

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту ядерних досліджень НАН України
член-кореспонденту НАН України,
доктору фізико-математичних наук, професору,
головному науковому співробітнику відділу
теоретичної фізики ІЯД НАН України
Сугакову Володимирі Йосиповичу

Відгук

офіційного опонента

доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувача кафедри загальної фізики фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ОЛІХА Олега Ярославовича

на дисертаційну роботу СТРАТІЛАТА Дмитра Петровича на тему:
«Вплив радіаційних дефектів на характеристики гомоперехідних світлодіодів
(GaP; GaAsP) та гетероперехідних (InGaN/GaN)»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань «10 природничі науки»
за спеціальністю «104 фізика та астрономія»

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи.

Актуальність теми дисертаційної роботи Стратілата Д.П. зумовлена декількома факторами. По-перше, необхідно звернути увагу на те, що об'єктом досліджень були світлодіодні структури. Завдяки високій енергоефективності, можливості тривалої експлуатації, яскравості та екологічності вони широко використовуються при створенні комунікативних, освітлювальних, індикаторних систем, а також у багатьох інших галузях побуту та промисловості, зокрема мікроелектронної. По-друге, в роботі основний наголос зроблено на дослідженнях структур на основі монокристалів GaP, твердих розчинів GaAsP та наносистем InGaN/GaN з квантовими ямами. Ці матеріали є одними з найперспективніших з точки зору створення високопродуктивних джерел світла, причому як монохроматичних з різними довжинами хвиль, так і білих. Нарешті, дана дисертаційна робота зосереджена на детальному аналізі ефектів, які виникають внаслідок впливу проникної радіації на світловипромінюючі діоди. Глибоке розуміння процесів, що можуть відбуватися в системах, котрі функціонують у надзвичайно суворих умовах радіаційного впливу, є вкрай важливим для значного розширення області їх практичного застосування. Окрім того, науковий пошук нових методів та підходів до контрольованої модифікації фізичних властивостей світлодіодних структур є надзвичайно актуальним.

2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані

Для опонування одержано текст дисертаційної роботи загальним обсягом 145 сторінок. Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел з 96 найменувань, одного додатку і містить 77 рисунків та 5 таблиць. Структура дисертації послідовно відображає етапи досліджень та логічний виклад отриманих результатів.

У *вступі* наведено обґрунтування вибору теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження і вказані його об'єкт та предмет, перераховані методи, використані під час роботи, а також вказані наукова новизна одержаних результатів та особистий внесок здобувача; крім того, окрема увага приділена практичне значенню результатів та зв'язку роботи з науковими програмами та темами.

Перший розділ містить літературний огляд, що висвітлює основні властивості фосфіду галію, гетероструктур InGaN/GaN, можливості використання наноструктур на основі InGaN для створення джерел білого світлення, основні особливості впливу проникаючого випромінювання на структури GaP, GaAsP, InGaN/GaN, а також особливості застосування напівпровідникових світлодіодів.

У *другому розділі* дисертаційної роботи викладено методологічні аспекти вимірювання параметрів (насамперед оптичних та електрофізичних) досліджуваних об'єктів та проведення опромінення (гамма-квантами, електронами, нейтронами). Також у розділі представлені результати створення моделі реактора ВВР-М, що мала на меті оцінку нейтронних потоків у активаційних детекторах, і розрахункові та експериментальні швидкості низки реакцій.

Наступний, *третій, розділ* дисертаційної роботи присвячено опису експериментальних результатів дослідження деградаційно-відновних особливостей електрофізичних характеристик опромінених електронами та альфа-частинками фосфідогалієвих світлодіодів. Також представлено результати, отримані після ізохронного відпалу вказаних структур. Зроблено оцінки глибини залягання рівнів, що спричиняють гасіння основних смуг електролюмінісценції, показано, що відпал характеризується трьома стадіями та проведено обговорення фізичних процесів, що відбуваються на кожній з них.

Четвертий розділ зосереджує увагу читача на особливостях вольт-амперних характеристик опромінених електронами світлодіодах GaAs_{1-x}P_x ($x = 0,85$ або $0,45$). Розглянуто вплив дози опромінення на фактор неідеальності та диференційний опір діодних структур, еволюцію механізму струмопротікання та показано основну роль дифузії вакансій фосфору у відновленні електричних параметрів.

У *п'ятому розділі* наведено результати дослідження спектральних характеристик світлодіодів, яким присвячено і попередній розділ. Зокрема визначено значення коефіцієнтів пошкодження часу життя, проведено оцінки залежностей ширини забороненої зони та температури електронів від температури зовнішнього середовища.

Два наступні розділи стосуються особливостей вихідних та опромінених світлодіодів InGaN/GaN з квантовими ямами. Так *шостий розділ* містить інформацію про спектральні характеристики, а *сьомий* – про електрофізичні. Виявлено існування двох механізмів впливу на випромінювальну рекомбінацію (екранування внутрішніх полів вільними носіями у низькотемпературній області та теплове фононне гасіння при $T > 220$ К), зростання диференційного опору та впливу ефекту Штарка внаслідок радіаційного опромінення, а також встановлено, що пробій р-n переходу пов'язаний з тунелюванням.

Висновки дисертаційної роботи відповідають її змісту та поставленій меті.

Додаток А містить перелік публікацій з представленими основними науковими результатами.

Ступінь обґрунтованості отриманих результатів не викликає сумнівів, адже у ході роботи використані загальноприйняті методи аналізу напівпровідникових бар'єрних структур, а саме дослідження вольт-амперних та спектральних характеристик, аналіз відновлення електричних і оптичних характеристик під час ізохронного та ізотермічного відпалів, а також сучасні програмні пакети такі як Geant4 та Autodesk Autocad. Крім того, результати дисертації було широко висвітлено та апробовано міжнародних та вітчизняних конференціях.

У вступі дисертаційної роботи зазначено, що роботи проводилися в межах чотирьох науково-дослідних тем, що отримали державне фінансування.

3. Наукова новизна одержаних результатів.

Визначено величини коефіцієнтів радіаційного пошкодження GaP та GaAsP світлодіодів при електронному опроміненні з енергією частинок 2 MeV, а також енергетичне положення рівнів, які викликають гасіння електролюмінесценції у структурах фосфіду галію. Показано, що ширина забороненої зони твердого розчину GaAs_{0,55}P_{0,45} описується співвідношенням Варшні та визначені відповідні коефіцієнти. Вивчено дозову залежність коефіцієнта неідеальності світлодіодних структур на основі GaAsP. Встановлено, що спектр випромінювання світлодіодів InGaN/GaN задовільно описується з використанням розподілу Гауса. Вивчено особливості впливу опромінення (насамперед електронного) на світлодіодні структури GaP, GaAsP, InGaN/GaN та проаналізовано можливі механізми радіаційно-індукованих змін. Запропоновано спосіб використання продуктів поділу важких ядер у ролі джерел змішаного випромінювання, а також проведено моделювання поля нейтронних потоків активної зони реактора ВВР-М.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Одержані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Зокрема у наступних дослідженнях можуть бути використані результати моделювання поля нейтронних потоків активної зони реактора ВВР-М, вертикальний розподіл щільності потоків швидких, епітеплових та термолізованих нейтронів. Отримані числові характеристики коефіцієнтів

пошкодження світлодіодів, виготовлених з різних матеріалів, стануть у нагоді при оцінці радіаційної стійкості відповідних пристроїв, а також передбачень щодо можливості їхнього застосування в екстремальних умовах. Отримані дозові залежності можуть стати основою для розробки методів активної модифікації світлодіодних структур. Отримана оцінка температурної залежності ширина забороненої зони GaAsP дозволить більш точно передбачати поведінку пристроїв, створених з використанням вказаного твердого розчину, в широкому діапазоні температур. Крім того, отримані результати дозволяють розширити уявлення про процеси, які відбуваються під час радіаційного опромінення у твердих розчинах, а також термічного відпалу подібних систем. Зокрема виокремлено вплив ефектів Штарка, балістичного перенесення носіїв та наявності атмосфери Котрела. Таким чином, результати дисертанта є вагомим внеском у дослідження функціонування та шляхів модифікації гомоперехідних та гетероперехідних світлодіодів.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

Список публікацій автора включає 5 статей у журналах, що входять до наукометричної бази Scopus (квартиль – Q3) та 12 тез доповідей на наукових конференціях. Публікації містять повноцінне викладення основних положень дисертації. Особистий внесок автора є виокремленим та вагомим. Наукові публікації повністю відповідають вимогам п. 8 “Порядку 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 р.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

Головні ідеї рукописи викладено зрозуміло, присутня чітка та логічно виправдана структуризація тексту. Характерною особливістю роботи є необхідно-достатня мінімізація формулювань та пояснень. Водночас, під час ознайомлення з дисертацією виникли деякі зауваження.

1. Незважаючи на достатньо малу кількість недоліків у оформленні роботи, вони все ж таки наявні. Наприклад, у роботі відсутній Рис.1.4, хоча ілюстрації з попереднім та наступним номерами розташовані на ст. 28 та 32, відповідно; слова «детекторів» у заголовку Табл.2.4 та «спектру» в останньому реченні на ст.128 написані з помилками; на ст. 78 наведено неправильні одиниці виміру для енергії теплової дисоціації екситона; назва пункту 2.3 «Вимірювання спектральних та ВАХ характеристик досліджуваних об'єктів», хоча абревіатура ВАХ містить в собі слово «характеристик»; термін «нормальний розподіл Гауса» (ст.109) виглядає дещо тавтологічним; на ст.86 згадується про нескінченне зростання струму, що є фізично неможливим.

2. На ст.85 стверджується, що причиною появи області від'ємного диференційного опору є формування «внутрішнього оберненого зв'язку за

струмом». На мій погляд, доцільним було б описати фізичний зміст цього явища та основні механізми, на яких він базується.

3. Один з висновків роботи стосується експериментально виявленого факту, що світлодіоди GaAsP значно радіаційно стійкіші порівняно з GaP аналогами. Наскільки можна зрозуміти, висновок базується на суттєвій відмінності величин коефіцієнтів пошкодження при електронному опроміненні. Надзвичайно корисним з фізичної точки зору було б обговорення можливих причин виявленої величезної (10^{-8} - 10^{-7} $\text{см}^2\text{с}^{-1}$ для GaP та 10^{-10} - 10^{-9} $\text{см}^2\text{с}^{-1}$ для GaAsP) відмінності коефіцієнтів.

4. Для оцінки параметрів Варшні $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ використовувалися середні значення відповідних величин для GaAs та GaP. Було б бажано пояснити, чому не використовувалося правило Вегарда, яке дозволяє з непоганою точністю передбачити значення багатьох параметрів для широкого класу твердих розчинів. Також цікавим було б обговорення з цієї точки зору отриманого значення $E_g(0) = 2,03$ еВ.

5. Деякі формулювання, використані у роботі, не є зрозумілими, наприклад: «заміна вихідного та опроміненого світлодіода» у підпису до рис.1.14 (на самому рисунку залежності напруги від часу і що саме замінюється залишається загадкою); «залежність $R_{dif}(I)$... яка задає межі його застосування» на ст.85 (чому залежність впливає на застосування світлодіода?); «Отже, можна сподіватись, що» (це повне речення у першому абзаці на ст.80).

6. Не у всіх випадках вказано точність отриманих параметрів.

Варто зазначити, що згадані недоліки не стосуються наукових результатів, отриманих у роботі та не впливають на загальне на позитивне враження.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Вимоги щодо оформлення дисертації за структурою, стилем представлення матеріалу, мовою, затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 не порушено.

Дисертаційна робота здобувача Д.П. Стратілата є самостійним науковим дослідженням здобувача. Порушень академічної доброчесності ні у дисертаційній роботі, ні в наукових працях, де представлено результати, не виявлено.

8. Загальний висновок.

Загалом, дисертаційна робота є повноцінним та завершеним дослідженням, яке відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. №261 (зі змінами) та вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому Постановою КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування

рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022 р.), а її автор Стратілат Дмитро Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри загальної фізики фізичного
факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка



Олег ОЛІХ

24.08.2024