



ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу

Малого Євгена Вікторовича

«Властивості дефектів структури у фосфіді галію та їхній вплив на параметри світлодіодів»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота Малого Є.В. присвячена вивченню властивостей вихідних світлодіодів GaP та дослідженню впливу простих і складних дефектів на випромінювальну здатність, електрофізичні властивості та оптичні характеристики вихідних червоних і зелених світлодіодів GaP та GaAs_{1-x}P_x, опромінених частинками різних видів, а також впливу ультразвукової обробки на випромінювальну здатність.

Актуальність роботи

На даний час відбувається інтенсивний розвиток епітаксійних технологій, які використовуються у приладобудуванні, завдяки чому спостерігається швидке налагодження промислового виробництва високоефективних джерел світла – фосфідо-галієвих світлодіодів. Варто відзначити, що максимум випромінювання світлодіодів GaP, легованих азотом, співпадає з областю найвищої чутливості людського ока, що дозволяє застосовувати їх для конструювання світлових екранів, цифрових показників, індикаторів, лічильників ядерних частинок тощо.

Потоки проникної радіації – зручний інструмент для контрольованого введення у зразок дефектів структури різних видів і потрібної концентрації. Їхнє використання може бути засобом моделювання пошкоджень як у вихідних монокристалах, так і у приладах, створених на їхній основі. Вузькоспрямовані пучки прискорених квазічастинок потрібних енергій та

видів можуть використовуватись з метою формування на поверхні зразка і в об'ємі квантових ям і квантових точок наноструктур різного профілю.

Найповнішу інформацію про властивості дефектів можна одержати шляхом моделювання окремих їхніх видів, застосовуючи пучки проникного випромінювання з цілком певними характеристиками. Це дає змогу вводити у кристал цілком визначений тип дефектів. **Актуальність** таких досліджень полягає у визначенні і підвищенні радіаційної стійкості світлодіодних структур, оскільки їх використовують у керуючих, регулюючих, сигнальних пристроях на АЕС та космічних апаратах. Досліджувані діоди можна використати у вигляді модельних об'єктів для вивчення радіаційної стійкості твердотільних випромінювачів.

Світлодіодні джерела відіграють основну роль у переході з витратних до енергоощадних технологій. Заміна нагрівних джерел світла світлодіодними панелями вимагає якісних, надійних, стабільних і яскравих світлодіодів різного кольору свічення з великим експлуатаційним ресурсом. З їхньою допомогою можна практично неперервно перекрити весь діапазон видимого випромінювання.

Діоди, одержані на основі твердих розчинів GaAs-GaP, порівняно з бінарними GaP, знайшли широке застосування завдяки можливості плавної зміни ширини забороненої зони шляхом коригування складу області випромінювання, а також положення спектрального максимуму свічення. Порівняно з усіма іншими джерелами попередніх поколінь, світлодіодам GaP та GaAs_{1-x}P_x властиві такі переваги: низька енергоємність, мініатюрність, швидкодія, великий експлуатаційний ресурс, надійність, низька вартість.

Виходячи з **актуальності** тематики дослідження дисертантом було сформульовано мету, яка полягає у вивченні механізмів впливу електронів, нейтронів та УЗ-хвиль на електролюмінесценцію і вольт-амперні характеристики світлодіодів GaP і GaAs_{1-x}P_x.

Про **актуальність** тематики дисертаційного дослідження свідчить її зв'язок з державними науковими програмами:

- «Дослідження гетерних властивостей радіаційних дефектів у напівпровідниках» (№ держ. реєстрації 0112U000896, 2012-2016 рр.)

- «Дефектоутворення та кінетичні ефекти в опромінених і термічно оброблених напівпровідниках та наноструктурах на їх основі» (№ держ. реєстрації 0112U005082, 2012-2016 рр.)

- «Дослідження змін фізичних властивостей напівпровідників та приладів на їх основі за різної комбінації зовнішніх впливів» (№ держ. реєстрації 0116U002919, 2017-2021 рр.)

- «Дефекти радіаційного і технологічного походження та їхній вплив на властивості напівпровідникових матеріалів і світлодіодних структур» (№ держ. реєстрації 0116U008468, 2017-2021 рр.)

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 183 найменувань. Робота викладена на 148 сторінках і містить 54 рисунки.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше показано, що максимум випромінювання $h\nu = 2,254$ еВ зеленого діода GaP (N), що виникає при $T = 77$ К, генетично пов'язаний із лінією екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту і є її фононним повторенням. Проведено ідентифікацію інших ліній випромінювання;

- вперше висловлюється припущення, що у формуванні додаткової смуги у спектрі червоних світлодіодів GaP можуть приймати участь донорно-акцепторні переходи між неконтрольованою домішкою – оловом та основною домішкою – цинком;

- вперше запропоновано модель формування S-подібної ділянки на ВАХ GaP-світлодіодів при низьких температурах;

- вперше виявлено «поліпшення» електричних характеристик світлодіодів GaP у межах доз опромінення електронами ($E = 2$ МеВ, $\Phi = 10^{14}$

- 10^{15} см^{-2}), яке появляється у вигляді зростання прямих струмів при малих напругах (U до 3 В) та зміщення пробійної гілки ВАХ в область більших напруг. Зростання величини пробійної напруги тлумачиться як результат зменшення рухливості носіїв струму в опромінених зразках. Опромінення електронами світлодіодних структур GaP призводить до зростання прямих струмів в області невеликих доз ($\Phi \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$) та малих прямих зміщень ($U \leq 2 \div 3 \text{ В}$), а в області зворотних струмів відбувається їхнє зменшення;

- вперше показано, що області розупорядкування, введені нейтронами, не можуть помітно впливати на величину тунельної складової прямого струму, збільшуючи густину дислокацій, оскільки радіаційні дефекти подібного виду здатні блокувати протікання струму вздовж тунельних шунтів;

- вперше виявлено, що ультразвукова обробка спричиняє виникнення низки деградаційно-відновлювальних процесів у світлодіодах $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, зумовлених захопленням носіїв струму дислокаціями. Часткове зростання інтенсивності свічення на початкових циклах УЗО пов'язується з поглинанням безвипромінювальних центрів рухомими дислокаціями, активованими УЗ-хвилею. Релаксаційне падіння яскравості діода зумовлене зміною зарядового стану дефектів, що входять до складу дефектів темних ліній та дефектів темних плям, і які слугують центрами безвипромінювальної рекомбінації.

Наукове та практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що одержані результати можуть бути використані при конструюванні радіаційно-стійких оптоелектронних модулів, прогнозуванні наслідків впливу потужних радіаційних полів на лінії зв'язку та на засоби керування – у військовій галузі.

У дисертації визначено коефіцієнти радіаційної стійкості світлодіодів із фосфіду галію під впливом електронного та нейтронного опромінення, які

можуть бути корисними при експлуатації в умовах йонізуючого випромінювання

На основі GaP можна синтезувати тверді розчини; результати виконаної роботи можуть бути корисними розробникам світлодіодів наступного покоління

Лінійна дозова залежність ($\Phi = 5 \cdot 10^{14}$ електронів/см², $E = 2$ MeV), дозволяє використовувати кристал фосфіду галію для контролю області пенумбри при опроміненні біологічних об'єктів з метою уникнення переопромінення здорових тканин

Завдяки ґрунтовну дослідженню спектрів електролюмінесценції отримано інформацію про механізми випромінювання і вплив неконтрольованих домішок на квантовий вихід діодів, що може бути корисним при розробці методів підвищення їхньої ефективності і рівня монохроматичності свічення.

Матеріали дисертації можуть бути використані для створення нового класу світлодіодів на основі фосфіду галію в інституті фізики НАН України, інституті фізики напівпровідників НАН України, Львівському НУ ім.І.Франка, Чернівецькому НУ ім.Ю. Федьковича, Дрогобицькому державному педагогічному університеті ім. І. Франка.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Достовірність отриманих результатів та зроблених висновків забезпечується використанням сучасних добре апробованих експериментальних методів, які доповнюються комп'ютерним моделюванням і розрахунками. Достовірність результатів забезпечується їх апробацією на багатьох наукових конференціях всеукраїнського і міжнародного рівня, публікаціями у фахових фізичних журналах, які входять до профільних міжнародних наукометричних баз даних.

Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату.

Не дивлячись на значний науковий доробок автора в напрямку дослідження механізмів впливу квазічастинок та ультразвукової хвилі на електролюмінесценцію та вольт-амперні характеристики світлодіодів GaP і GaAs_{1-x}P_x необхідно зробити наступні зауваження:

1) У роботі виявлено зміну спектрального розподілу свічення діода при його переході в область S-подібної характеристики (розділ 3, рис. 3.17). Однак вимірювання при нижчій температурі ($T = 4,2$ К) дозволили б одержати повнішу інформацію про механізм переходу у стан від'ємного диференційного опору.

2) Необхідно було б дещо скрупульозніше дослідити стадію відпалу свічення опроміненого діода ($T = 150 - 200$ °С) на ст. 98, рис. 4.7. Зважаючи на невисокі температури відпалу, її можна використати на практиці з метою відновлення інтенсивності свічення деградованих приладів, зумовлених радіацією.

3) У роботі в деяких місцях для позначення інтенсивності свічення вживається слово «яскравість», що є не зовсім доречним, а в розділі 5 для її позначення автор використовує « η » замість « I », як було в розділах 3 і 4

4) У тексті дисертації присутня деяка кількість калюк з російських текстів (напр. слово «оскільки» зустрічається близько десяти разів замість просто «бо» чи «позаяк»), канцеляризмів («подібним чином» замість «так само» ст. 104), збігів приголосних («в» замість «у», «ймовірність» замість «імовірність» повсюдно тощо.

Зазначені зауваження не є принциповими і не знижують наукову та практичну цінність результатів та висновків дисертаційної роботи.

Висновки про відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Малого Євгена Вікторовича є **завершеним науковим дослідженням**, яке підтверджує високу кваліфікацію дисертанта.

Висновки дисертаційної роботи **повністю відображають** основні положення, які виносяться на захист.

Вважаю, що дисертант виконав поставлені завдання у повній мірі. Робота має перспективу подальшого розвитку і розширення.

Основні результати дисертаційної роботи представлені у провідних фахових наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science) і збірниках матеріалів наукових конференцій. Автореферат і опубліковані роботи **повністю відображають** зміст дисертації.

Вважаю, що за актуальністю теми, обсягом, науковою новизною, практичною цінністю отриманих результатів і висновків дисертаційна робота Малого Євгена Вікторовича «Властивості дефектів структури у фосфіді галію та їхній вплив на параметри світлодіодів» задовольняє всім вимогам, які ставляться Вищою атестаційною комісією Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій, а її автор, Малий Євген Вікторович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри фізики
Дрогобицького державного
педагогічного університету
імені Івана Франка



Р.М. Пелещак

