

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАНИЙ ЗАКЛАД «ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. К. Д. УШИНСЬКОГО»

МАЛИЙ Євген Вікторович

УДК 621.315.592

**ВЛАСТИВОСТІ ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ У ФОСФІДІ ГАЛІЮ ТА ЇХНІЙ
ВПЛИВ НА ПАРАМЕТРИ СВІТЛОДІОДІВ**

01.04.07. – фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса– 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України, м. Київ

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Таргачник Володимир Петрович,
Інститут ядерних досліджень НАН України
відділ радіаційної фізики
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Пелещак Роман Михайлович,
Дрогобицький державний педагогічний університет імені
Івана Франка
зав. кафедри фізики;

доктор фізико-математичних наук, професор,
Ваксман Юрій Федорович,
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
проф. кафедри експериментальної фізики;

Захист відбудеться **“2” жовтня 2019** року о **14⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.053.07 у Державному закладі «Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського» за адресою: 65000, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Південноукраїнського національного педагогічного університету ім. К. Д. Ушинського за адресою: м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 36, 65020

Автореферат розісланий **“30” серпня 2019** р.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Фосфідо-галієві світлодіоди – прості, надійні та високоефективні джерела світла. Швидке налагодження їхнього промислового виробництва відбулося завдяки інтенсивному розвитку епітаксійних технологій у приладобудуванні. Максимум випромінювання світлодіодів GaP, легованих азотом, співпадає з областю найвищої чутливості людського ока, що дозволяє застосовувати їх для конструювання світлових екранів, цифрових показчиків, індикаторів, лічильників ядерних частинок тощо.

Значний обсяг інформації, накопичений в літературі останніми роками стосовно впливу дефектів структури на основні фізичні характеристики цих діодів дозволяє використовувати їх у вигляді модельних об'єктів для дослідження радіаційної стійкості твердотільних випромінювачів.

Значного підвищення випромінювальної здатності діодів GaP досягнуто при легуванні азотом, що дозволило зняти принципове обмеження для квантового виходу непрямозонного напівпровідника, пов'язане з «ефектом зонної структури». Позитивна роль атома азоту зводиться до локалізації електрона в координатному просторі, що, згідно з невизначеністю Гейзінберга, призводить до його делокалізації у просторі імпульсів; участь фонона в акті випромінювальної рекомбінації перестає бути обов'язковою.

Потоки проникної радіації – зручний інструмент для контрольованого введення у зразок дефектів структури різних видів і потрібної концентрації, відтак їхнє використання може бути засобом моделювання пошкоджень як у вихідних монокристалах, так і у приладах, створених на їхній основі. Вузкоспрямовані пучки прискорених частинок потрібних енергій та видів можуть використовуватись з метою формування на поверхні зразка і в об'ємі квантових ям і квантових точок наноструктур різного профілю.

Одержані результати можуть бути корисними при конструюванні радіаційно-стійких оптоелектронних модулів, прогнозуванні наслідків впливу потужних радіаційних полів на лінії зв'язку та на засоби керування – у військовій галузі.

Світлодіоди GaP (N) - один із простих і зручних об'єктів для перевірки фундаментального принципу невизначеності Гейзінберга. Оскільки хвильові функції електронів на ізоелектронних домішках сильно локалізовані у просторі, Δx – мале, то невизначеність величини квазіімпульса Δp – велика. Відповідно, невизначеність положення енергетичних рівнів стає також значною, внаслідок чого зростає ймовірність випромінювальних переходів.

На шляху подальшого підвищення квантового виходу діодів GaP лежить також проблема зниження концентрації безвипромінювальних рівнів у кристалі,

розв'язання якої неможливе без накопичення інформації про властивості дефектів структури. Один зі шляхів усунення надлишкової концентрації дефектів – застосування різноманітних видів відпалів: термічних, інжекційних, акустичних та їхньої комбінації. 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 також полягає у визначенні і підвищенні радіаційної стійкості світлодіодних структур, оскільки їх використовують у керуючих, регулюючих, сигнальних пристроях на АЕС та космічних апаратах.

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 допомогою світлодіодів можна практично неперервно перекрити весь діапазон видимого випромінювання.

Високоєфективні випромінювачі у видимій області вирощують також на основі твердих розчинів $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. 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 відтак і положення спектрального максимуму свічення. Легування ізоелектронною домішкою азоту дозволило створювати випромінювальні центри, енергія зв'язку екситонів на яких, будучи фіксованою відносно дна С-зони, забезпечувала б одержання ефективних помаранчевих, червоних і жовтих випромінювачів. Висока інтенсивність свічення зумовлювалась використанням складу при значеннях x , близьких до 0.4, коли матеріал стає прямозонним і ймовірність випромінювальної рекомбінації зростає.

Порівняно з усіма іншими джерелами попередніх поколінь, світлодіодам GaP та $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ властиві суттєві переваги – низька енергоємність, мініатюрність, швидкодія, великий експлуатаційний ресурс, надійність, низька вартість. До того ж квантовий вихід світлодіодів на основі $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ сягає десятки відсотків

Зв'язок із науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалася у відповідності з плановими науковими програмами відділу радіаційної фізики Інституту ядерних досліджень НАН України, а також відповідно до планів держбюджетних тем: Дисертаційна робота виконана відповідно з плановими науковими програмами відділу радіаційної фізики Інституту ядерних досліджень НАН України, а також відповідно до планів держбюджетних тем:

- 1) “Дослідження гетерних властивостей радіаційних дефектів у напівпровідниках” (№ держ. реєстрації 0112U000896, 2012-2016 рр.)
- 2) “Дефектоутворення та кінетичні ефекти в опромінених і термічно оброблених напівпровідниках та наноструктурах на їх основі (№ держ. реєстрації 0112U005082, 2012-2016 рр.)

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

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

Мета і задачі досліджень

Метою роботи є вивчення впливу простих і складних дефектів на характеристики світлодіодів: вихідних зразків, та опромінених частинками різних видів.

Для досягнення поставленої мети в роботі проводилися:

1. Вимірювання спектрів електролюмінесценції вихідних та опромінених світлодіодів при різних температурах
2. Вимірювання вольт-амперних характеристик вихідних та опромінених світлодіодів при різних температурах
3. Досліджувався вплив ультразвукової обробки на випромінювальну здатність вихідних та опромінених світлодіодів

Об’єкт дослідження: червоні та зелені світлодіодні структури на основі фосфіду галія і твердих розчинів $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

Предмет дослідження: зміни електрофізичних та оптичних характеристик вихідних світлодіодних структур на основі GaP та $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ та опромінених електронами і швидкими нейтронами реактора; додатково вивчався також вплив на них ультразвукової обробки

Методи дослідження. Оптичні характеристики світлодіодів одержувалися в процесі вимірювання спектрів електролюмінесценції автоматизованим комплексом у широкому діапазоні струмів і температур. Електрофізичні параметри визначалися шляхом аналізу вольт-амперних характеристик при різних температурах; використовувалися режими генератора струму і генератора напруги. Зразки опромінювали частинками різних видів на ядерно-фізичних установках при кімнатній температурі

Наукова новизна одержаних результатів

1. 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

2. 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.

3. Запропоновано модель формування S-подібної ділянки на ВАХ GaP-світлодіодів при низьких температурах

4. Виявлено «поліпшення» електричних характеристик світлодіодів GaP у межах доз опромінення електронами ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$), 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.

5. 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.

6. 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.

Практичне значення одержаних результатів

1. Визначено коефіцієнти радіаційної стійкості світлодіодів із фосфіду галію під впливом електронного та нейтронного опромінення, які можуть бути корисними при експлуатації в умовах йонізуючого випромінювання

2. На основі GaP синтезують тверді розчини і результати виконаної роботи можуть бути корисними розробникам світлодіодів наступного покоління

3. Лінійна дозова залежність ($\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ електронів/см}^2$, $E = 2 \text{ MeV}$), дозволяє використовувати кристал фосфіду галію для контролю області пенумбри при опроміненні біологічних об'єктів з метою уникнення переопромінення здорових тканин [1а-3а]

4. Завдяки детальному вивченню 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.

Особистий внесок здобувача:

- спільне проведення експериментів
- одержання та обробка експериментальних даних
- участь у створенні та вдосконаленні окремих методик
- аналіз та узагальнення одержаних результатів
- участь у написанні, обговоренні та оформленні статей
- представлення одержаних результатів на наукових конференціях

Апробації результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на:
 VIII international school-conference “Actual problems of semiconductor physics”
 (Дрогобич, 2013),
 XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI щорічних наукових конференціях
 Інституту ядерних досліджень НАН України (з 2013 – по 2019 рр.),
 IV International Conference “Medical physics – the current status, problems ways
 of development. Innovation technologies” (Київ, 2014),
 XX and XXI International Conference “Interaction of Radiation with Solids”
 (Мінськ, Білорусь, 2015)
 VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (Дніпро, 2016),
 International Scientific and technical conference Laser technologies. Laser and their
 application (Truskavets, 2017)

Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 32 друковані праці, 14 статей у наукових фахових журналах, 18 тез та повідомлень конференцій

Структура й обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 148 сторінок і 54 рисунки. Перелік літератури містить 183 джерела, викладених на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації та її зв'язок із науковими програмами, планами і темами досліджень, які виконуються в Інституті ядерних досліджень НАН України, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведені дані про апробацію роботи, кількість публікацій та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** зроблено короткий огляд літературних джерел, присвячених дослідженню оптоелектричних характеристик вихідних та опромінених частинками різних видів світлодіодів на основі GaP. Проаналізовано особливості дефектоутворення у кристалах, опромінених різними видами швидких частинок.

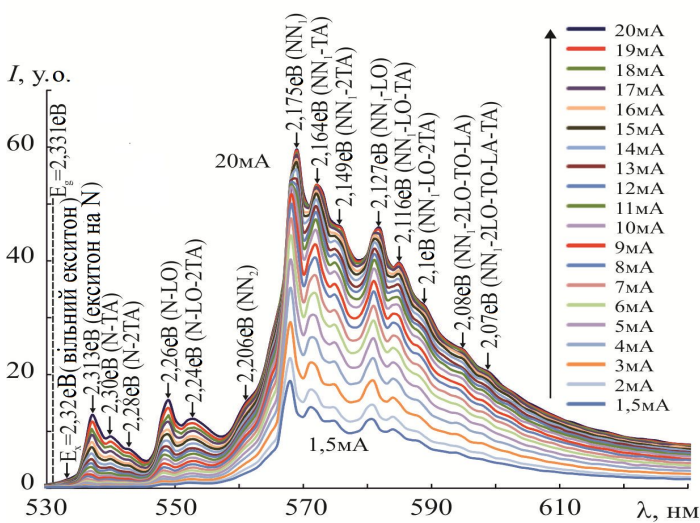


Рис. 1 Спектри випромінювання GaP-світлодіода, легованого азотом, отримані при $I = 1,5 \dots 20$ мА, $T = 77$ К

У **другому розділі** дисертації описуються технічні засоби вимірювання спектрів електролюмінесценції та принцип роботи установки для вимірювання вольт-амперних характеристик у режимі генератора струму і генератора напруги; описано спосіб введення ультразвуку у зразок.

У **третьому розділі** наведено результати низькотемпературних досліджень спектрів електролюмінесценції і вольт-амперних характеристик зелених (легованих N) та червоних (легованих Zn і O одночасно) вихідних світлодіодів GaP.

В області низьких температур, починаючи зі струму $i = 1.5$ мА, виникає структура (рис.1, $T = 77$ К), що добре відтворюється зі зростанням рівня інжекції неосновних носіїв заряду. На рис. показано положення ширини забороненої зони $E_g = 2,331$ eV і рівень вільного екситона у GaP $E_{ex} = 2,32$ eV з енергією зв'язку $\Delta E = 21$ меВ. Нижче по шкалі енергій виділяється вузький максимум $h\nu = 2,313$ eV рекомбінації екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту. Два сусідніх піки слід ототожнювати з фононними репліками цієї лінії N-TA, N-2TA за участі одного і двох акустичних фононів.

Головна смуга досліджуваних світлодіодів – випромінювання $h\nu = 2,175$ eV (NN_1) із фононними повтореннями зумовленого рекомбінацією екситона, зв'язаного на парі сусідніх атомів азоту, які ізоелектронно заміщують фосфор в ґратці GaP. Інтенсивність цієї лінії ($h\nu = 2,175$ eV) значно вища, ніж лінії екситона, локалізованого на атомі N, що зумовлено двома обставинами: 1) оскільки лінія NN_1 парна – число таких пар в елементарній кубічній ґратці має бути більше, ніж число окремих атомів 2) Ефект самопоглинання в кристалі неоднаково впливає на інтенсивність випромінювання обох смуг, бо для лінії N (як білякрайової) самопоглинання значно ефективніше, ніж для NN_1 .

Вниз по шкалі енергій в спектрі виділяються фононні повторення основної лінії $h\nu = 2,164$ eV (NN_1 -TA), $h\nu = 2,149$ eV (NN_1 -2TA), $h\nu = 2,127$ eV (NN_1 -LO),

$h\nu = 2,116$ eV (NN₁-LO-TA), $h\nu = 2,1$ eV (NN₁-LO-2TA), а також виступи на кривій випромінювання $h\nu = 2,08$ eV (NN₁-2LO-TO-LA), $h\nu = 2,07$ eV (NN₁-2LO-TO-LA-TA). Комбінації фононів у двох останніх випадках орієнтовні через незначну точність визначення положення максимумів на різкому спаді інтенсивності свічення.

Білякрайове екситонне випромінювання характеризується набором вузьких ліній. Найближчою до краю зони розташована лінія $h\nu = 2,313$ eV, зумовлена рекомбінацією екситона, зв'язаного на атомі азоту. Слідом за нею виділяються дві її фононні репліки $h\nu = 2,3$ eV (N-TA), $h\nu = 2,28$ eV (N-2TA) за участю одного і двох акустичних фононів відповідно.

I, відн. од.
| $h\nu = 1.845$ eV

Рис. 2 Спектр випромінювання червоного світлодіода GaP (Zn, O) при $T = 77$ К. У таблиці ліворуч внизу подано залежність ширини ліній від температури зразка

Запропоновано новий механізм пояснення виникнення лінії $h\nu = 2,26$ eV, згідно якого цей максимум вважається генетично пов'язаним із лінією екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту: зростання інтенсивності лінії N при зростанні струму через *p-n*-перехід супроводжується збільшенням піку $h\nu = 2,26$ eV.

При зростанні струму через *p-n*-перехід GaP:N відбувається перерозподіл інтенсивності обох ліній: лінія, зумовлена анігіляцією екситона на ізольованому атомі азоту зростає, а інтенсивність лінії NN₁ – спадає. Найімовірніша причина перерозподілу інтенсивностей – зміна перерізу захоплення неосновних носії заряду на кожен із центрів при зростанні рівня інжекції.

При $T = 300$ К спектр зеленого GaP-діода має форму широкої двогорбої смуги з абсолютним максимумом $h\nu = 2,222$ eV. Відносно лінії NN₁ при $T = 77$ К, він зсунутий в бік більших енергій, що може бути результатом внеску акустичних фононів, зв'язаних з лінією екситона на ізольованому атомі азоту. При кімнатній температурі їх концентрація значно вища ніж при 77К.

На рис. 2 показано спектри електролюмінесценції світлодіодів GaP червоного кольору свічення. При кімнатній температурі спектр зразка має вигляд широкої асиметричної безструктурної смуги із максимумом $h\nu = 1,797$ eV. У міру зниження температури зразка до $T = 77$ К у короткохвильовій частині спектра виникає, крім основної $h\nu_1 = 1,845$ eV, додаткова смуга випромінювання $h\nu_2 = 2,206$ eV (рис. 2). Основна смуга випромінювання червоних фосфід-галієвих світлодіодів характеризується аномально великою шириною, що може бути зумовлено внутрішньою структурою пастки Zn-O, на якій зв'язується екситон. Висловлюється припущення, що смуга $h\nu = 2,206$ eV, присутня у досліджуваних зразках, пов'язана з донорно-акцепторним механізмом рекомбінації. Найімовірнішими кандидатами для утворення такої пари можуть бути акцептор Zn ($E_a = 61,7$ eV) та неконтрольований донор Sn ($E_d = 69$ meV), здатний проникати з приконтатної області приладу. Головною особливістю цієї лінії є зростання інтенсивності – при малих струмах (до ~ 50 mA) та, зумовлене тепловим ефектом падіння – при великих ($I > 100$ mA).

При великих струмах (понад $I > 90\text{mA}$) спостерігається зниження інтенсивності свічення, зумовлене зростанням температури діода внаслідок виділення Ленц-Джоулевого тепла. Зміна положення рівня Фермі зумовлює зміну зарядового стану пари Zn-O, а відтак і зменшення ймовірності зв'язування екситона на цьому комплексі

Характерна особливість GaP-діода – існування області від'ємного диференційного опору на вольт-амперних характеристиках (ВАХ) в області низьких температур ($T \leq 90\text{ K}$), що проявляється виникненням S- та N-подібних ділянок від'ємного диференційного опору. Якщо вимірювання здійснювати в режимі генератора напруги, то після виникнення N-подібної ділянки, зразок в області зриву стрибком переходить у низькоомний стан і крізь нього тече струм, у декілька разів вищий за номінальний. Навіть незначне подальше збільшення напруги призводить до виникнення майже вертикальної ділянки на ВАХ і зростання струму в сотні разів.

Форма ВАХ світлодіодів фосфіду галію при низьких температурах свідчить, що розвиток від'ємного диференційного опору може бути зумовленим дією внутрішнього позитивного зв'язку, керованого струмом. Позаяк точна форма зонної структури фосфіду галію невідома, тому можна висловити припущення про зв'язок між виникненням S- та N-подібностей з формою зонної структури. Внаслідок можливої меншої кривизни зони E_3^C порівняно з дном E_1^C носії, перекинуті полем із X_1^C -мінімуму в X_3^C мають більшу величину m_e^* ; провідність зменшується внаслідок меншої рухливості і формується N-подібний стрибок при вимірюванні у режимі генератора напруги.

Подальше підвищення напруги призводить до перенесення носіїв у Γ_1^C -мінімум, де їхня маса – менша. Носії з меншою масою матимуть більшу рухливість, а отже додатковим підтвердженням зменшення ефективної маси носіїв може слугувати різке зростання їхньої рухливості у цьому мінімумі. Рухливість носіїв у Γ_1^C -мінімумі становить близько $\mu = 8000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ при $\mu = 80\dots 120\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ у X_1^C -мінімумі [146]. Як видно з формули провідності $\sigma = q_e n \mu$, більша рухливість μ призводить до збільшення провідності σ .

Коли ж після перемикавання прикладену до зразка напругу зменшувати – зворотня крива проходить іншим шляхом, утворюючи «петлю гістерезису». Очевидно, що подібна «пам'ять» діода зумовлена певною кількістю носіїв, які ще залишилися у Γ_1^C -мінімумі. В об'ємі зразка ділянці перемикавання відповідає виникнення струмового шнура. Тому коли при вимірюванні ВАХ не застосовувати обмежень на зростання струму – спостерігатимемо майже вертикальне його зростання при досягненні напруги перемикавання.

У четвертому розділі основна увага зосереджена на аналізі наслідків опромінення зразків GaP електронами з $E = 2\text{ MeV}$ та швидкими нейтронами реактора.

Виявлено «поліпшення» електричних характеристик світлодіодів GaP у межах доз опромінення електронами ($\Phi = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$), яке проявляється у вигляді зростання прямих струмів при малих напругах (\sim до 3 В) та зміщення пробійної гілки ВАХ в область більших напруг. Зростання величини пробійної напруги можна розглядати як результат зменшення рухливості носіїв струму в опромінених зразках.

Дозова залежність інтенсивності свічення світлодіода GaP, опроміненого електронами з $E = 2 \text{ MeV}$, (рис. 3) є сумою двох компонент – швидкої (при малих дозах) та повільної (при більших), причому швидка є наслідком руйнування екситонів полями радіаційних дефектів, повільна – виникає при введенні у кристал рівнів безвипромінювальної рекомбінації.

Рис. 3 Дозова залежність інтенсивності при опроміненні електронами з $E = 2 \text{ MeV}$

Відновлення свічення опромінених діодів при ізохронному відпалі двостадійне ($150 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ та $275 \div 325 \text{ }^\circ\text{C}$) з центрами стадій, які описують відпал базових областей діода. У червоному зразку, де рекомбінаційні центри зосереджені в p -області, основною є друга стадія відпалу, на якій зникають вакансії галію. Після $T > 350 \text{ }^\circ\text{C}$ інтенсивність свічення монотонно зменшується внаслідок зростання рівня дефектності p -області діода при високих температурах відпалу. Виявлено також, що при $T_{\text{відн.}} > 350 \text{ }^\circ\text{C}$ величина оптичного пропускання матеріалу лінзового покриття також погіршується.

Показано, що крива деградації інтенсивності електролюмінесценції може бути використана для визначення коефіцієнта радіаційного пошкодження часу життя носіїв струму. Для $E_{\text{ел}} = 2 \text{ MeV}$ та для діодів GaP він виявляється рівним $k_t = 1.5 \cdot 10^7 \text{ с} \cdot \text{см}^{-2}$.

При вимірюванні зворотних ВАХ зелених та червоних GaP-світлодіодів виявлено ділянки тунельного і лавинного пробоїв. У межах $I \approx 10^{-1} \div 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ протікання струму забезпечується участю обох видів носіїв, причому електронна компонента переважає. При $I > 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ основну роль у механізмі протікання струму відіграє опір бази діода; середнє значення цієї величини близьке до $R_b = 162 \text{ Ом}$. Опромінення діодів GaP призводить до зменшення зворотніх струмів. На зворотних ВАХ зелених GaP-світлодіодів, одержаних при різних температурах, відсутні пробійні ділянки у низькотемпературній області (майже до $U = -10 \text{ В}$, за винятком ВАХ при 300 К), що свідчить про вищий рівень досконалості p - n -переходу. Можна припустити, що ізоелектронний атом заміщення N_p зелених зразків деформує потенціал ґратки у меншій мірі, ніж парне заміщення Zn_{Ga} - O_p у червоних. При високих рівнях легування, необхідних для забезпечення достатньої величини квантового виходу, ймовірно виникнення скупчень пар Zn - O , здатних як деформувати краї зон, так і виконувати роль локальних центрів тунелювання зона-дефект-зона.

Для діодів, опромінених нейтронами коефіцієнт пошкоджуваності носіїв струму є функцією температури вимірювання і проявляє тенденцію до зростання при охолодженні. Очевидно, що така поведінка k_n зумовлена температурною зміною положення рівня Фермі – зміщення E_F до середини E_g активізує вплив компенсації акцепторними центрами електропровідності n -області та донорними p -області.

Числові значення $\frac{dn}{dt}$ зразків, опромінених нейтронами та електронами з $E = 2$ MeV, були одного порядку ($\sim 1 \dots 8 \text{ см}^{-1}$), але при опроміненні α^{++} -частинками вони виявилися майже на три порядки вищими. Така велика ефективність дефектоутворення зумовлена, вочевидь, у першу чергу, впливом йонізаційного чинника, властивого важким зарядженим частинкам, здатного збільшувати ймовірність виходу атома з вузла ґратки у результаті часткового руйнування міжатомних зв'язків.

Опромінення нейтронами спричиняє монотонне гасіння всіх компонентів спектру, причому найчутливішим до дії радіації є випромінювання екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту. Модель дислокаційного тунелювання дозволила оцінити густину дислокацій у збідненій частині p - n -переходу. Для зелених діодів ця величина близька до $7,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; для червоних $\rho_D = 4 \cdot 10^8 \text{ е/см}^{-2}$. Опромінення нейтронами суттєво не впливає на ρ_D . Висловлюється припущення, 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.

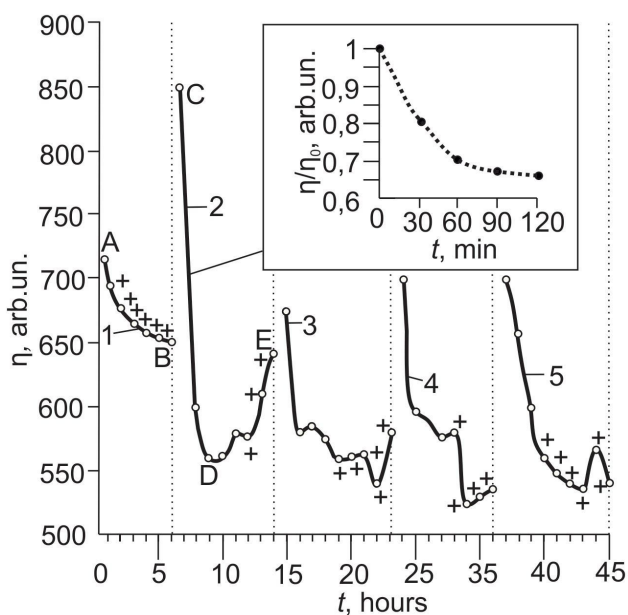


Рис. 4 Деградаційно-відновлювальні цикли $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ -світлодіода

П'ятий розділ присвячено дослідженню оптоелектричних характеристик діодів, вирощених на основі твердих розчинів $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ та впливу на них

УЗ-обробки. Показано, що температурний зсув спектрів світлодіодів GaAsP у бік менших енергій квантів є наслідком температурної зміни ширини забороненої зони напівпровідника. Падіння інтенсивності їхнього свічення в інтервалі температур 77-300 К спричинене тепловою іонізацією зв'язаних екситонів. Показано, що в діодах GaAs_{1-x}P_x рівні радіаційних дефектів безвипромінювальні; дозова залежність свічення – експоненційна; константи пошкодження жовтих і помаранчевих зразків – однакові.

Існування ділянки ВДО у верхній ділянці ВАХ очевидно зумовлене присутністю компоненти GaP у твердому розчині GaAsP. Опромінення електронами з $E = 2$ MeV зменшує інтенсивність випромінювання внаслідок введення у кристал центрів безвипромінювальної рекомбінації. Швидкість деградації інтенсивності свічення діодів під дією швидких електронів виявляється однаковою для зразків із різним вмістом фосфору.

На рис. 4 показано деградаційно-відновлювальні цикли GaAs_{1-x}P_x світлодіода. Знак «+» означає введення ультразвуку в зразок. На вставці – зміна ефективності випромінювання залежно від часу інжекції неосновних носіїв заряду на прикладі 2-го деградаційно-відновлювального циклу. Виявлено, що УЗ-обробка спричиняє виникнення низки деградаційно-відновлювальних процесів у світлодіодах GaAs_{1-x}P_x. У пасивному режимі це виражається зростанням інтенсивності свічення після тривалого зберігання ($t = 12$ год); в робочому режимі спостерігається зменшення величини випромінювання. Часткове зростання інтенсивності свічення на початкових стадіях може бути спричиненим захопленням точкових дефектів рухомими дислокаціями.

У зразках GaAs_{1-x}P_x, підданих УЗ-обробці, виявлено ефект акусто-дефектної взаємодії, наслідком якої є довготривала релаксація інтенсивності свічення, зумовлена, в свою чергу, процесами перебудови дислокаційних скупчень – ймовірно, дефектів темних ліній та дефектів темних плям.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Ідентифіковано лінії спектру випромінювання зелених промислових світлодіодів. Встановлено, що основна смуга свічення зумовлена рекомбінацією екситона, зв'язаного на домішкових атомах азоту, які займають сусідні місця в підгратці фосфору (NN₁-лінія). Лінія меншої інтенсивності, розташована в білякрайовій області спектра, виникає в результаті анігіляції екситона, локалізованого на ізольованому атомі N. У спектрі присутні також фононні репліки обох ліній. При збільшенні величини струму через *p-n*-перехід інтенсивність лінії, зумовленої анігіляцією екситона на окремому атомі азоту, безперервно зростає, а основної (NN₁) – зменшується. Найімовірніша причина перерозподілу інтенсивностей – зміна перерізу захоплення ННЗ на кожен із центрів при зростанні рівня інжекції.

2. Виявлено, що спектр червоних діодів крім відомої червоної смуги $h\nu_{\max} = 1,845$ еВ, пов'язаної з анігіляцією екситона, зв'язаного на комплексі Zn-O, містить білякрайову смугу випромінювання з максимумом $h\nu_{\max} = 2,206$ еВ при $I = 20$ мА. У її формуванні можуть приймати участь донорно-акцепторні переходи між неконтрольованою домішкою – оловом та основною легуючою – цинком. Головною особливістю цієї лінії є зростання інтенсивності – при малих струмах (до ~ 50 мА) та, зумовлене тепловим ефектом падіння – при великих ($I > 90$ мА). Встановлено, що основна смуга випромінювання червоних фосфідо-галієвих світлодіодів характеризується аномально великою шириною, що може бути зумовлено внутрішньою структурою пастки Zn-O, на якій зв'язується екситон. В основі механізму випромінювання додаткової смуги можуть бути донорно-акцепторні переходи між основною домішкою легування Zn та неконтрольованим донором Sn.

3. Висловлено припущення, що розвиток ВДО зумовлений дією внутрішнього позитивного зв'язку, керованого струмом. Різке зростання провідності діода на N -ділянці ВДО може бути зумовлене міждолинним перенесенням електронів із долини у розташовану вище долину, в якій ефективна маса носіїв – більша. Підвищення прикладеної до зразка напруги призводить до перенесення носіїв струму з бічної долини в центральну, де ефективна маса m_e^* стає на два порядки меншою, внаслідок чого розвивається S -подібна ділянка ВДО.

4. Встановлено, що дозова залежність інтенсивності свічення при опроміненні електронами з $E = 2$ МеВ є сумою двох компонент – швидкої (при малих дозах) та повільної (при більших), причому швидка є наслідком руйнування екситонів полями радіаційних дефектів, а повільна – виникає при введенні в кристал рівнів безвипромінювальної рекомбінації. Зроблено висновок, що крива деградації інтенсивності електролюмінесценції може бути використана для визначення коефіцієнта радіаційного пошкодження часу життя носіїв струму. Для $E_{\text{ел}} = 2$ МеВ та для діодів GaP він виявляється рівним $k_t = 1.5 \cdot 10^7$ с·см⁻².

5. Показано, що при відпалі основною є друга стадія відпалу ($T = 230 \dots 290$ °C), на якій зникають вакансії галію. Після $T > 350$ °C інтенсивність свічення монотонно зменшується внаслідок зростання рівня дефектності p -області діода при високих температурах відпалу. Виявлено також, що при $T_{\text{відп.}} > 350$ °C величина оптичного пропускання матеріалу лінзового покриття також погіршується. Виявлено, що опромінення нейтронами призводить до монотонного гасіння всіх компонентів спектру, причому найчутливішим є випромінювання екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту.

6. На зворотних ВАХ зелених та червоних GaP-світлодіодів існують ділянки тунельного і лавинного пробоїв. У межах $I \approx 10^{-1} \div 3 \cdot 10^{-2}$ А протікання струму забезпечується участю обох видів носіїв, причому електронна компонента переважає. При $I > 3 \cdot 10^{-2}$ А основну роль у механізмі протікання струму відіграє опір бази діода; середнє значення цієї величини близьке до $R_0 = 162$ Ом. Опромінення діодів GaP призводить до зменшення зворотніх струмів.

7. Післярадіаційні зміни ВАХ GaP-світлодіодів можна трактувати як позитивні ефекти і використовувати з метою зменшення розсіюваної потужності – у прямому ввімкненні, та розширення робочих напруг – у зворотньому

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V. Veleschuk, A. Vlasenko, Z. Vlasenko, I. Petrenko, Ye. Malyi, V. Borshch, O. Borshch, A. Shefer / Current-voltage characteristic and electroluminescence of UV LEDs 365 nm at liquid nitrogen temperature // *Optica Applicata* v.49 No.1 pp. 125-133 (2019)
2. G. Gaydar, O. Konoreva, Ye. Maliy, Ya. Olikh, I. Petrenko, M. Pinkovska, O. Radkevych, V. Tartachnyk About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs // *Superlattices and Microstructures* v.104, pp. 316 – 320 (2017)
3. O. M. Hontaruk, O. V. Konoreva, Ye. V. Malyi, I. V. Petrenko, M. B. Pinkovska, O. I. Radkevych, V. P. Tartachnyk Low doses effect in GaP light-emitting diodes // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* v.19, No. 2. pp. 183 – 187 (2016)
4. O. V. Конорева, Є. В. Малий, Я. М. Оліх, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, О. І. Радкевич, В. П. Тартачник / Особливості екситонного випромінювання червоних фосфід-галієвих світлодіодів // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології* т. 13, №1, с. 41 – 48 (2016)
5. O. V. Konoreva, M. V. Lytovchenko, Ye. V. Malyi, Ya. M. Olikh, I. V. Petrenko, M. B. Pinkovska, V. P. Tartachnyk / Acoustic-stimulated relaxation of GaAs_{1-x}P_x LEDs electroluminescence intensity // *Semiconductor physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* v.19, No. 1, pp. 34 – 38 (2016)
6. O. M. Гонтарук, O. B. Конорева, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька / Особливості впливу проникної радіації на вольт-амперні характеристики прямозміщених світлодіодів GaP // *Питання атомної науки і техніки. Серія «Фізика радіаційних пошкоджень і радіаційне матеріалознавство (106)»*. – 2015. – № 5 (99). – С. 28 – 31
7. В. Г. Воробйов, O. B. Конорева, Є. В. Малий, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька / Вплив опромінення електронами з енергією 2 MeV на зворотні струми фосфід-галієвих світлодіодів // *Ядерна фізика та енергетика* т. 16, №3, с. 238 – 241 (2015)
8. O. V. Konoreva, M. V. Lytovchenko, Ye. V. Malyi, I. V. Petrenko, M. B. Pinkovska, V. P. Tartachnyk, V. V. Shlapatska / Degradation of electrooptical characteristics of serial GaP light-emitting diodes, caused by fast electrons // *Semiconductor physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2015. – v.18, No. 3. – P. 312-316
9. O. M. Гонтарук, O. B. Конорева, М. В. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник / Особливості електрооптичних

характеристик світлодіодів фосфіду галію в умовах високих рівнів інжекції // Ядерна фізика та енергетика. – 2015. – Т.16, №1. – Р. 56-59

10. M. Kulish, O. Dmytrenko, O. Melnyk, E. Malyi, M. Pinkovska, V. Tartachnyk, V. Shlapatska / Evaluation of dose distribution in penumbra area by using light-emitting structures // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2014. – № 1-2 (21-22). – С. 61-63

11. О. В. Конорева, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька / Електрофізичні та оптичні характеристики фосфідо-галієвих діодів, опромінених електронами з $E = 2 \text{ MeV}$ // Ядерна фізика та енергетика. – 2014. – т.15, №4. – Р. 349-352

12. O. Konoreva. Influence of complex defects on electrophysical properties of GaP light-emitting diodes / O. Konoreva, E. Malyi, S. Mamykin, I. Petrenko, M. Pinkovska, V. Tartachnyk // Semiconductor physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2014. –v. 17, No. 2. – P. 184-187

13. O. N. Gontaruk. Electroluminescence of commercial GaP green light-emitting diodes / O. N. Gontaruk, A.V. Kovalenko, O.V. Konoreva, E.V. Malyi, I.V. Petrenko, M.V. Pinkovska, V.P. Tartachnyk // Journal of Applied Spectroscopy. – 2014. – V. 80, No. 6. – P. 851-854

14. О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька / Поверхневий розподіл інтенсивності свічення фосфід-галієвих світлодіодів // Ядерна фізика та енергетика. – 2013. - Т.14, №2. – С. 158-162 (2013) .

15. Є.В. Малий, О.В. Конорева, В.П. Тартачник, П.Г. Литовченко, В.В. Борщ, О.М. Гонтарук, М.В. Завада *Особливості електрофізичних характеристик вихідних та опромінених електронами з $E = 2 \text{ MeV}$ світлодіодів $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$* XXVI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 8-12 квітня 2019 р.: Тези доповідей (2019)

16. Г. П. Гайдар, О. М. Гонтарук, Є. В. Малий, Я. М. Оліх, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник *Вплив акустичної обробки та електронного опромінення на мікроплазмове свічення фосфід-галієвих світлодіодів* // XXIV щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 10-13 квітня 2017 р.: Тези доповідей, сс. 141-142 (2017)

17. O. Konoreva, Ye. Malyi, P. Litovchenko, I. Petrenko, M. Pinkovska, O. Radkevych, V. Tartachnyk *Effect of highly energetic electron current on thin films of luminescence $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ structures* // Materials of scientific and technical conference ‘Laser technologies. Laser and their application’, June 7-9, 2017, Truskavets, Ukraine, p.29-31 (2017)

18. Є. В. Малий, В. П. Велещук, І. В. Петренко, В. П. Тартачник, О. І. Власенко, З. К. Власенко, М. П. Киселюк *Вплив УЗ-навантаження на електролюмінесцентні характеристики світлодіодів ультрафіолетового випромінювання* // XXV щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 16-20 квітня 2018 р.: Тези доповідей, сс. 134-135 (2018)

19. Є. В. Малий, Я. М. Оліх, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, О. І. Радкевич, В. П. Тартачник Акусто-дислокаційна взаємодія у світлодіодних структурах // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Дніпро, Україна 26-30 вересня 2016 р.: Тези доповідей, с. 221-222 (2016)

20. В. П. Тартачник. Від'ємний диференційний опір у світлодіодах GaP / В. П. Тартачник, Є. В. Малий, Г. П. Гайдар, О. В. Конорева, М. Б. Пінковська. // XXIII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 1-5 лютого 2016 р.: Тези доповідей. – 2016. – С. 130-131

21. Є. В. Малий. Акустостимульовані процеси релаксації у вихідних та опромінених світлодіодах $GaAs_{1-x}P_x$ / Є. В. Малий, М. В. Литовченко, Я. М. Оліх, І. В. Петренко, В. П. Тартачник // XXIII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 1-5 лютого 2016 р.: Тези доповідей. – 2016. – С. 125-126

22. О. В. Конорева. Особенности электрофизических характеристик исходных и облученных светодиодов GaP / О. В. Конорева, Е. В. Малий, И. В. Петренко, М. Б. Пинковская, В. П. Тартачник // 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2015 г., Минск, Беларусь. – 2015. – С. 113 – 115

23. І. В. Петренко, О. В. Конорева, В. І. Куц, М. В. Литовченко, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник / Особливості впливу опромінення частинками різних видів на вольт-амперні характеристики GaP-світлодіодів // XXII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, Київ, 26 - 30 січня 2015 р.: Тези доповідей. – 2015. – С. 129-130

24. Є. В. Малий, О. П. Мельник, М. В. Литовченко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька Перспективи застосування світлодіодних структур у медичній практиці // XXII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України 26 - 30 січня 2015р.: Тези доповідей. – 2015. – С. 127-128 (2015)

25. М. П. Куліш, О. П. Дмитренко, О. П. Мельник, Є. В. Малий, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька / Оцінка дозового розподілу в області пенумбри з використанням світлодіодних структур // IV International Conference “Medical physics – the current status, problems ways of development. Innovation technologies” October 23-24. Book of Abstracts. – 2014. – P.15

26. О. В. Konoreva, V. P. Tartachnyk, E. V. Malyj, I. V. Petrenko, V. M. Popov, M. B. Pinkovska / Electric-optical properties of $GaAs_{1-x}P_x$ light-emitting diodes // Щорічник ІЯД НАН України 2013, Київ. – 2014. – С. 93

27. І. В. Петренко, О. В. Конорева, Є. В. Малий, М. Б. Пінковська, В. М. Попов, В. П. Тартачник / Електрооптичні характеристики світлодіодів $GaAs_{1-x}P_x$ / // XXI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України 27-31 січня 2014 р.: Тези доповідей. – 2014. – С. 144

28. Є. В. Малий, О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник / Інжекційна люмінесценція зелених світлодіодів GaP // XXI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України 27-31 січня 2014 р.: Тези доповідей. – 2014. – С. 140-141

29. O. Gontaruk, A. Kovalenko, E. Malyj, I. Petrenko, M. Pinkovska, L. Polivtcev, V. Tartachnyk / The effect of fast particles' irradiation on electrooptical properties of GaP LEDs // 10-th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 24-27, Minsk, Belarus. – 2013. – P. 76-77

30. P. Litovchenko, V. Tartachnyk, I. Petrenko, E. Malyj, A. Kovalenko, O. Konoreva, V. Shlapatska / Electroluminescence of initial irradiated serial GaP light emitting diodes // VIII international school-conference "Actual problems of semiconductor physics", June 25-28, 2013 Drohobych, Ukraine. Abstract book. – 2013. – P. 87

31. P. Litovchenko, I. Petrenko, O. Konoreva, E. Malyj, M. Pinkovska, O. Radkevych / Influence of structural factors on luminescence of red GaP light emitting diodes // VIII international school-conference "Actual problems of semiconductor physics", June 25-28, 2013 Drohobych, Ukraine. Abstract book. – 2013. – P. 85-86

32. О. І. Власенко, В. П. Велешук, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник / Вплив радіаційних дефектів на електричні характеристики фосфід-галієвих світлодіодів // XX-а щорічна наукова конференція ІЯД НАН України 28 січня – 1 лютого 2013 р.: Тези доповідей. – 2013. – С. 112

АНОТАЦІЯ

Малий Є. В. Властивості дефектів структури у фосфіді галію та їхній вплив на параметри світлодіодів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 «фізика твердого тіла» - Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, Одеса, 2019

Дисертаційна робота присвячена вивченню властивостей вихідних світлодіодів GaP і впливу радіаційних дефектів на спектри електролюмінесценції та вольт-амперні характеристики цих об'єктів. Опромінення зразків різними дозами проводилося електронами з $E = 2$ MeV на прискорювачі ИЛУ-6 та швидкими нейтронами дослідницького ядерного реактора ВВР-М.

На представлених спектрах електролюмінесценції основною смугою випромінювання зелених GaP-діодів слід вважати лінію $h\nu = 2,175$ eV (NN_1) із фононними повтореннями. Вона відповідає рекомбінації екситона, зв'язаного на парі сусідніх атомів азоту, які ізоелектронно заміщують фосфор у ґратці GaP. Її інтенсивність значно вища, ніж у лінії екситона $h\nu = 2,313$ eV, локалізованого на атомі N. Встановлено, що при зростанні струму через р-n-перехід відбувається перерозподіл цих ліній.

Залежність інтенсивності випромінювання основних ліній спектру від рівня інжекції носіїв струму свідчить, що пік $h\nu = 2.254$ eV генетично пов'язаний із лінією фонона зв'язаного на ізольованому атомі азоту: зростання інтенсивності лінії N при

зростанні струму через p - n перехід тягне за собою збільшення піка $h\nu = 2,26$ eV. Тому очевидно, що максимум $h\nu = 2.54$ eV є фононним повторенням лінії N за участю оптичного фонона, енергія якого близька до $h\nu = 0.053$ eV

У роботі наведено модель зв'язку зонної структури кристала GaP з виникненням S- та N-подібностей на вольт-амперних характеристиках при низьких температурах.

Зроблено оцінки зміни концентрації глибоких рекомбінаційних рівнів у досліджуваних об'єктах внаслідок опромінення електронами з $E = 2$ MeV. Визначено коефіцієнт пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду при електронному опроміненні ($k_t = 1.5 \cdot 10^7$ с \cdot см $^{-2}$). Виявлено, що відновлення інтенсивності свічення опромінених зразків у процесі ізохронного відпалу – двостадійне, причому нагрівання до температури, вищої за 350 $^{\circ}$ C, супроводжується як деструкцією p -області діода, так і погіршенням оптичного пропускання матеріалу лінзи.

Наведено результати досліджень зворотних електрофізичних характеристик вихідних та опромінених електронами з $E = 2$ MeV червоних та зелених фосфід-галієвих світлодіодів. Виявлено, що зворотний струм зумовлений переважно тунелюванням носіїв при $U_{зб} \leq 9$ В та лавинним множенням при $U_{зб} \geq 13$ В; у межах $U = 9 \div 13$ В беруть участь обидва механізми. Зростання струму в області високих напруг ($U_{зб} > 19$ В) обмежується опором базової частини діода. При значних зворотних струмах ($I > 1$ mA) опромінення діодів призводить до зсуву зворотних вольт-амперних характеристик у бік більших напруг. Зростання прямого струму на низьковольтній ділянці опромінених зразків зумовлене перерозподілом спаду напруг на базі та p - n -переході.

Установлено, що опромінення нейтронами призводить до монотонного гасіння усіх компонент електролюмінісцентного спектру, причому найбільш чутливим до радіації є випромінювання екситона, зв'язаного на ізольованому атомі азоту. Модель дислокаційного тунелювання дозволила оцінити густину дислокацій у збідненій частині p - n -переходу. Для вихідних зелених діодів ця величина близька до $7,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$; для червоних $\rho_D = 4 \cdot 10^8$ см $^{-2}$. Опромінення нейтронами суттєво не впливає на ρ_D червоних світлодіодів. 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”.

У роботі досліджувався вплив ультразвукової обробки на електролюмінесценцію вихідних та опромінених електронами з $E = 2$ MeV, $\Phi = 8,24 \cdot 10^{14}$ e/см 2 світлодіодів, вирощених на основі твердого розчину GaAs – GaP. Виявлено, що інтенсивність свічення оброблених ультразвуком (УЗ) зразків у процесі тривалого зберігання ($t = 12$ год) зростає; проходження струму через діод породжує релаксаційний процес падіння яскравості випромінювання з наступним зростанням при ввімкненні УЗ. Наведено результати розрахунків густини дислокацій, відповідальних за гасіння електролюмінесценції у межах деградаційної

ділянки свічення. Виявлено особливості реакції опромінених електронами зразків на дію ультразвуку.

ABSTRACT

Ye. V. Malyi. Properties of the gallium phosphide structural defects and their influence on LEDs parameters – Qualifying scientific work on the manuscripts rights

Thesis for the of physical and mathematical sciences degree candidate (PhD) in the specialty 01.04.07 "Solid State Physics" - State institution "Southern Ukrainian National Pedagogical University named after. K. D. Ushinskyi, Odesa, 2019

This work is devoted to the study of the output properties of the GaP light sources 'emitting diodes' (LEDs) and the influence of radiation defects on the electroluminescence spectra and current-voltage characteristics of these objects. The specimens were irradiated by different doses of electrons with $E = 2$ MeV at the accelerator ILU-6 and by fast neutrons of the research reactor WWR-M.

It should be considered that the line $h\nu = 2,175$ eV (NN_1) with phonon replica is the main emitting band on the represented electroluminescence spectra of green GaP-diodes. It corresponds to the recombination of the exciton, bound to a the pair of adjacent nitrogen atoms, which isoelectronically replace phosphorus in a GaP lattice. Its intensity is much higher than intensity of the line $h\nu = 2,313$ eV of exciton, localized on the atom N. It was established that with increasing in the current through the p-n-junction there is a redistribution of these lines' intensities occurs.

The dependence of the radiation emitting intensity of the spectrum main line on the level of injection of current charge carriers indicates that the peak $h\nu = 2.254$ eV is genetically associated with a line of exciton, bound on an isolated nitrogen atom: the increase in the intensity of the line N at an increase in the current through the p-n transition entails an increase in the peak $h\nu = 2.26$ eV. Therefore, it is obvious that the maximum $h\nu = 2.554$ eV is a phonon repetition replica of the line N with the participation of an optical phonon, whose energy is close to $h\nu = 0.053$ eV.

The paper presents a coupling model of the connection of GaP crystal structure with appearance of the S- and N-similarities in volt-ampere current-voltage characteristics at low temperatures.

Estimates have been made of the deep levels recombination concentration's changes due to LED's irradiation with by electrons with $E = 2$ MeV in the investigated objects. The life time damage coefficient of non-main minority charge carriers with for electronic irradiation is determined ($k_\tau = 1.5 \cdot 10^7$ s · cm⁻²). It was found that the light emitting intensity's restoration in the irradiated samples in the isochronous annealing process is two-stage, and heating to a temperature higher than 350 C is accompanied by both the the diode p-region destruction and the optical transmission deterioration of the lens material.

The results of the study of reverse electrophysical current-voltage characteristics of red and green phosphide-gallium LEDs, irradiated by 2 MeV electrons are presented. It

was found that at the reference voltage value $U_r \leq 9$ V the reciprocating current is mainly due to the carriers tunneling and at $U_r \geq 13$ V - due to the avalanche multiplication; within both $U = 9 \dots 13$ V both mechanisms are involved. Current increase in at the higher voltage ($U_r > 19$ V) is limited of by the diode base part resistance. At significant return reverse currents ($I > 1$ mA) irradiation of diodes results in a shift of reciprocating volt-ampere current- voltage characteristics towards higher voltages. The direct current growth in the low-voltage region of irradiated samples is due to the voltage drop redistribution on at the base and p-n-junction.

It has been established that neutron irradiation results in monotonically extinguishing of all components of the electroluminescent spectrum, and the radiation most sensitive to radiation is the exciton bonded to an isolated nitrogen atom. and emitting of exciton bonded to an isolated nitrogen is the most sensitive to radiation. The model of dislocation tunneling allowed us to estimate the dislocation density in the depleted part of the *p-n*-junction. For green diodes this value is close to $\rho_D = 7.5 \cdot 10^{10}$ cm⁻²; for red $\rho_D = 4 \cdot 10^8$ cm⁻². Neutron exposure irradiation does not significantly affect ρ_D of red LEDs. The disordered areas introduced by neutrons can not significantly affect the value of the direct current tunnel component by increasing the density of dislocations, since radiation defects of this kind are capable to blocking the flow of current along tunnel shunts.

The ultrasonic processing effect on the light emitting diodes electroluminescence emission of LEDs grown on the based of a solid GaAs-GaP solution (initial and irradiated by electrons with $E = 2$ MeV, $\Phi = 8.24 \cdot 10^{14}$ e/cm²) of was also studied. It was found that the emitting intensity of the ultrasound-processed loaded ultrasound samples in the process of prolonged storage ($t = 12$ h) increases; current through diode causes generates the process of the falling emitting brightness radiation relaxation with and subsequent growth with the ultrasound inclusion. The calculation results of dislocations' density responsible for extinguishing of electroluminescence within the degradation region limits of the luminescence are presented. The peculiarities of the ultrasound influence on samples irradiated with electrons are revealed.