

ВІДГУК

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

1. Актуальність теми дослідження

Дисертація п. Мосюк Т. написана на основі матеріалів досліджень фізичних характеристик вихідних світлодіодів (СД) і гомо – та гетероперехідних структур, які містять радіаційні дефекти.

Об'єкти досліджень – джерела видимого свічення широко використовуються у мікроелектроніці, оптоелектронній техніці, волоконних лініях зв'язку, системах зберігання, обробки та передавання інформаційних потоків, промисловості і побуту, а також біології та медицині. Одержання якнайповнішої інформації про особливості їхніх характеристик, викликаних зміною умов експлуатації, чи довілля наразі необхідні і важливі з погляду проектування новітніх систем відслідковування, попередження та захисту.

Значна кількість оптоелектронних модулів створених на основі СД GaAsP, InGaN може перебувати у полі дії проникного випромінювання і питання їхньої радіаційної стійкості постає особливо гостро якщо врахувати його малодослідженість.

Дисертаційна робота п. Мосюк Т. виконана на кафедрі експериментальної і теоретичної фізики та астрономії Українського державного університету імені Михайла Драгоманова в рамках тематики науково-дослідницької роботи «Вплив радіаційних дефектів на ефективність світлодіодів із квантовими ямами».

Вона повністю відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія галузі знань 10 – Природничі науки.

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

Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійською мовами, списку публікацій здобувача, 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 переліку використаних джерел увійшло 129 найменувань, більшість з яких англомовні.

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

У розділі 1 міститься огляд наукових результатів, приведених у статтях їхніх авторів, сумісних за напрямком досліджень із темою дисертації п. Мосюк

Т.; коротко описано методи і моделі, які використовуються при дослідженні властивостей СД. Окремі з них використовуються для аналізу даних, одержаних дисертанткою.

У розділі 2 описано методи досліджень вихідних і опромінених зразків.

Після загального ознайомлення з експлуатаційними параметрами досліджуваних об'єктів авторка детально описує технологію опромінення електронами з $E=2$ MeV та γ – квантами Cs^{137} , Co^{60} ; приводиться також опис автоматизованої схеми вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) СД у межах $77\div 300$ °К.

Спектральні характеристики діодів вимірювались сучасним цифровим спектрометром Green-Wave компанії StellarNet Inc. (США), пристосованим до потреби вимірювання саме досліджуваних СД GaAsP, InGaN.

У розділі 3 показано, що окрім основної лінії випромінювання ($\lambda_{max}=505$ нм) у СД $In_{0.21}Ga_{0.79}N$ при $77^\circ K$ присутня додаткова смуга з $\lambda_{max}=525$ нм, можливе походження якої пов'язується з квантуванням енергетичних рівнів КЯ. В області температур, близьких до кімнатної, дублетна структура максимуму рекомбінаційного свічення – наслідок формування фононного повторення основної лінії випромінювання.

У межах $I=1\div 20$ mA при $77^\circ K$ 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 $I=5$ mA – результат переповнення КЯ та зростання ролі квазібалістичного перенесення нетермалізованих носіїв над ними. Опромінення електронами з $E=2$ MeV призводить до зменшення інтенсивності свічення СД та падіння їхньої ефективності внаслідок введення глибоких безвипромінювальних рівнів переважно у КЯ; зростання диференціального опору та підвищення бар'єрного потенціалу відбувається у результаті зменшення концентрації носіїв у КЯ. Введення радіаційних дефектів у СД 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} .

Розділ 4 присвячений дослідженню спектра випромінювання ультрафіолетових вихідних і опромінених з $E=2$ MeV СД (УФСД) $In_xGa_{1-x}N$ ($x=0,1$). Виявлено, що він складається з трьох ділянок $\lambda_{1max}=370$ нм, $\lambda_{2max}=550$ нм, $\lambda_{3max}=770$ нм; – перша з них, найінтенсивніша УФ – смуга, дві останні - жовта та червона майже на порядок слабкіші. УФ – свічення зумовлене міжрівневими переходами в області КЯ; дві інші лінії – дефектного походження; Профіль їхньої високоенергетичної частини добре узгоджуються з класичними розподілами Лоренца і Гауса. За нахилом високоенергетичного крила УФ – випромінювання зроблена оцінка верхньої межі температури носіїв струму T_e у межах p - 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 $E_{\text{ф}}=80$ меВ; подібна особливість стосується також червоної смуги $E_{\text{ф}}=38,2$ 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 описано виникнення та розвиток унікального низькотемпературного ефекту – області негативного диференціального опору СД GaAsP та результати спектральних досліджень СД InGaN.

Встановлено, що СД GaAsP демонструють підвищення радіаційної стійкості порівняно з СД GaP.

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 сформульованні виходячи з основних, одержаних авторкою результатів, -повністю обгрунтовані.

У додатку – перелік наукових праць авторки.

Наукові результати, одержані п. Мосюк Т. – достовірні, що підтверджується співпадінням загальноновстановлених закономірностей розглянутих ефектів і висновків, одержаних авторкою; високим рейтингом

наукових видань, де опубліковані результати роботи та застосуванням сучасних експериментальних методик.

Практична цінність

1. Використані методи опромінення електронами та γ – кантами Cs^{137} можуть бути застосовані іншими експериментаторами.
2. Дозні залежності кантового виходу та коефіцієнта пошкодження часу життя необхідні для проектування оптоелектронних модулів.
3. Результати досліджень зворотних струмів опромінених СД можуть бути корисними для розробників радіаційно стійких оптоелектронних схем.

До основних результатів слід віднести:

1. Виявлення «голубого зсуву» спектральних ліній СД InGaN при 77°K.
2. Різке падіння квантового виходу СД InGaN після $I=5$ мА – результат переповнення квантових ям носіями та наростання ролі їхнього квазібалістичного перенесення.
3. Встановлено, що профілі спектральних ліній СД GaAsP та СД InGaN при 77°K відповідають класичним розподілам Гауса-Лоренца.

Апробація та повнота викладення. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 11 наукових праць, серед яких: 3 статті у наукових фахових виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus та 8 праць – у матеріалах і тезах конференцій. Всі основні результати дисертаційної роботи нові і вчасно опублікованими у наукових виданнях.

Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні ідеї авторки. Використані в дисертації ідеї, гіпотези, дані чи інші матеріали других авторів мають посилання на першоджерело та використовуються у тексті для обґрунтування ідей дисертантки.

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові *положення, висновки та узагальнення ґрунтуються* на суттєвому обсязі експериментального матеріалу. Зроблені авторкою висновки цілком обґрунтовані та відповідають поставленій меті роботи та її змісту. Результати дисертаційної роботи відповідають змісту статей, що надруковані у фахових журналах.

3. Зауваження та побажання

1. У роботі виявлено ефект залежності енергії Урбаха від струму через СД і не говориться про причини її падіння.

2. У розділі 6 зроблено висновок про вищу радіаційну стійкість СД GaAsP порівняно з СД GaP і відсутнє обґрунтування поміченої різниці.

3. З рис. 4.1. видно, що зворотній струм різко зростає лише після відпалу при $T > 410$ °С, а V_p і V_{Ga} , які активні вже після 160-180 °С, могли б впливати на зворотні ВАХ. Рис. 4.1. свідчить про протилежне.

4. Загальний висновок:

Дисертаційна робота Мосюк Тетяни Іванівни «*Особливості фізичних характеристик вихідних і опромінених електронами з енергією $E = 2$ MeV гомо-*

та гетероперехідних світлодіодів» є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке за актуальністю теми, її новизною та обґрунтованістю наукових результатів, що мають теоретичне і практичне значення, відповідає вимогам до наукової кваліфікації ступеня доктора філософії, що встановленні «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року, а здобувачка Мосюк Тетяна Іванівна *заслуговує* присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук,
професор, головний науковий співробітник
Інституту фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України



Корбутяк Д.В.

