

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Мосюк Тетяни Іванівни
на тему «Особливості фізичних характеристик вихідних і опромінених
електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$ гомо- та гетероперехідних світлодіодів»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

1. Актуальність теми дослідження.

Дисертація Мосюк Т.І. присвячена дослідженню особливостей світлодіодних структур, вирощених на основі гомо- та гетеропереходів, котрі містять дефекти технологічного та радіаційного походження. Актуальність робіт вибраного напрямку – безсумнівна і підтверджується широтою застосування інжекційних випромінювачів у різноманітних галузях мікроелектронної техніки, оптоелектроніки, космічних засобів зв'язку, систем обробки інформації, енергетики та побуту. Дальший розвиток напівпровідникового приладобудування вимагає неперервного одержання нанонакопичення і узагальнення інформації про вплив дефектів на фізичні властивості приладів, одержаних на базі новітніх технологій.

Світлодіоди із квантовими ямами – сучасні джерела світла, серійне світове виробництво яких неперервно наростає, водночас число робіт, пов'язаних з дослідженнями їхніх основних експлуатаційних характеристик помітно відстає від обсягу випущеної продукції.

Ефекти впливу проникної радіації на досліджувані структури у літературі висвітлені також вкрай недостатньо; коли враховувати можливість їхнього застосування у космічних лініях зв'язку, на атомних станціях, прискорювачах заряджених часток та ін.

Відтак робота Мосюк Т.І. «Особливості фізичних характеристик вихідних і опромінених електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$ гомо- та гетероперехідних світлодіодів» де зроблено детальний аналіз одержаних

спектрів випромінювання світлодіодів із квантовими ямами, виявлено відхилення від класичних спектральних закономірностей (ефект квазібалістичного перенесення носіїв над квантовими ямами, ефект «голубого зсуву та ін.), а також досліджено наслідки введення радіаційних дефектів у світлодіодні гомоперехідні структури GaP, гетероперехідні InGaN наразі безперечно важлива і актуальна.

2. Структура дисертації, основні наукові результати, їх новизна, ступінь обґрунтованості та достовірності.

Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 102 сторінки. Робота містить 1 таблицю, 40 рисунків, які розміщені на 36 сторінках. До списку використаних джерел увійшло 129 найменувань.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова та практична цінність отриманих результатів.

Розділ 1 містить аналіз літературних джерел, близьких до теми дисертаційної роботи; результати огляду використані з метою тлумачення експериментальних даних, одержаних авторкою.

У розділі 2 описано методи вимірювання характеристик світлодіодів, способи приготування до опромінення, особливості конструкції спектрального комплексу.

У розділі 3 наведені результати вимірювання електрофізичних характеристик вихідних та опромінених зелених гомоперехідних (GaP) та гетероперехідних (InGaN/GaN) світлодіодів. У зелених діодах при $T < 90$ °K на вольт-амперних характеристиках виявлено існування ділянки від'ємного диференційного опору, існування якої, з погляду авторки, пов'язано з особливістю форми зонної структури кристала GaP. Відмічено також, що механізм пробою діодів при зворотному зміщенні лавинний.

Результати, приведені у розділі 3, одержані вперше.

1. Виявлено, що окрім основної лінії випромінювання ($\lambda_{\max}=505$ нм) у світлодіодах $\text{In}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$ при 77°K присутня додаткова смуга з $\lambda_{\max}=525$ нм, можливе походження якої пов'язується з квантуванням енергетичних рівнів квантових ям. В області температур, близьких до кімнатної, дублетна структура максимума рекомбінаційного свічення – наслідок формування фононного повторення основної лінії випромінювання.

У межах $I=1\div 20$ мА при 77°K у досліджуваних зразках виникає «голубий зсув» основної лінії на $\Delta\lambda=7.2$ нм, зумовлений квантуванням енергетичних станів нанорозмірної системи; різке падіння квантового виходу після $I=5$ мА – результат переповнення квантової ями та зростання ролі квазібалістичного перенесення нетермалізованих носіїв над ними.

Опромінення електронами з $E=2$ МеВ призводить до зменшення інтенсивності свічення СД та падіння їхньої ефективності внаслідок введення глибоких безвипромінювальних рівнів переважно у квантовій ямі; зростання диференціального опору та підвищення бар'єрного потенціалу відбувається у результаті зменшення концентрації носіїв у квантовій ямі.

Введення радіаційних дефектів у світлодіодах InGaN електронами і γ -квантами призводить до зменшення інтенсивності випромінювання і, відповідно, зменшення квантового виходу через появу глибоких безвипромінювальних рівнів. Встановлено, що ефективність дії γ -квантів Co^{60} ~у 1,5 рази вища, ніж γ -квантів Cs^{137} .

У розділі 4 описані результати досліджень вихідних і опромінених електронами ультрафіолетових світлодіодів InGaN/GaN .

Показано, що спектр випромінювання досліджуваних ультрафіолетових світлодіодів, вирощених на основі розчину InGaN .

Результати, наведені нижче, одержані вперше.

УФ – свічення зумовлене міжрівневими переходами в області КЯ; дві інші лінії – дефектного походження; Профіль їхньої високоенергетичної частини добре узгоджується з класичними розподілами Лоренца і Гауса. За нахилом високоенергетичного крила УФ – випромінювання зроблена оцінка

верхньої межі температури носіїв струму T_e у межах р - n -переходу. При номінальному робочому струмі $I=20$ мА вона становить приблизно 252°C ; її велике значення порівняно з кімнатною пов'язано з доланням бар'єрного поля першочергово високоенергетичними носіями.

Зменшення параметра E_0 моделі активної області гетероструктури при зростанні рівня інжекції зумовлене входженням квазірівня Фермі в область більшої щільності хвостів густини станів i , відповідно, зменшенням інтенсивності випромінювальної рекомбінації.

Розщеплення максимума УФ випромінювання при 77°K виникає як наслідок повторення основної лінії 370 нм за участю фонона з $E_f=80$ меВ; подібна особливість стосується також червоної смуги $E_f=38,2$ меВ та $41,9$ меВ.

Опромінення електронами з $E=2$ МеВ СД InGaN/GaN приводить до падіння інтенсивності всіх трьох ліній у результаті введення безвипромінювальних рівнів як у активні області InGaN, так і у бар'єри GaN. На фоні загального зменшення інтенсивності рекомбінації виникає додатковий максимум з $\lambda_{\text{max}}=420$ нм, спричинений присутністю у зразку дефектів радіаційного походження.

У розділі 5 містяться результати досліджень негативного опору світлодіодів GaAsP та їхніх спектральних характеристик. Виявлено, що у СД GaAsP у області низьких температур ($180\div 77^\circ\text{K}$) виникає ділянка ВДО, зумовлена існуванням внутрішнього позитивного зв'язку за струмом. До входження у стан ВДО і при $I\leq 0,1$ мА у вихідних та опромінених діодах переважає дифузійно-рекомбінаційний механізм протікання струму. Оцінка величини швидкості видалення носіїв, проведена за зміною струму, свідчить про підвищену радіаційну стійкість СД, вирощених на основі твердого розчину GaAsP.

Спектр випромінювання «помаранчевого» СД GaAsP має вигляд окремої спектральної лінії з $\lambda_{\text{max}}=636$ нм при 300°K і відповідає розподілу Гауса. Збільшення струму інжекції супроводжується розширенням ліній і зсувом максимуму у бік довгих хвиль, зумовленим нагріванням зразка

струмами, вищими номінального ($I_{\text{ном}}=20$ мА)

Опромінення діода приводить до зростання напівширини ліній, середньої температури носіїв струму та енергії Урбаха. Радіаційна деградація згаданих величин – наслідок часткового розупорядкування кристала.

Квантовий вихід η , основний технічний параметр СД, різко зменшується при початковій дозі опромінення ($\Phi \leq 5 \cdot 10^{14}$ см⁻²), після якої швидкість радіаційної деградації – сповільнюється.

Якщо падіння η зі зростанням рівня інжекції носіїв – очевидний наслідок теплової іонізації екситонів, зв'язаних на домішкових атомах азоту, то вирівнювання залежності $\eta(\Phi)$ при великих дозах – результат руйнування ізоелектронних центрів свічення N_p .

Висновки роботи, зроблені на основі на закономірностей, які керують роботою світлодіодів, цілком обґрунтовані.

Достовірність одержаних результатів і висновків, приведених у роботі Мосюк Т.І. забезпечується точністю використаних сучасних методик та рейтингом видань, де опубліковані праці авторки.

Практична цінність отриманих дисертанткою результатів полягає в наступному.

1. Результати впливу радіації на світлодіоди GaP, InGaN/GaN можуть бути використаними при прогнозуванні їхньої поведінки в умовах підвищеного радіаційного фону.

2. Виявлена область від'ємного диференціального опору у діодах GaAsP може бути використана для конструювання швидкісних перемикачів у низькотемпературних електронних блоках.

3. Дозна залежність квантового виходу світлодіодів GaAsP може бути використана для прогнозування їхньої радіаційної стійкості.

4. Залежність величини квантового виходу світлодіодів InGaN від струму може бути потрібною при розрахунку їхньої роботи в умовах змінних навантажень.

Апробація результатів та повнота викладення в опублікованих працях. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 3 наукові праці, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science; матеріали дисертації доповідалися авторкою на наступних наукових конференціях:

1. IV Міжнародної конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», 30 вересня 2022 року, м.Київ.

2. The III International Scientific and Practical Conference «Latest directions of modern science», January 23 – 25, 2023, Vancouver, Canada.

3. The 3th International scientific and practical conference “Theoretical aspects of education development», January 24 - 27, 2023, Warsaw, Poland.

4. 11th International Conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2023) 16-19 of August 2023, Bukovel, UKRAINE

5. XXX щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 25 - 29 вересня 2023 року, м.Київ.

6. XXXI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 27 - 31 травня 2024 року, м.Київ.

Всі основні результати дисертаційної роботи є **новими** та вчасно опублікованими у наукових виданнях.

3. Зауваження і побажання.

З мого погляду дисертація не позбавлена окремих незначних недоліків, які аж ніяк не знижують її загальну високу якість.

1. Бажано було б бачити серед великого різноманіття одержаних авторкою експериментальних даних величини напівширин спектральних ліній, які характеризують однорідність структури зразка.

2. Було б доречно також побудувати детальну дозну залежність величини квантового виходу світлодіодів InGaN, що важливо з погляду їхнього застосування в умовах високих доз електронного і радіаційного опромінення.

4. Загальний висновок.

Загалом, дисертаційна робота Мосюк Тетяни Іванівни на тему «Особливості фізичних характеристик вихідних і опромінених електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$ гомо- та гетероперехідних світлодіодів», свідчить про загальний високий рівень проведених досліджень.

Робота є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке характеризується новизною та обґрунтованістю наукових результатів, має теоретичне і практичне значення і відповідає вимогам встановленим Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а її автор Мосюк Тетяна Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія у галузі знань 10 - Природничі науки.

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри експериментальної
і теоретичної фізики та астрономії

Українського державного університету
імені Михайла Драгоманова



Н. Ю. Павлова

ав. канцелярією Українського державного
університету імені Михайла Драгоманова

06

20 24 р.