

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора
завідувача кафедри систем інформаційного та кібернетичного захисту
Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Туровського Олександра Леонідовича

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 за спеціальністю
104 Фізика та астрономія з галузі знань 10 Природничі науки

Актуальність обраної проблематики виконаної роботи та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сучасні інформаційні системи відіграють фундаментальну роль в розвитку суспільних комунікацій, забезпечують розвиток абсолютно всіх напрямків діяльності. Елементна база таких систем розбудовується з широким використанням напівпровідникової оптоелектронної техніки, в якій провідна роль належить світлодіодним джерелам світла. Світлодіоди є складовими різних систем перетворення, зчитування та передавання інформації, формування банку даних, є ключовими елементами функціонування оптоелектронних пар, засобів візуалізації інформації та інших пристроїв. Якість світлодіодів у першу чергу залежить від стабільності їхніх параметрів, стійкості до змін умов застосування і, особливо, до впливу зовнішніх факторів, таких як, наприклад, радіаційне опромінення.

Вивчення впливу радіації на параметри світлодіодів сприяє поглибленню розуміння властивостей дефектів структури, що важливо з погляду розробки методів підвищення ефективності та радіаційної стійкості, вдосконаленні технологій створення і експлуатації оптоелектронної техніки.

Тому актуальність дисертаційної роботи Мосюк Т.І., яка присвячена дослідженню електрофізичних та оптичних характеристик вихідних та опромінених електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$ гомоперехідних GaP, GaAsP, світлодіодів і гетероперехідних світлодіодів InGaN з квантовими ямами є незаперечною, в зв'язку з інтенсивним розвитком серійного світового виробництва цих високоефективних джерел світла.

Дисертаційна робота виконувалася в рамках тематики науково-дослідницьких робіт кафедри експериментальної і теоретичної фізики та астрономії Українського державного університету імені Михайла Драгоманова: «Вплив радіаційних дефектів на ефективність світлодіодів із квантовими ямами» та тематики наукових досліджень відділу радіаційної

фізики Інституту ядерних досліджень НАН України - «Фізичні властивості багатодолинних напівпровідників і світлодіодів у радіаційних, теплових та деформаційних полях».

Структура і зміст дисертації, ступінь обґрунтованості та достовірності. Дисертаційна робота складається з анотації 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 актуальність вибору теми дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовані мета роботи та завдання дослідження, показана наукова та практична цінність отриманих результатів, подано інформацію про апробацію матеріалів дисертації.

Розділ 1 присвячений аналізу досліджень різних авторів, близьких до теми дисертаційної роботи, проаналізовано вплив квантових ям на випромінювальну рекомбінацію у вихідних та опромінених світлодіодів з гомо- і гетеропереходами.

У розділі 2 описано об'єкти досліджень, експериментальні методики та дослідні установки, умови радіаційного опромінення.

У розділі 3 розглянуті результати досліджень електрофізичних характеристик вихідних світлодіодів GaP, InGaP/GaN, а також опромінених електронами з $E=2$ MeV, γ -квантами Co^{60} і Cs^{137} . Встановлено, що ефективність дії γ -квантів Co^{60} у 1,5 рази вища, ніж γ квантів Cs^{137} . Досліджено роль квантових ям у зміні ефективності випромінювання опромінених InGaP/GaN світлодіодів.

У розділі 4 дисертаційної роботи досліджено вихідні і опромінені електронами з $E=2$ MeV ультрафіолетові світлодіоди InGaP/GaN. Показано, що спектр випромінювання досліджуваних ультрафіолетових світлодіодів, вирощених на основі розчину InGaP, суттєво змінюється у результаті введення безвипромінювальних рівнів як у активні області InGaP, так і у бар'єри GaP. На фоні загального зменшення інтенсивності рекомбінації виникає додатковий максимум з $\lambda_{max}=420$ нм, спричинений присутністю у зразку дефектів радіаційного походження.

У розділі 5 розширено і уточнено уявлення про природу дефектів радіаційного походження, які виникають у світлодіодних структурах GaAsP при електронному ($E = 2$ MeV) опроміненні.

Висновки за результатами виконання дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень, відповідають змісту і поставленій меті роботи.

Перелік використаних джерел свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати наукових досліджень.

Таким чином, проведений аналіз змісту дисертаційного дослідження, а також публікацій Мосюк Т.І. є підставою для висновку про наукову обґрунтованість та достовірність викладених результатів.

Основні наукові результати, одержані автором, їхня новизна та практичне значення. Проведені автором дисертації дослідження електрофізичних та оптичних характеристик вихідних та опромінених електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$, гомоперехідних GaP, GaAsP, світлодіодів і гетероперехідних світлодіодів InGaN з квантовими ямами дозволили отримати важливі наукові результати:

вперше:

- виявлено «голубий зсув» основної лінії $\lambda_{\text{max}}=505 \text{ nm}$ у світлодіодах $\text{In}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{N}$ при $T=77 \text{ }^\circ\text{K}$ на величину $\Delta\lambda = 7,2 \text{ nm}$, зумовлений квантуванням енергетичних станів квантової ями;

- встановлено, що різке падіння квантового виходу світлодіодів InGaN після $I = 5 \text{ mA}$ виникає внаслідок переповнення квантових ям носіями струму і зростання ролі квазібалістичного перенесення нетермалізованих носіїв над квантовими ямами;

- виявлена додаткова лінія з $\lambda_{\text{max}}=420 \text{ nm}$ в спектрі світлодіода InGaN при $T=77 \text{ }^\circ\text{K}$, що виникає після опромінення електронами з $E=2 \text{ MeV}$ ($\Phi = 5,74 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) внаслідок введення в УФ світлодіодів дефектів радіаційного походження;

- визначена температура носіїв струму T_e в області p-n-переходу світлодіодів InGaN, яке при $I=20 \text{ mA}$ становить $T_e=252 \text{ }^\circ\text{C}$. Велике значення T_e порівняно з кімнатною пов'язане з першчерговим доланням бар'єрного поля високоенергетичними носіями.

уточнено:

- спектральну структуру випромінювання УФ світлодіодів InGaN/GaN, яка при $T=300 \text{ }^\circ\text{K}$ характеризується наявністю трьох ліній випромінювання $\lambda_{1\text{max}}=370 \text{ nm}$, $\lambda_{2\text{max}}=550 \text{ nm}$, $\lambda_{3\text{max}}=770 \text{ nm}$. Перша з них - основна, узгоджується з класичними розподілами Лоренца та Гауса, зумовлена переходами в межах квантових ям. Дві інші – дефектного походження;

- спектральний розподіл зменшення інтенсивності випромінювання УФ світлодіодів InGaN/GaN, який виникає у результаті введення електронами з $E=2 \text{ MeV}$ безвипромінювальних рівнів у активні області InGaN та бар'єри GaN.

подальшого розвитку набули:

- методи дослідження спектральних характеристик гомоперехідних GaP, GaAsP та гетероперехідних світлодіодів InGaN з квантовими ямами, зокрема вдосконаленню методу опорних світлодіодів з використанням цифрового спектрометра Green-Wave (350-1150 нм) компанії StellarNet (USA) з оптоволоконними насадками регулювання світлового потоку для підвищення чутливості та точності випромінювання;

- підходи та методи радіаційної обробки промислових світлодіодів для контрольованого формування дефектної структури з метою дослідження селективного впливу радіаційних порушень на електролюмінесценті та електрофізичні характеристики світлодіодів з квантовими ямами.

Практичне значення одержаних в дисертації результатів має беззаперечний прикладний характер, зокрема:

1. Залежності інтенсивності свічення світлодіодів від струму та температури можуть бути використані розробниками оптоелектронних приладів.

2. Залежності величини квантового виходу світлодіодів від струму можуть бути корисними виробникам опто-електронних модулів.

3. Результатами досліджень термічної стабільності світлодіодів GaP можна скористатись для визначення області їхніх робочих температур.

4. Конструкторам, які використовують світлодіоди InGaN для створення оптоелектронних блоків, необхідно враховувати існування «голубого зсуву» досліджуваних діодів.

5. Дозними залежностями електрофізичних величин світлодіодів GaAsP можна скористатись при розрахунку режиму їхньої роботи в умовах підвищення рівнів радіаційного впливу.

Апробація результатів та повнота викладення в опублікованих працях. Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи пройшли апробацію під час міжнародних наукових конференцій та знайшли відображення в публікаціях у фахових виданнях. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 3 статті у наукових фахових виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus:

1. **Мосюк Т.І.,** Вернидуб Р.М., Литовченко П.Г., Мирошніченко Ю.Б., Стратілат Д.П., Тартачник В.П., Шлапацька В.В. Influence of electron irradiation with $E = 2$ MeV on electrophysical and optical characteristics of green InGaN/GaN LEDs Nuclear Physics and Atomic Energy, vol. 24, issue 1, pp. 27-33 <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.01.027>

2. **Мосюк Т.І.,** Вернидуб Р.М., Литовченко П.Г., Пінковська М.Б., Стратілат Д.П., Тартачник В.П. Негативний диференціальний опір і спектральні характеристики світлодіодів, вирощених на основі твердого

розчину GaAs_{1-x}P_x Nuclear Physics and Atomic Energy, 2024, 25(2), с. 125-133
<https://doi.org/10.15407/jnpae2024.02.125>

Вернидуб Р.М., Мосюк Т.І., Петренко І.В., Радкевич О.І., Стратілат Д.П., Тартачник В.П. Особливості спектрів випромінювання вихідних та опромінених електронами УФ СД InGaN Interdisciplinary Studies of Complex Systems No. 23 (2023) 57–69 <https://doi.org/10.31392/iscs.2023.23.057>.

Крім того, результати дослідження доповідалися авторкою на 8 наукових конференціях і знайшли відображення у матеріалах і тезах цих конференцій:

1. IV Міжнародна конференція «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 дисертаційного дослідження є новими та вчасно опублікованими у наукових виданнях.

Дотримання академічної доброчесності. За результатами аналізу змісту дисертаційної роботи та публікацій автора випадків порушення академічної доброчесності не виявлено.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації. Загалом позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих здобувачкою результатів, вважаємо за доцільне висловити певні зауваження та рекомендації:

1. При розгляді умов радіаційної обробки світлодіодів в другому розділі дисертаційної роботи, на нашу думку, заслуговують на більшу увагу опис технологічних умов проведення опромінювання γ – квантами Cs¹³⁷, Co⁶⁰ та загальні характеристики механізмів радіаційної деградації кристалічних структур, що надалі розширює можливості аналізу результатів проведених досліджень.

2. Значна частина експериментальних досліджень проводилася на оригінальному обладнанні, зокрема, дослідження особливостей оптичних характеристик вихідних і опромінених світлодіодів проводилася з

використанням сучасного цифровим спектрометром Green-Wave. На наш погляд, варто було деталізувати методику експеримента та опис технічних удосконалень фізичної установки, що дозволяли проводити низькотемпературні і високоселективні вимірювання та підвищувати точність вимірювань.

3. При розгляді, важливого з точки зору використання в умовах підвищених рівнів радіаційної небезпеки, питання радіаційного впливу в п'ятому розділі дисертаційної роботи стверджується теза про підвищену радіаційну стійкість СД, вирощених на основі твердого розчину GaAsP. На нашу думку, викладена у висновках аргументація має бути підсилена літературними джерелами.

4. Виявлено також певні стилістичні та орфографічні огріхи, які не впливають на загальний високий рівень отриманих наукових результатів.

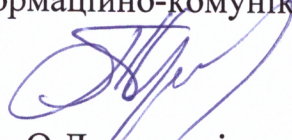
Загальний висновок. Дисертаційна робота, виконана Мосюк Тетяною Іванівною на тему «Особливості фізичних характеристик вихідних і опромінених електронами з енергією $E = 2 \text{ MeV}$ гомо- та гетероперехідних світлодіодів», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія у галузі знань 10 Природничі науки є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке відзначається новизною та обґрунтованістю наукових результатів, що мають теоретичне і практичне значення, відповідає вимогам Порядку 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 здобувачка Мосюк Тетяна Іванівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія у галузі знань 10 Природничі науки.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук, професор

завідувач кафедри систем інформаційного та кібернетичного захисту

Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій



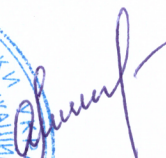
Олександр ТУРОВСЬКИЙ

Підпис професора Туровського О.Л. з а с в і д ч у ю:

Учений секретар

Державного університету

інформаційно-комунікаційних технологій



Галина ЄНЧЕВА

«16» серпня 2024 р.