідникових структур.

Основна мета даної роботи складається в систематизації вивчення ефектів структурного розупорядкування методами ФЛ і КРС, особливостей спектрів близькраєвої і домішкової ФЛ об'єктів, які містять у собі тонкі і надтонкі напівпровідникові плівки, надґратки і гетероструктури; дослідження впливу зовнішніх активних факторів, таких як тиск, електричне поле, хімічні обробки та інше на спектри ФЛ таких структур; вивчення особливостей випромінювальних центрів, локалізованих на гетерокордонах, в порівнянні з об'ємом напівпровідника, а також порівняння результатів отриманих за допомогою методики ФЛ з результатами досліджень, отриманих іншими методами.

У відповідності до поставленої мети вирішувались наступні задачі:

1. Вивчення близькраєвої і домішкової ФЛ тонких плівок GaAs, отриманих молекулярно-проміневою епітаксією, зокрема, дослідження

впливу  $\delta$ -легованих шарів на властивості GaAs і порівняння результатів ФЛ з результатами, отриманими іншими методами і теорією.

2. Встановлення закономірностей структурного упорядкування і зниження безвипромінювальних втрат в приповерхневій області плівок GaAs і гетероструктур на їх основі під впливом цілого ряду різних технологічних режимів і активних впливів (термовідпал, вплив орієнтації підкладки і т.ін.).

3. Дослідження методами ФЛ і КРС розподілу механічних напруг і дефектів в гетероструктурах і надгратках, ексітонних ефектів в названих структурах, а також вивчення впливу умов отримання і наступних обробок на їх властивості.

4. Вивчення особливостей ФЛ, "закраєвого" випромінювання МПЕ-GaAs в області  $1,525 + 1,577$  eV і аналізу механізмів, що зумовлюють ці особливості.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів складається у наступному:

1. Вперше проведено систематичне дослідження методом ФЛ особливостей  $\delta$ -легованого GaAs. На основі цих досліджень виявлено ефект гетерування в  $\delta_1\delta_1$ -структурах. В тому числі, детальний аналіз результатів досліджень  $\delta_1\delta_1$ -структур з різноманітним проміжком між  $\delta$ -шарами дозволив визначити важливі особливості колективного внеску  $\delta$ -шарів в ефект гетерування і оцінити ступінь розупорядкування плівок в порівнянні з об'ємним матеріалом. Приведено порівняння результатів досліджень, одержаних методами фотолюмінісценції (ФЛ), комбінаційного розсіювання світла (КРС), вторинної іонної маспектрометрії (ВИМС) і порушеного повного внутрішнього відображення (ППВВ).

2. На основі дослідження спектрів низькотемпературної ФЛ знайдено істотний вплив тиску парів миш'яку поблизу підкладки під час росту  $\delta_1\delta_1$ -структур на співвідношення концентрації  $Si_{Ga}$  і  $Si_{As}$  центрів в одержаних структурах. Розглянуто вплив обох типів центрів на ефект гетерування, а також механізм даного ефекту.

3. На основі досліджень приповерхневої області GaAs і гетероструктур на його основі виявлено істотне зменшення механічних напруг, структурної розупорядкованості плівки GaAs в результаті різних режимів росту плівки, вибору орієнтації, а також в наслідок імплантації з наступним відпалом Si-підкладки.

4. Встановлена кореляція величин механічних напруг і лінії ФЛ,

зумовленої структурними дефектами в GaAs, а також залежність розподілу розупорядкування і механічних напруг в залежності від відстані до гетерокордонів.

5. В МПЕ-GaAs,  $\delta_1\delta_1$ -структурах і гетероепітаксіальних структурах GaAs/Si з орієнтацією (111) виявлена широка смуга люмінесценції з енергією фотонів, що перевищує ширину забороненої зони ( $h\nu=1.551\pm 1.577$  eV). Проведено дослідження особливостей цієї смуги і аналіз можливих механізмів, що обумовлюють її виникнення.

6. Проведено дослідження особливостей електрон-фононої взаємодії в МПЕ-плівках GaAs, вирощених на Si-підкладках з різноманітною орієнтацією. Виявлена залежність величини електрон-фононої взаємодії від величини механічної напруги в гетероструктурі GaAs/Si.

Практична цінність дисертації заключається в тому, що встановлені закономірності змін ФЛ при вирівнюванні умов отримання плівок можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів, у розвитку уявлення про характер процесів випромінювальної рекомбінації, які протікають в тонких і надтонких напівпровідникових плівках при наявності гетерокордонів і впливу зовнішніх активних факторів.

Результати дослідження ФЛ МПЕ-плівок GaAs, виконаних на замовлення надродно-господарчих підприємств в 1982-1989рр., використовувались для оптимізації технологічних режимів з метою отримання ідеальних плівок GaAs і гетероструктур на його основі, а також плівок і структур з заданими властивостями.

Основні захищені положення:

1.  $\delta$ -шари кремнію в МПЕ-GaAs служать гетером домішок і дефектів із матриці GaAs. В  $\delta_1\delta_1$ -структурах з декількома  $\delta$ -шарами здійснюється колективний внесок  $\delta$ -шарів в ефект гетерування. Оптимальні величини проміжку між  $\delta$ -шарами ( $d$ ), при яких ефективність роботи  $\delta$ -шарів як гетера найбільша, дорівнює  $50\pm 150$  нм.

2. Існує "порогова" концентрація кремнію для  $\delta$ -шару, при якому атоми Si, в ґратці GaAs, починають займати місця не тільки Ga, а й As. Тиск парів мис'яку поблизу підкладки під час росту  $\delta_1\delta_1$ -структур впливає аналогічно на розміщення атомів Si в ґратці GaAs. Тиск ( $P_{As}$ ), при якому співвідношення концентрацій  $Si_{\alpha\alpha}$  до  $Si_{\beta\beta}$  в одержуваних структурах мінімальне, становить  $\approx (8\pm 9)\times 10^{-4}$  Па. При співвідношенні  $Si_{\alpha\alpha} \ll Si_{\beta\beta}$  - ефект гетерування істотно

погіршується, так як роль гетера в  $\delta_i\delta_i$ -структурах виконують тільки  $Si_{aa}$  центри.

3. Концентрація структурних дефектів, які є центрами випромінювальної рекомбінації в гетероструктурах GaAs/Si росте, а величина електрон-фононної взаємодії в цих структурах знижується з ростом величини напруги, що розтягує кристалічну ґратку плівки. Концентрація структурних дефектів в МПЕ плівках GaAs на Si росте із зменшенням відстані до гетерокордонів.

4. Імплантація дозою  $\Phi=2.48 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  іонами  $C^+$  з наступним відпадом при  $T=850^\circ\text{C}$  Si-підкладки, яка має орієнтацію (111), призводить до зменшення механічних напруг, а також до покращення структури МПЕ-плівок GaAs, вирощеної на такі підкладці, так як така обробка призводить до кращої відповідності ґраток підкладки і плівки, що росте.

5. В спектрах низькотемпературної ФЛ в МПЕ-GaAs,  $\delta_i\delta_i$ -структурах і гетероепітаксціальних структурах GaAs/Si з орієнтацією (111), присутня широка смуга з енергією більшою забороненої зони ( $h\nu=1.525+1.577 \text{ eV}$ ). Відповідальна випромінювальна рекомбінація реалізується з участю акцепторних рівней.

Апробація роботи: IX Всесоюзний симпозиум "Електронные процессы на поверхности и в тонких слоях полупроводников" Новосибирск, 15-17 июня 1988г.; Всесоюзное совещание "Экситоны в полупроводниках-88" Вильнюс, 28-30 ноября 1988 г.; Школа-семинар по химии поверхности дисперсных твердых тел, Славско, 6-9 марта 1989 г.; Всесоюзная конференция "Поверхность-89". Черноголовка, 4-6 июля 1989г.; Школа молодых ученых. г.Паланга, 18-25 мая 1990.; VI Республиканская конференция "Физические проблемы МДП-интегральной электроники". г.Севастополь, 5 - 15 июня 1990 г.; Школа молодых ученых "Нетрадиционные материалы и структуры для микроэлектроники: физические основы, технология, перспективы". г.Алушта, 6-14 октября 1990 г.; Международная X школа семинар "Спектроскопия молекул и кристаллов", г. Сумы, 18-28 апреля 1991 г.; Школа молодых ученых "Нетрадиционные материалы и структуры для микроэлектроники: физические основы, технология, перспективы", г.Алушта, 27 сентября - 5 октября 1991 г.; School for Young Scientists "Semiconductors: Fundamentals and Applications", Alushta, Crimea, 6 - 14 October, 1992; "182-nd Meeting

The Electrochemical Society", Toronto, Ontario, Canada, 11 - 16 October, 1992; "1992 Fall Meeting Of The Materials Research Society", Boston, Massachusetts, USA, 30 November - 4 December, 1992.

Публікації: Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 6 наукових статтях і 6 тезисах докладів на конференціях.

Структура і обсяг дисертації: Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і списку літератури. Загальний об'єм 158 сторінок машинописного тексту (включаючи 52 малюнки, 3 таблиці).

#### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обумовлена актуальністю теми і мета роботи, показана наукова новизна і практична цінність задач, що вирішувались в дисертації, сформульованні основні положення, які винесені на захист, а також коротко викладені представлені в дисертації результати.

В першому розділі приведено огляд літератури, який відноситься до питань і проблем, досліджуваних в дисертації. Розглянуто основні теоретичні моделі, використані для інтерпретації процесів, які відбуваються в  $\delta_1\delta_2$ -структурах, гетероструктурах і МПЕ-плівках. Показані переваги  $\delta_1\delta_2$ -структур і приладів на їх основі з V-подібним профілем квантової ями в порівнянні з іншими надгратками, які мають П-подібний профіль ями.

Приведені наявні дані про вплив механічних напруг на спектри ФЛ гетероструктур і надграток, їх відмінність для зразків, які мають різні орієнтації підкладок, а також результати досліджень ФЛ  $\delta$ -легованого GaAs і МПЕ-GaAs, вирощеного на Si-підкладці, які зустрічаються в літературі.

Особливу увагу приділено повідомленням про люмінесценцію, зумовлену переходами з енергією випромінювання, яка перевищує ширину забороненої зони. Це такі явища, як внутрішньоцентрова і гаряча люмінесценція, випромінювальні переходи між неосновними долинами, переходи в надгратках і т.п. Крім того, в першому розділі приведені літературні дані які торкаються природи DX-центрів, який є можливим джерелом ФЛ з  $h\nu > E_g$ .

Другий розділ присвячено дослідженню  $\delta_1\delta_2$ -легованого GaAs.

Аналіз спектрів ФЛ  $\delta_1\delta_1$ -легованого GaAs, а також нелегованого GaAs, отриманих в однакових умовах, показав, що в  $\delta_1\delta_1$ -структурах, на відмінність від нелегованого GaAs, екситонні лінії ФЛ більш інтенсивні і вузькі. Крім того, інтенсивність ФЛ ліній 1.494 eВ і 1.479 eВ в  $\delta_1\delta_1$ -структурі падає в 2-8 разів в порівнянні з нелегованими GaAs. Тут необхідно відзначити, що практично у всіх  $\delta$ -легованих зразках, товщина верхнього шару GaAs над  $\delta$ -шарами в декілька разів перевищує глибину проникнення випромінювання, як He-Ne, так і Ar-лазерів. Таким чином, при дослідженні  $\delta$ -легованих структур методами ФЛ і КРС, нами фактично досліджені тільки властивості приповерхневого шару GaAs товщиною яка не перевищує 500 Å. Враховуючи все це, можна відзначити, що концентрація домішок і дефектів у верхньому шарі GaAs зменшується. З цього випливає, що  $\delta$ -шар Si є гетером домішок і дефектів із матриці GaAs.

Наші дослідження показали, що на якість GaAs істотний вплив здійснює величина відстані між  $\delta$ -шарами. Було встановлено, що зразки з  $d=300+600$  Å мають більш досконалу структуру вивчаємої півки GaAs. Ці результати добре угоджуються з результатами досліджень цієї ж групи зразків методом КРС. Для зразків з  $d\approx 60$  нм здвиг лінії LO-фонона, а також його півширина мінімальні. Крім того, дослідження ППВВ, ВІМС, а також виміри Холла теж підтвердили результати ФЛ і КРС. Тобто, це говорить про те, що існує оптимальна відстань між  $\delta$ -шарами при якій система  $\delta$ -шарів найкращим чином працює як гетер домішок і дефектів із GaAs.

Крім того, нашими дослідженнями було встановлена закономірність в погіршенні роботи  $\delta$ -шарами як гетера при перебільшенні концентрації ( $N_{\delta_1}$ ) в  $\delta$ -шарі  $5 \times 10^{12}$  см $^{-2}$ . На спектрах ФЛ це відобразилось в підвищенні інтенсивності і розширенні домішкових ліній, а також у гіршому розділенні екситонних ліній.

Аналогічна поведінка цих ліній на спектрах ФЛ для зразків при зменшенні тиску парів мий'яку в процесі росту  $\delta_1\delta_1$ -структур. Такі зміни на спектрах ФЛ явно вказують на погіршення властивостей гетера у  $\delta$ -шарах і ямовірно зумовлені декількома причинами: це зростання числа  $V_{As}$ , утворення центрів кремнію, який займає місце галію. Взагалі, властивості атома Si на місці галію в ґратці GaAs як гетера відомо давно і механізм даного ефекту зрозумілий. Він зумовлений кулоновською взаємодією акцепторних центрів

в донорними центрами Si і полем механічних напруг, які виникають внаслідок заміщення атома Ga атомом Si, який має розміри і масу набагато меншу ніж розміри і маса Ga.

Проте, у даному разі, ми бачимо ефект гетерування не окремо взятого атому Si, а внаслідок колективного вкладу атомів Si, вібраних в одному тонкому шарі, або, взагалі, системи  $\delta$ -шарів. Прямим доказом цьому служить наявність оптимальної величини відстані між  $\delta$ -шарами, при якому система  $\delta$ -шарів найкращим чином працює, як гетер домішок і дефектів із GaAs.

Третій розділ даної роботи присвячено дослідженню гетероепітаксіального GaAs, вирощеного на Si підкладках, які мають орієнтацію (100), (211) і (111). Як вже говорилося раніше, по ряду причин на кордоні розділу плівки - підкладки виникає значна напруга. Величина і знак механічної напруги визначались по формулам, отриманими Полоком, Гівіні і Кардоной. Енергетичний проміжок між зоною провідності і валентними зонами тяжких ( $\Delta E_{vh}$ ) і легких дирок ( $\Delta E_{lh}$ ) (100) в  $\Gamma$  точці для орієнтації (100):

$$\Delta(E_c - E_{lh}) = [2a(S_{xx} + 2S_{zz}) - b(S_{xx} - S_{zz})] X; \quad (1)$$

$$\Delta(E_c - E_{vh}) = [2a(S_{xx} + 2S_{zz}) + b(S_{xx} - S_{zz})] X; \quad (2)$$

$S_{ij}$ -пружні постійні (податливості), X - біаксіальна напруга. Значення  $S_{xx}$  і  $S_{zz}$  для GaAs -  $1.17 \times 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup> і  $-0.37 \times 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>, відповідно.

Аналогічні вирази для біаксіальної напруги в площині (111):

$$\Delta(E_c - E_{lh}) = [2a(S_{xx} + 2S_{zz}) - 1/2 \sqrt{3} d S_{xx}] X; \quad (3)$$

$$\Delta(E_c - E_{vh}) = [2a(S_{xx} + 2S_{zz}) + 1/2 \sqrt{3} d S_{xx}] X; \quad (4)$$

де  $S_{xx}$  - податливість і d - деформаційний потенціал для тригональної деформації. Значення  $S_{xx}$  і d для GaAs рівні  $18.6 \times 10^{-4}$  кбар<sup>-1</sup> і -4.55 еВ, відповідно.

Аналіз спектрів ФЛ плівок GaAs різноманітної товщини, вирощених на Si підкладках показав, що спектр ФЛ плівки з товщиною 0.7 мкм складається практично із однієї широкої смуги  $h\nu = 1.3 + 1.5$  еВ, зумовленою наявністю складних і розупорядкованих структурних порушень (дислокація, дефектів). Спектр ФЛ більш товстих плівок GaAs ( $d > 1$  мкм) складається із лінії, обумовленої випромінювальною рекомбінацією через власні структурні дефекти, які включають вакансії миш'яку ( $V_{As}$ ) ( $h\nu = 1.42$  еВ) і ліній, пов'язаних з до-

мішковими центрами Ge, Si і С. Притому, чим більша товщина GaAs, тим менша півширина лінії ФЛ і менше інтенсивність лінії  $h\nu=1.42$  еВ, при загальному збільшенні інтегральної інтенсивності ФЛ всього спектру.

Як відомо з літературних даних, лінія  $h\nu=1.42$  еВ, зумовлена випромінювальною рекомбінацією через власні структурні дефекти, які включають миш'як ( $V_{As}$ ), і в ненапруженому GaAs має енергію максимуму 1.44 еВ. На основі цього можна заключити, що в плівках GaAs розподіл концентрації дефектів по товщині неоднорідний. У кордонів GaAs/Si концентрація їх максимальна, а у поверхні плівки - мінімальна. Крім того, при дослідженні GaAs/Si була знайдена кореляція між концентрацією дислокаційних дефектів, відповідних за лінію 1.42 еВ, і механічних напруг в плівці. Залежність інтенсивності полоси  $h\nu=1.42$  еВ від величини механічної напруги  $X$  для зразків з орієнтацією Si-підкладки (100) показує, що збільшення напруги в 1.5 рази призводить до росту її інтенсивності майже в 10 разів.

Також при дослідженні GaAs на Si з орієнтацією (100) була знайдена залежність величини електрон-фононої взаємодії ( $\bar{N}$ ) від величини механічних напруг  $X$ , які розтягують кристалічну ґратку плівки. Знайдена залежність  $\bar{N}(X)$ , тобто падіння  $\bar{N}$ , від  $X$  показує погіршення структури плівки GaAs із збільшенням механічних напруг. Така поведінка  $\bar{N}$ , мабуть, пов'язана із зменшенням імовірності взаємодії носія з ґраткою в розтягнутому кристалі.

З метою зменшення розгоудження ґраток GaAs і Si була проведена імплантація Si-підкладки. Так як постійна ґратки GaAs більша постійної ґратки кремнію, припускалось, що імплантація підкладки іонами  $C^+$ , яка призводить до збільшення міжатомарної відстані Si, забезпечить зменшення механічних напруг в МПЕ - плівці. Дійсно, дослідження спектрів ФЛ підтверджують таке припущення. Це видно по здвигу в короткохвильовій області лінії ФЛ. Однак, для покращення структури плівки що росте, цього виявилось недостить, і тому було додатково проведено відпал імплантованих підкладок, що привело до значного покращення структури МПЕ-GaAs. Оптимальна доза імплантації, одержана на основі наших досліджень, складала  $\Phi = 2.48 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , а температура відпалу 850°C.

Четвертий розділ присвячено дослідженню властивостей ФЛ смуги

в GaAs, яка лежить в області  $h\nu=1.525 + 1.577$  еВ, названої смугою N. Відсутність у літературі відомостей про смугу з  $E_{\max}=1.551$  еВ, визначило необхідність проведення всебічних досліджень її властивостей, таких як вплив температури, інтенсивності збуджуючого випромінювання і т.п. на поведінку цієї смуги.

Аналіз ФЛ спектрів показав, що смуга  $h\nu=1.525+1.577$  еВ, складається з трьох погано розділених ліній. Перша лінія має  $E_{\max}=1.534$  еВ, друга -  $E_{\max}=1.551$  еВ і третя  $E_{\max}=1.567$  еВ. Лінія  $E_{\max}=1.551$  еВ найбільш інтенсивна, вона присутня на всіх спектрах ФЛ зразків GaAs, в яких спостерігалась "закраєва" смуга. Рідше всього вдавалось спостерігати лінію  $E_{\max}=1.567$  еВ, вона присутня на спектрах ФЛ всього декількох зразків.

Систематизація результатів, які стосуються "закраєвої" смуги, дозволила виділити дві групи зразків. Перша - це зразки МПЕ-GaAs, вирощеного на GaAs з орієнтацією (100), на спектрах яких дана смуга виглядає у виді широкого плато, є основною групою зразків, про які піде мова у даній роботі.

Друга група зразків - це МПЕ-плівки GaAs, що піддаються сильній напрузі на розтяг, вирощені на Si-підкладці з орієнтацією (111).

Результати досліджень показали, що інтенсивність полоси 1.551 еВ пов'язана з особливостями всього іншого спектру ФЛ. Виявилось, що інтенсивність ФЛ "закраєвої" полоси падає від спектру до спектру - при зменшенні числа екситонних ліній, зникнення лінії вільного екситону і падінні інтегральної інтенсивності спектру ФЛ. Імовірно це пов'язано з тим, що переходи, які зумовлюють виникнення полоси, сильно відчутливі до структурної недосконалості МПЕ-плівки GaAs. На користь цього свідчить і той факт, що легування GaAs призводить до появи "закраєвої" смуги.

Відразу хочеться звернути увагу на деякі особливості даної смуги. На величину її інтенсивності і її півширини. Інтенсивність смуги  $1.525+1.577$  еВ менше екситонної ФЛ тільки в 5+100 разів, а для другої групи зразків (GaAs/Si) у ряді випадків навіть більше. Таким чином, механізми, які пояснюють гарячу люмінесценцію і переходи з  $\Gamma_{sc}$  на  $\Gamma_{7v}$ , з  $L_{sc}$  на  $\Gamma_{8v}$ , з  $X_{sc}$  на  $\Gamma_{8v}$ , з  $L_{sc}$  на  $\Gamma_{7v}$  не приемливі. У цих двох випадках інтенсивність смуги ФЛ  $E_g+\Delta$  на 6+8 порядків менше, ніж "краєвої" ФЛ. Що стосується

внутрішньої люмінесценції як механізму, здібного пояснити природу переходу даної "закраєвої" смуги, то його теж можна виключити. У даному разі ширина смуги 1.551 еВ біля 50 меВ. І навіть, якщо прийняти до уваги, що вона складається із декількох ліній ФЛ, кожна з яких має ширину  $\approx 20$  меВ, то і це достатньо велика величина навіть для смуг рекомбінаційної люмінесценції, не говорячи вже про лінії внутрішньоцентрової люмінесценції півширина яких порядку декількох меВ.

Дослідження температурного гасіння люмінесценції "закраєвої" смуги дозволило визначити її термічну енергію активації. Вона має два значення і дорівнює  $\Delta E_1 = 28.27$  меВ і  $\Delta E_2 = 9.43$  меВ. Значення  $\Delta E_1 = 28.27$  меВ, відповідає звичайній величині енергії іонізації акцептора і можна допустити, що обговорюваний перехід, відповідаючи за смугу 1.551 еВ, проходить з участю акцептора.

Незначна величина зсуву Франка-Кондона  $\sigma E_{FC} = \Delta E_0 - \Delta E_1 \approx 1.7$  меВ, а також стабільне положення максимуму смуги в процесі температурного гасіння свідчить про незначну електрон-фононну взаємодію для розглядуваного центру випромінювання.

Із аналізу спектра збудження МПЕ-GaAs видно, що для смуги N має місце падіння інтенсивності поблизу збуджуваної лінії ФЛ, тобто відсутнє резонансне збудження. Це свідчить про те, що виникнення смуги пов'язане з непрямим переходом. Таким чином, випромінювальний перехід, відповідальний за смугу 1.551 еВ, не є прямим переходом. Цей факт і результати температурних досліджень, мабуть, можуть бути пояснені участю акцепторного рівня в реалізації даного переходу.

Обробка зразка GaAs в хімічних травниках показала, що інтенсивність цієї смуги ФЛ монотонно падала до значення 0.41 при травленні GaAs до 800 А і при дальшому травленні вже практично не змінювалась. З цього можна заключити, що "закраєва" смуга не пов'язана з станом, виникаючим на поверхні МПЕ-плівки у процесі її росту. Це підтверджують також дані залежності смуги ФЛ для структури GaAs-SiO<sub>2</sub>-Al від величин прикладеної напруги U. Так як зміна величини і знак об'ємного заряду, виникаючий на кордоні розділу SiO<sub>2</sub>-GaAs при прикладенні напруги слабо впливає на поведінку смуги 1.551 еВ. Таким чином, ми не можемо пояснити таке "дивне" її енергетичне положення і за допомогою розширення

вабореної зони біля поверхні зразка.

Дослідження впливу механічних напруг на поверхні смуги 1.551 еВ показало, що енергетичне положення максимума "закраєвої" смуги, на відміну від усіх інших ліній спектру ФЛ не мінялось із зміною величини  $E_g$ . Ці результати добре корелюють з поведінкою ліній 1.530 та 1.551 еВ в GaAs/Si. На основі цього можна допустити, що рівні або частина рівней, відповідальних за випромінювальні переходи, результатом яких є дана "закраєва" смуга, слабо пов'язані з основними мінімумами  $E_c$  і  $E_v$ , і можливо пов'язані з L-долиною або з X-долиною  $E_c$ .

Останнім часом отримана велика кількість експериментальних даних, які стосуються DX-центрів, також слабо пов'язаних з основним мінімумом  $E_c$  і пов'язаних з L-долиною  $E_c$ . Ряд авторів, досліджуючи зміни величини  $E_g$  і  $E_{DX}$  від компонентного складу матеріала  $Al_xGa_{1-x}As$ , отримали значення енергії рівня DX-центру для різноманітних  $x$  і для  $x=0$ . Згідно Муні і Ненігу, при  $T=4$  К положення рівня DX-центру в GaAs лежить в області 1.55+1.57 еВ, тобто вище дна зони провідності. Таке значення енергії рівня DX-центру прекрасно погоджується з енергією положення максимума смуги 1.551 еВ. Додатковим підтвердженням цього можуть служити дані розрахунків отримані Муном. У своїй роботі він трактує DX-центр, як тетраедричний  $Si_{As}$ , який має два рівня (+/-) і (+/0) з енергіями - 1.55 еВ і 1.57 еВ, відповідно. Ці значення дуже добре узгоджуються з енергетичним положенням ліній "закраєвого" - триплета.

Виходячи із вище приведених даних про DX-центри, імовірно, можна ототожнити рівень, який приймає участь в переходах для даної смуги 1.551 еВ, з рівнем DX-центру.

## ВИСНОВКИ

1. На основі досліджень  $\delta_1\delta_2$ -структур GaAs методами низькотемпературної фотолюмінесценції, комбінаційного розсіювання світла, вторинною іонною маспектроскопією встановлено, що  $\delta$ -шар здійснює істотний вплив на якість матриці МПЕ-плівки GaAs внаслідок яскраво вираженого ефекту гетерування. При цьому максимальний ефект гетерування досягає у випадку використання системи  $\delta$ -шарів за рахунок їх колективного внеску в гетерування. Встановлена оптимальна величина проміжку накопичення домішок і

дефектів у  $\delta$ -шарах призводить до зміни профіля квантової ями.

2. Встановлена оптимальна величина тиску парів миш'яку поблизу підкладки в процесі росту  $\delta_i\delta_i$ -структур, при яких співвідношення концентрації  $Si_{A_a}$  і  $Si_{G_a}$  центрів в одержаних структурах мінімальне. При такому співвідношенні, коли атоми Si заміщують в ґратці GaAs в основному тільки атоми Ga, і практично не заміщують атоми As,  $\delta$ -шари в  $\delta_i\delta_i$ -структурах виявляють максимальний гетероефект. Крім того, знайдено аналогічний ефект при управлінні концентрацією Si в  $\delta$ -шарах під час росту. При перевищенні оптимальної величини концентрації Si в  $\delta$ -шарі, кремній починає заміщувати в ґратці атоми As, що погіршує гетерування властивості  $\delta$ -шарів як гетера.

3. В результаті експериментальних досліджень характеристик ФЛ і КРС встановлено неоднорідний розподіл концентрації дефектів по товщині в МПЕ-плівках гетероепітаксціальних структур GaAs/Si, які мають орієнтації Si підкладок (100), (111) і (211). Воно зумовлене наявністю в МПЕ-плівках GaAs на Si-підкладках механічних напруг, які розтягують кристалічну ґратку півки. При цьому в області кордону GaAs/Si концентрація дефектів максимальна, а в приповерхневому шарі півки - мінімальна. Крім того, із досліджень поведінки ліній ФЛ 1.42 еВ і 1.388 еВ, обумовлених випромінювальною рекомбінацією через власні структурні дефекти, які включають вакансії миш'яку ( $V_{A_a}$ ), встановлена залежність інтенсивності лінії 1.42 еВ, а також ступінь електрон-фононної взаємодії від величини механічних напруг.

4. Знайдено покращення структури МПЕ-півки, отриманої за допомогою імплантації іонів  $C^+$  в Si-підкладці (111) з енергією 150 кеВ і дозою  $\Phi=2.48 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  з наступним відпалом при  $T=850^\circ\text{C}$  в порівнянні з півкою GaAs, вирощеною на Si (111) підкладці, яка не була піддана обробці. Це зумовлено зменшенням розугодження постійних кристалічних ґраток.

5. У спектрах люмінесценції МПЕ-півок GaAs, гетероепітаксціальних структур GaAs/Si (111) і  $\delta_i\delta_i$ -структур вперше знайдено випромінювання з енергією, яка перевищує  $E_g$  ( $h\nu = 1.525 + 1.577\text{eV}$ ). Встановлено, що ФЛ випромінювання  $1.525+1.577\text{eV}$ , являє собою трипліт погано розділених ліній. Температурні дослідження даної полоси дозволили визначити її термічну енергію активації ( $\delta E_i = 28.27 \text{ меВ}$  і  $\Delta E_i = 9.43 \text{ меВ}$ ) і в сукупності з дослідженням спектрів збуд-

ження дозволили допустити, що відповідна випромінювальна рекомбінація реалізується з участю акцепторних рівнів. Встановлено, що величина і знак напруги в МПЕ-SaAs не здійснюють якого-небудь істотного впливу на полосу  $N$ , це є слідством того, що рівні, які приймають участь в  $N$  переходах, слабо пов'язані з основним мінімумом зони провідності і максимумом валентної зони.

Проведено порівняння даних, відомих про смугу  $N$  і смугу, що зумовлена переходами з рівня DX-центру в AlGaAs. Висунуто допущення, яке ототожнює рівень, переходом з якого реалізується ФЛ випромінювання відповідне за  $N$  смугу, з рівнем DX-центру.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Бачериков Ю.Ю., Берча А.И., Демчина Л.А., Золотарев С.В., Корбутяк Д.В. "Низкотемпературные спектры фотолюминесценции кристаллов GaAs, CdTe при различных состояниях поверхности" Тез. док. IX Всесоюзного симпозиума "Электронные процессы на поверхности и в тонких слоях полупроводников" Новосибирск, 15-17.07.1988г. с.57.

2. Бачериков Ю.Ю., Берча А.И., Демчина Л.А., Корбутяк Д.В., Крюченко Ю.В., Лашкевич Е.Г., Трошенко А.В. "Влияние состояния поверхности полупроводников на их экситонные спектры". Тез. док. Всесоюзного совещания "Экситоны в полупроводниках-88" Вильнюс, 28-30.11.1988 г. с.16.

3. Бачериков Ю.Ю., Лашкевич Е.Г. "Люминесцентные исследования приповерхностных слоев GaAs, обработанных в атомарном водороде". Тез. док. Школы-семинара по химии поверхности дисперсных твердых тел, Славско, 6-9.03.1989 г. с.45.

4. Бачериков Ю.Ю., Венгер Е.Ф., Дмитрук Н.Л., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г., Лубышев Д.И., Мигаль В.П., Семягин О.В., Снитко О.В., Стенин С.И., Фидря Н.А. "Диагностика  $\delta$ -легированных слоев методами НПВО и фотолюминесценции". Тез. док. Всесоюз. конф. "Поверхность-89", Черногоровка, 4-06.07.1989 г. с.179.

5. Бачериков Ю.Ю., Венгер Е.Ф., Дмитрук Н.Л., Корбутяк Д.В., Лубышев Д.И., Мигаль В.П., Снитко О.В., Фидря Н.А. "Спектроскопия  $\delta$ -легированных слоев GaAs:Si". Писма в ЖТФ. - 1990 - т.16. - вып.9. - стр.27-31.

6. Бачериков Ю.Ю., Лашкевич Е.Г. "Низкотемпературные экситонные спектры фотолюминесценции МЛЭ-SaAs при различных

состояниях поверхности" Тез. док. Школы молодых ученых. Паланга, 18-25.05.1990 г, с.32.

7. Артамонов В.В., Бачериков Ю.Ю., Лашкевич Е.Г., Нечипорук Б.Д., Садофьев Ю.Г. "Механические напряжения в гетероэпитаксиальном GaAs, выращенном на Si-подложке", Физика и техника полупроводников. - 1991. - т.25. - вып.4. - с.670-676.

8. Yu.Yu. Bacherikov. "Photoluminescence Studies of Heteroepitaxial GaAs/Si", Phys. Stat. Sol. (a). - 1991. - Vol.126. - p.485-491.

9. Бачериков Ю.Ю. "Фотолюминесценция  $\delta$ -легированного GaAs", Физика полупроводников. Современные исследования. Сб. статей/Ин-т полупроводников, Киев, 1991. - стр. 52-55.

10. Yu.Yu. Bacherikov, "Photoluminescence of GaAs structures  $\delta$ -doped with Si", Phys. Stat. Sol. (a). - 1992. - Vol.131 - p.229-234.

11. Bacherikov Yu.Yu., Nechiporuk B.D., Rudko G.Yu., Kalinichenko Yu.V., Improvement of MBE-GaAs film structure due to the gettering by predeposited set of delta-doped layers", 1992 Fall Meeting Materials Research Society, Boston, Massachusetts, USA, 30 November - 4 Desember, 1992.

12. Artamonov V.V., Bacherikov Yu. Yu., Vovnenko V.I., Gnatyuk V.A., Kalinichenko Yu.V., Nechiporuk B.D., Sviridov P.V. "Effect of pulse laser annealing on surface of GaAs (111)", J. Electrochem. Soc., v. 139, №. 8, p. 510, 1992.



ЛНБ ім. В. Стефанива  
АН України



Подписано в печать 6.5.93г. формат 60x84/16  
Бумага писчая. Усл.печ.л.1,0.Тираж 100 экз. Заказ № 829

---

Отпечатано ЦУОП РНПН "Плодвинконсерв" г.Киев,Сахагаганского,1

11611005

Ab 27.407  
**Ab 27.407**