

ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМ. ЛЕСІ УКРАЇНКИ

На правах рукопису

ВЕРНИДУБ РОМАН МИХАЙЛОВИЧ

РАДІАЦІЙНІ ДЕФЕКТИ В ФОСФІДІ ГАЛІЮ ТА ФОСФІДІ ІНДІЮ  
І ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.

ОІ.04.10 - фізика напівпровідників і діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук





00743865 (X)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному педагогічному університеті ім. М.П. Драгоманова та відділі радіаційної фізики Інститута ядерних досліджень АН України.

Наукові керівники: - доктор фізико-математичних наук,  
професор І.І. Тичина  
- доктор фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
В.П. Тартачник

Офіційні опоненти: - доктор фізико-математичних наук,  
професор Г.Є. Давидюк  
- кандидат фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
В.І. Хіврич

Провідна організація - Інститут фізики АН України, м.Київ.

Захист відбудеться "20" грудня 1996 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.02.01 при Волинському державному університеті ім. Лесі Українки. (263009, м.Луцьк, проспект Волі, 13).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Волинського державного університету, (м.Луцьк, проспект Волі, 13).

Автореферат розіслано "15" листопада 1996 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Божко В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

### АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.

Сполуки АЗВ5 знайшли широке застосування у напівпровідниковій техніці та оптоелектроніці у вигляді світлодіодних матриць, фотодіодів, сонячних елементів, діодів Ганна, оптронів та ін. Створення нових технологій ґрунтується як на розробці новітніх методів синтезу кристалів, так і на використанні впливу зовнішніх факторів з метою корекції параметрів вирощеного напівпровідника в потрібних межах. Суттєву роль у формуванні заданих характеристик кристала мають дефекти структури і опромінення швидкими частинками є найбільш зручним методом їх введення. Проникаюча радіація також може бути інструментом, з допомогою якого можна моделювати різноманітні процеси у невпорядкованих об'єктах.

### ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ТА МЕТА РОБОТИ.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених вивченню структурних пошкоджень у фосфіді галію та фосфіді індію, до сьогоднішнього дня не існує єдиної думки відносно властивостей і поведінки як точкових, так і складних дефектів. Особливо неоднозначними є результати досліджень пошкоджень вакансійного типу у фосфіді галію. Не можна також вважати цілком остаточною літературні дані, що стосуються термічної стабільності цих дефектів у фосфіді індію.

Тому у представленій роботі основним завданням було одержання інформації про вакансії у досліджуваних об'єктах, вплив простих і складних порушень структури на оптичні характеристики фосфіду галію, які для цього напівпровідника є визначальними у зв'язку з його широким застосуванням в оптоелектронних пристроях.

Автор також ставив за мету одержати інформацію про механізм взаємодії акустичної хвилі із порушеннями структури, виявити реакцію дефектів кристалічної ґратки на дію ультразвукового навантаження і на основі одержаних результатів розробити способи відтворення властивостей опромінених зразків. Одночасно розв'язувалась задача

покращення оптичних і люмінесцентних характеристик світлодіодів за допомогою комбінованих способів обробки дефектних кристалів.

#### НАУКОВА НОВИЗНА.

1. Досліджено особливості деградації оптичного поглинання кристалів фосфіду галію, опроміненних важкими зарядженими частинками. Встановлено, що відпал опроміненних зразків сприяє формуванню дефектів, оптично активних в області фундаментального поглинання.
2. Використання методу анігіляції позитронів дало можливість визначити характерні параметри вакансійних дефектів у фосфіді галію та фосфіді індію, дослідити їхню термічну стабільність, одержати інформацію про виникнення термодфектів при високих температурах.
3. Виявлено ефект ультразвукового очищення опроміненних зразків від радіаційних порушень структури.
4. Показано, що за допомогою комбінованої акусто-термічної обробки можна змінювати ефективність випромінювальної рекомбінації світлодіодів.

#### ТЕОРЕТИЧНЕ І ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.

1. Результати, одержані при виконанні дисертаційної роботи, можуть бути застосовані в ядерній технології напівпровідників та при розробці, конструюванні і виготовленні напівпровідникових приладів; для прогнозування і розрахунків радіаційної стійкості електронних пристроїв, покращення якості існуючих приладів, уніфікації їхніх параметрів.
2. Результати, одержані при вивченні взаємодії ультразвукової хвилі з дефектами кристалу, можуть бути корисними при розробці принципово нових методів корекції характеристик напівпровідників та приладних структур, а також методів відновлення параметрів опроміненних об'єктів.
3. Розроблено спосіб підвищення прозорості монокристалів фосфіду галію.
4. Розроблено спосіб відновлення інтенсивності електро-

люмінесценції деградованих фосфід-галієвих світлодіодів.

#### АПРОБАЦІЯ РОБОТИ.

Основні результати роботи доповідались на семінарах відділу радіаційної фізики ІЯД АН України (Київ, 1988-1995), на VI Республіканській конференції "Фізичні проблеми інтегральної МШП-електроніки" (Севастополь, 1990), на XII Всесоюзній конференції з фізики напівпровідників (Київ, 1990), на республіканській науково-технічній конференції "Перспективні матеріали твердотільної електроніки. Твердотільні перетворювачі в автоматичі та робототехніці" (Мінськ, 1990), на I Міжвузівській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1991), на Всесоюзному семінарі "Позитронна анігіляція в твердих тілах" (Обнінськ, 1991), на Українській фізичній конференції (Львів, 1991), на V Міжнародній конференції "Акустоелектроніка-91" (Варна, 1991), на Всесоюзній конференції "Фізична хімія і технологія фосфідів" (Алма-Ата, 1992), на II Українській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1993), на VI науково-технічному семінарі по фосфору "Наукові і матеріалознавчі проблеми хімії фосфору і його неорганічних сполук" (Львів, 1993), на Національній конференції по акустоелектроніці (Москва-С.-Петербург, 1994), на I Міжнародній конференції по халькогенідних та алмазоподібних напівпровідниках (Чернівці, 1994), на науково-технічній нараді "Технологія фосфідів і фосфорних оплавів, їх властивості і застосування" (С.-Петербург, 1995).

#### ПУБЛІКАЦІЇ.

По матеріалах дисертації опубліковано 18 друкованих праць у міжнародних, вітчизняних журналах, збірниках, матеріалах і тезах конференцій, нарад та семінарів, зареєстровано 2 винаходи. Матеріали дисертації також ввійшли в науково-технічні звіти ІЯД АН України.

#### СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ РОБОТИ.

Дисертаційна робота викладена на 223 сторінках

машинопису, містить 45 малюнків, 3 таблиці, список використаної літератури з 200 найменувань. Робота складається із вступу, літературного огляду, методичної частини, трьох оригінальних розділів, підсумків (основні результати і висновки), а також містить список літератури.

#### ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК АВТОРА.

Дисертант самостійно ставив і вирішував окремі завдання дослідження, вибирав необхідні методики, виходячи з мети роботи. Автором особисто отримані всі основні експериментальні дані, він приймав безпосередню участь у розрахунках, обговоренні та інтерпретації результатів досліджень.

#### ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність теми, визначається мета та основні завдання роботи, формулюється наукове та практичне значення. Приводяться основні положення дисертації, які виносяться на захист.

В першому розділі розглянуто процеси радіаційного дефектоутворення в кристалічних тілах під дією різних видів опромінення, а також міститься огляд робіт, присвячених вивченню радіаційних дефектів у фосфіді галію та фосфіді індію. Окремо розглянуто публікації, в яких досліджувалися процеси взаємодії акустичних хвиль з дефектним середовищем напівпровідникових кристалів.

У другому розділі описані способи виготовлення, опромінення та підготовки зразків для досліджень. Представлено також коротку характеристику та опис використаних в роботі методів комбінованої обробки: акусто - термічного, акусто - інжекційного, інжекційно-термічного, та методів дослідження - анігіляції позитронів, оптичного поглинання, ефекту Холла та електролюмінесценції. Комбінована обробка вихідних та опромінених зразків проводилася за допомогою поздовжніх ультразвукових хвиль в неперервному режимі. При цьому температура змінювалася в межах 77 - 700 К.

Час життя позитронів вимірювався при кімнатній

температурі на установці швидко-швидких співпадінь із робочим розділенням  $FWHM = 280$  пс. Як джерело позитронів використовувалася радіоактивна сіль  $NaCl$  з активністю  $10 \text{ мкКи}$ . Експериментальні спектри оброблялися за програмою  $POSITRON \text{ FIT EXTENDED}$  з розкладом на одну чи дві компоненти. Використовувався комп'ютер типу  $PC/AT$ , під'єднаний в режимі "on line" до спектрометра часу життя позитронів.

Для визначення концентрації і рухливості носіїв струму використовувався метод ефекту Холла в режимі постійного струму через зразок в області слабких магнітних полів.

Універсальний комплекс  $KCBY-2$ , створений на основі монохроматора  $MIP-23$  та ЕОМ "Електроніка ДЗ-28" застосовується для досліджень оптичних та електролюмінесцентних властивостей кристалів. Спектральні залежності реєструвалися при кімнатних температурах.

Вимірювання проводилися на зразках, опромінені нейтронами реактора ( $E = 2 \text{ MeV}$ ),  $\alpha$ -частинками ( $E = 80 \text{ MeV}$ ), електронами ( $E = 1 - 14 \text{ MeV}$ ) та  $\gamma$ -квантами  $Co^{60}$ .

У третьому розділі приведені результати дослідження вакансій радіаційного походження у зразках фосфіду галію і фосфіду індію. Особлива увага звертається на вивчення процесів відпалу, взаємодії вакансій у нагрітому зразку та відновленні оптичного пропускання кристала з попередньо деградованим радіацією краєм поглинання. Встановлено, що в неопромінені кристалах фосфіду галію час життя позитронів складає  $\tau = 223$  пс. У вихідних кристалах  $GaP$  концентрація вакансійних дефектів становить  $C_v = 6.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Опромінення зразків  $\alpha$ -частинками приводить до зростання середнього часу життя до  $\bar{\tau} = 250$  пс за рахунок збільшення концентрації дефектів вакансійного типу, до величини  $C_v = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В процесі ізохронного відпалу вихідних та кристалів із радіаційними порушеннями встановлено, що час життя позитронів змінюється на протязі трьох стадій:  $200-400^\circ\text{C}$ ,  $550-700^\circ\text{C}$  та  $750-900^\circ\text{C}$ . Характерною особливістю для кривої відпалу є наявність від'ємної стадії ( $550-700^\circ\text{C}$ ) - із зростанням температури відпалу  $\bar{\tau}$  збільшується, а також відсутність стадії  $160-180^\circ\text{C}$ , на якій зникають вакансії фосфору - дефекти, що компенсують електропровідність  $n$ - $GaP$ .

Не виявлено  $\gamma$  і при відпалі кристалів, опроміненіх нейтронами. Показано що, стадія відпалу вакансій фосфору добре проявляється в слабо опроміненіх зразках, де переважають точкові дефекти, і відсутня в більш компенсованих кристалах з високою концентрацією складних порушень ґратки.

Встановлено, що в сильно опроміненіх зразках антіґляція позитронів головним чином відбувається на вакансійних утвореннях у підґратці галію. Існування від'ємної стадії відновлення в області високих температур ( $550-700^{\circ}\text{C}$ ) пов'язане з формуванням позитронно-чутливих центрів, концентрація яких близька до  $C_v = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Цей процес починається після завершення відпалу ізольованих вакансій галію.

На третій стадії відбувається остаточна очистка кристалу від дефектів вакансійного типу.

Оцінки, проведені для кристалів фосфіду Індію, опроміненіх високоенергетичними електронами ( $E = 10 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 10^{18} \text{ e/cm}^2$ ) показують, що при кімнатній температурі концентрація введених вакансійних порушень становить  $C_v = 2.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Вимірювання часу життя позитронів при ізохронному відпалі  $\text{InP}$ , опроміненого електронами з  $E = 10 \text{ MeV}$  показує, що область температурної нестабільності електропровідності співпадає із стадією відпалу вакансійних дефектів, впродовж якої ( $50-200^{\circ}\text{C}$ ) час життя позитронів зменшується з  $\bar{\tau} = 245 \text{ пс}$  до  $\bar{\tau} = 235 \text{ пс}$ . Концентрація центрів захвату позитронів стає близькою до  $C_v = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В інтервалі температур відпалу  $200-300^{\circ}\text{C}$  спостерігається зменшення інтенсивності розсіяння носіїв струму і відбувається незначне зростання часу життя позитронів  $\bar{\tau}$ , що може свідчити про перегрупування вакансійних комплексів у дивакансії, чи може навіть у складніші вакансійні дефекти, але із меншим ефективним зарядом. Такі утворення також не можна вважати достатньо термостабільними - вони зникають вже при  $400^{\circ}\text{C}$ , повністю завершуючи цим самим розпад вакансійних порушень структури як введених радіацією, так і породжених високотемпературною

обробкою в процесі відпаду. При  $550^{\circ}\text{C}$  швидкість захоплення позитронів стає рівною  $k=3.9 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ , вказуючи на зменшення числа дефектів до величини  $C_v=2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Так як ізольовані вакансії фосфору та індію в InP - нестабільні при кімнатній температурі, то в опроміненних кристалах n-InP при 300 K основними позитронно-чутливими центрами повинні бути вакансійні комплекси та складні дефектні утворення, локалізовані переважно у підгратці індію.

Для опроміненого GaP в області зона-зонних переходів чіткий край поглинання відсутній - в межах довжин хвиль 550-1000 нм спостерігається лише монотонне зростання додаткового поглинання. Відмінності у спектрах для зразків, опроміненних електронами і  $\alpha$ -частинками проявляються в різному нахилі та неоднаковому зсуві краю оптичного поглинання в довгохвильову область спектра.

Спостерігається також суттєва відмінність в характері відпаду. У зразках, опроміненні  $\alpha$ -частинками, зростання нахилу краю поглинання відбувається повільніше, ніж для кристалів опроміненні електронами. Початкова стадія  $80-130^{\circ}\text{C}$  зв'язана із зникненням дефектів, енергія утворення яких нижча порогової. На стадії  $200-300^{\circ}\text{C}$  стають рухливими вакансії Ga. Існування трьох стадій відновлення  $300-370^{\circ}\text{C}$ ,  $400-450^{\circ}\text{C}$ ,  $475-520^{\circ}\text{C}$  може свідчити про присутність в обох зразках комплексів точкових дефектів, які мають різну природу.

Показано, що високотемпературне зростання прозорості монокристалів фосфіду галію зв'язане із утворенням комплексу вакансії з атомами атмосферних домішок.

У розділі 4 розглянуто вплив ультразвукових хвиль на електрофізичні характеристики та електролюмінесценцію фосфіду галію та фосфіду індію.

На початку розділу приведені основні теоретичні відомості, які стосуються процесів акустостимульованої взаємодії точкових та лінійних дефектів на основі струнної моделі Гранато-Лукке. Розглянуто механізм переповзання дислокацій, виникнення точкових дефектів та їх поглинання дислокаційними лініями, коротко проаналізовано ефекти, які

супроводжують введення ультразвуку в зразок - акустолюмінесценцію, акустофотопровідність, та ін. Детально висвітлено механізм поглинання ультразвуку кристалом, внаслідок чого дислокація приходить в рух, створюючи передумови для зміни концентрації дефектів у зразку.

Особливістю сполук АЗВ5 є виникнення в них електричних полів при введенні ультразвукової хвилі, що додатково може стимулювати рух наявних пошкоджень, змінювати енергію активації відпалу та ін. Процес взаємодії ультразвуку із дефектами, введеними електронами з  $E = 1 \text{ MeV}$  ( $\Phi = 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) досліджувався на прикладі кристалів фосфіду індію. Показано, що озвучення зразків InP хвилею помірної потужності (до  $10^3 \text{ Вт/м}^2$ ) сприяє покращенню його електричних параметрів - концентрація і рухливість носіїв струму в кристалі зростають; при  $W = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  рухливість зменшується, вказуючи на виникнення дефектів ультразвукової природи.

Ультразвуковий відпал, як правило, не дає можливості забезпечити достатньо повне очищення кристала від точкових дефектів внаслідок нагромадження при акустичній обробці лінійних порушень структури та складних комплексів з високою енергією активації відпалу. Тому доцільно одночасно із озвучуванням кристалу підвищувати його температуру.

Результати досліджень акусто-термічного відпалу опромієних зразків фосфіду індію показали, що ефект ультразвукової обробки проявляється у розщепленні стадії відпалу на дві підстадії і у відповідному зниженні енергії активації відпалу. Акусто-термічне відновлення концентрації носіїв струму та електропровідності досліджуваних кристалів відбувається впродовж трьох стадій:  $100-140^\circ\text{C}$ ,  $160-220^\circ\text{C}$  та  $240-260^\circ\text{C}$  (в неопромієному зразку - стадії з центром при  $160^\circ\text{C}$  та при  $280^\circ\text{C}$ ). Спостерігається також зсув стадій в бік нижчих температур. Отже, акустична напруга, приводячи до додаткового поглинання енергії в області дефекту, може стимулювати його руйнування, або прискорювати його рух до стоків.

Так як рухливість точкових дефектів у фосфіді галію значно нижча порівняно із фосфідом індію, ефект озвучування монокристалів GaP має дещо інший характер. Дійсно, висока термостабільність радіаційних дефектів створює умови для

інтенсивнішого нагромадження дефектів ультразвукової природи, що знижує електропровідність кристалу вже на початкових етапах озвучування. Крім згаданого процесу зростає ймовірність створення термостабільних скупчень радіаційних дефектів.

Ефективність електролюмінесцентного випромінювання основною мірою залежить від наявності точкових дефектів у безпосередній близькості від р-п- переходу і в значній мірі в р- області діода. Екситонна компонента випромінювання найбільш чутливо реагує на їхню концентрацію і тому використання невеликих доз ультразвуку може суттєво змінити її інтенсивність у бік зростання яскравості свічення.

Виявлено, що з допомогою ультразвуку можна досягти прискорення процесів відпалу опромінених зразків - ефект акусто-стимульованої дифузії радіаційних дефектів. При цьому оптимальними режимами обробки є:  $\dot{V} = 1 \text{ МГц}$ ,  $W = 10 - 10^3 \text{ Вт/м}^2$ ,  $t = 15-20 \text{ хвилини}$ ,  $T = 120^\circ \text{ С}$ . Встановлено, що виявлений ефект має резонансний характер і при відхиленні частоти ультразвуку від потрібної для відновлення свічення швидко наростають негативні деградаційні явища.

Особливістю акусто-стимульованого відпалу опромінених зразків є зростання позитивного ефекту очищення зразка від безвипромінювальних центрів при зворотньому змищенні діода.

Дослідження відпалу озвучених кристалів показали, що руйнування дефектів структури лінійного типу у фосфіді галію починається при  $T = 400^\circ \text{ С}$ .

У п'ятому розділі розглянуто застосування результатів досліджень для поліпшення якості матеріалів оптоелектронної техніки. Встановлено, що з допомогою процесу термообробки можна зменшити концентрацію дефектів, які впливають на білякрайове поглинання фосфиду галію і таким чином збільшити прозорість кристала. В роботі показано, що акусто-термічна обробка опромінених GaP-світлодіодів, створюючи передумови для акусто-стимульованої дифузії дефектів радіаційної природи і зменшуючи енергію активації відпалу основної стадії, збільшує ефективність електролюмінесценції деградованих приладів ( в середньому на 80 % ).

Запропонований винахід дозволяє відновлювати

характеристики приладів, підвищувати їх радіаційну стійкість та подовжувати експлуатаційний ресурс.

#### ПІДСУМКИ .

1. Вакансії фосфору, введені при протонному бомбардуванні фосфіду галію ( $E = 80 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ), знаходяться в складі позитивно зарядженого комплексу.

2. Основними позитронно-чутливими центрами радіаційного походження в GaP є нейтральні, або від'ємно-заряджені вакансії галію;  $V_{Ga}$  можуть перебувати як в ізольованому стані, так і утворювати комплекси з домішками, або іншими власними дефектами.

3. Концентрація вакансійних порушень ґратки в опроміненіх протонами ( $E = 80 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) кристалах фосфіду галію становить величину  $C_v = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

4. У процесі відпалу ізольовані  $V_{Ga}$  зникають в інтервалі температур  $200 - 550^\circ \text{ C}$ . При  $T = 550 - 700^\circ \text{ C}$  руйнується комплекс, до складу якого входять  $V_{Ga}$ . Такі дефекти грають роль додаткових центрів захвату позитронів.

5. Повна очистка фосфіду галію від вакансійних порушень ґратки закінчується при  $900^\circ \text{ C}$ .

6. Відновлення оптичного пропускання опроміненіх кристалів GaP на початковій стадії ( $200-300^\circ \text{ C}$ ) обумовлена міграцією  $V_{Ga}$  до стоків.

7. Ізольовані  $V_{Ga}$  та  $V_P$  в InP - нестійкі при кімнатній температурі; основними позитронно-чутливими дефектами в цих кристалах є вакансійні комплекси, їхня концентрація у вихідних зразках становить  $C_v = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

8. Основними пастками позитронів при кімнатній температурі в опроміненому електронами фосфіді індію ( $E = 10 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) є складні вакансійні утворення з концентрацією  $C_v = 2.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

9. Встановлено, що ультразвукова обробка кристалів фосфіду індію, які містять радіаційні дефекти, приводить до часткового відновлення електропровідності. При цьому порогова потужність ультразвукової хвилі на частоті  $\nu = 17 \text{ МГц}$  становить  $0.5 - 1 \text{ Вт/см}^2$ . Збільшенню величини відновлення перешкоджає формування вторинних дефектів з

високою енергією активації відпалу.

10. Взаємодія ультразвукової хвилі із дефектами кристалу носить квазірезонансний характер: прискорюється відпал окремих груп дефектів, що проявляється у розпаді стадії відпалу на дві підстадії: 100 - 140°С та 160 - 220°С. Центр підстадії з нижчою енергією активації виявляється зсуnutим в бік нижчих температур.

11. Ультразвукова обробка опроміненого фосфіду галію при великих часах експозиції ( $t > 20$  хв.) приводить до генерації дефектів акцепторного типу і компенсації електропровідності. Внаслідок утворення високотемпературних комплексів стадія відпалу виявляється зсуною в бік вищих температур.

12. Вплив ультразвукової хвилі на порушення структури кристалу фосфіду галію визначається дією двох механізмів передачі енергії дефекту - деформаційного і електричного.

13. Малі дози ультразвуку ( $\nu = 1$  МГц,  $W = 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t = 20$  хвилин) збільшують квантовий вихід випромінюючих структур. Ефект обумовлений очищенням збідненої області р-п-переходу від точкових дефектів рухомими дислокаціями.

14. Зворотнє зміщення р-п-переходу стимулює рух дислокацій і сприяє зменшенню в ньому концентрації точкових порушень структури.

15. Встановлено, що відпал лінійних дефектів - дислокацій у фосфіді галію відбувається в інтервалі температур 400 - 500°С.

16. Термообробка кристалів фосфіду галію в інтервалі температур 600 - 650°С при тривалості відпалу 3 години приводить до збільшення їхньої прозорості в 1.5 раза.

17. Зростання оптичного пропускання обумовлене відпалом структурних дефектів в об'ємі напівпровідника та утворенням просвітлюючої плівки на його поверхні.

18. Ефективне збільшення інтенсивності випромінювальної рекомбінації опромінених світлодіодів GaP досягається обробкою зразка при  $T = 120^\circ\text{C}$  ультразвуковою хвилею з частотою  $\nu = 1$  МГц, потужністю  $W = 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> на протязі  $t = 20$  хвилин.

19. В основі методу термо-акустичного відновлення свічення лежить ефект акусто-стимульованої дифузії точкових дефектів структури.

Основні результати опубліковані в роботах:

1. Виникнення складних дефектів у кристалах фосфіду галію при терморадіаційній обробці./Р.М.Вернидуб, В.І.Куц, П.Г.Литовченко, В.Я.Опілат, В.П.Тартачник, І.І.Тичина // УФЖ.- 1991, т. 36, № 5, с.776-778.

2. Вплив дефектів ультразвукового походження на електролюмінесценцію у фосфіді галію / Р.М.Вернидуб, Я.М.Оліх, П.Г.Литовченко, В.П.Тартачник, І.І.Тичина // УФЖ.- 1995.-т.40, №8.-с.886-890.

3. Вивчення вакансійних дефектів в опромінених кристалах фосфіду галію методом анігіляції позитронів. / Р.М.Вернидуб, О.І.Гірка, А.П.Кудін, В.П.Тартачник, І.І.Тичина // УФЖ.-1996.-т.41, №9/10.-с.873-875.

4. АС N 1697567. Спосіб термообработки кристаллов фосфида галлия. Р.М.Вернидуб, В.П.Тартачник, И.И.Тичина, В.І.Куц, В.Г.Макаренко, П.Г.Литовченко, 1991.

5. АС N 1795818. Спосіб обробки фосфид-галлиевых светодиодов. Р.М.Вернидуб, В.П.Тартачник, И.И.Тичина, Я.М.Оліх, В.І.Куц, П.Г.Литовченко, 1992.

6. Влияние глубоких уровней на эффективность фосфида-галлиевых светодиодов/Р.М.Вернидуб, В.В.Волков, П.Г.Литовченко, И.Т.Мегела, В.Я.Опілат, В.П.Тартачник, И.И.Тичина//Тезиси УІ Республіканської конф. "Фізическіе проблемы МПП-интегральной электроники", (Севастополь, июнь, 1990г.), стр.41.

7. Использование аннигиляционного  $\gamma$ -излучения для исследования радиационных дефектов в фосфиде галлия и дифосфиде кадмия./Р.М.Вернидуб, А.И.Гирка, С.Б.Косьяк, В.П.Тартачник, И.И.Тичина //Вопросы точности ядерной спектроскопии, Вильнюс 1990, ИФ ЛитАН, научный совет по ядерной спектроскопии АН СССР, стр.161-165.

8. Влияние радиационно-термической обработки на свойства фосфида галлия./Р.М.Вернидуб, П.Г.Литовченко, В.И.Куц, В.Я.Опілат, И.И.Тичина//Тезиси XII Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Киев, 23-25 октября 1990г., стр.283-284.

9. Влияние высокотемпературного облучения на пространственное распределение неоднородностей в GaP./Р.М.Вернидуб, П.Г.Литовченко, В.Я.Опілат, В.П.Тартачник, В.Г.Макаренко, И.И.Тичина//Тезиси н.-т.конференции "Перспективные материалы

твердотельной электроники.Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике",г.Минск, 1990г.,стр.55-56.

10.Радиационные дефекты в GaP, образованные е- с E=4-14 МэВ и нейтронами реактора./ Р.М.Вернидуб, В.К.Дубовой, И.Г.Мегела, В.П.Тартачник, И.И.Тичина // Тезисы докладов I Межвузовской конференции "Материаловедение и физика полупроводниковых фаз переменного состава", Нежин-91,стр.17.

11.Анигиляция позитронов в монокристаллах GaP и InP, содержащих высокую концентрацию дефектов./В.Т.Адонкин,Р.М.Вернидуб,А.И.Гирка,И.Г.Мегела,Б.П.Тартачник,И.И.Тичина//Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Позитронная аннигиляция в твердых телах", Обнинск,10-12.IX.91, стр.38.

12.Влияние комбинированной радиационно-термической обработки на электрооптические свойства фосфида галлия./Р.М.Вернидуб,В.И.Куц,В.Я.Опилат,М.Б.Шинковская, В.П.Тартачник,И.И.Тичина//Материалы конференции "Физическая химия и технология фосфидов", -Алма-Ата:Гылым, 1992г.,ч.2, стр.93.

13.Влияние комбинированной термоакустической обработки на электрофизические свойства InP" /Р.М.Вернидуб, В.Г.Макаренко, Я.М.Олих, В.П.Тартачник, И.И.Тичина // Материалы конференции "Физическая химия и технология фосфидов", -Алма-Ата:Гылым, 1992г., ч.2, стр.91.

14.Використання методу анігіляції позитронів для дослідження зарядового стану та термічної стабільності вакансійних дефектів в опроміненому GaP. /Р.М.Вернидуб, О.І.Гірка,П.Г.Литовченко, В.Я.Опилат, В.П.Тартачник, І.І.Тичина // Тези доповідей II Української конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу", Ніжин, 21-24.IX.93, ч.2, стор. 185-189.

15.Вплив комбінованої обробки на фосфід-галієві р-п-структури. /Р.М.Вернидуб, В.П.Тартачник, І.І.Тичина, Я.М.Оліх // Матеріали VI н.-т. семінару "Наукові і матеріалознавчі проблеми хімії фосфору і його неорганічних сполук" (Фосфор України-93), Львів, 27-30.XI.93, стор.115.

16.Thermoacoustic annealing of radiation-induced defects in the indium phosphide crystals / Ya.M.Olikh, V.P.Tartachnik, I.I.Tichyna, R.M.Vernidub // Fifth international conference "ACOUSTOELECTRONICS 91",

september 10-13, 1991 yr., VARNA, BULGARIA, p.95-97.

17. Acoustoinjective annealing of radiation defects in the gallium phosphide p-n-structures / R.M.Vernidub, V.I.Kuts, Ya.M.Olikh, V.P.Tartachnik, I.I.Tichyna // Abstracts of national Conference on Acoustoelectronics, 17-24, May 1994, Moscow-SunetPetersburg, p.97.

18. Акусто-інжекційний відпал радіаційних дефектів у фосфіді галію/Р.М.Вернидуб, В.П.Тартачник, І.І.Тичина, Я.М.Оліх, В.І.Куц, П.Г.Литовченко//Мат.І Міжн.Конф.по халькогенідним та алмазоподібним напівпровідникам, Чернівці, 1994.-с.141.

19. Positron annihilation in the irradiated indium phosphide crystals/R.M.Vernidub, O.I.Girka, I.G.Megela, V.P.Tartachnik, I.I.Tichyna //Abst.Int.Sonf. on Material Science of Chalcogenide and Diamond-Structure Semiconductors, 1994,Chernivtsi,p.168.

20. Влияние акустической обработки на электрофизические свойства облученного фосфида галлия / Р.М. Вернидуб, В.П. Тартачник, И.И. Тичина, Я.М. Олих // (Материаллы) научно-технического совещания "Технология фосфидов и фосфоросодержащих сплавов, их свойства и применение", ("Фосфиды 95"), 28-30.IX, Санкт-Петербург 1995.

#### А Н Н О Т А Ц И Я .

Вернидуб Р.М. Радиационные дефекты в фосфиде галлия и фосфиде индия и влияние ультразвука на их свойства.

Диссертация представлена в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Волинский государственный университет, Луцк, 1996.

Защищается 18 научных работ и 2 авторских свидетельства, которые содержат результаты экспериментальных и теоретических исследований свойств радиационных дефектов в фосфиде галлия и фосфиде индия. Установлено, что основными позитронно-чувствительными центрами радиационного происхождения в GaP являются вакансии галлия, а в InP - комплексы вакансий индия и фосфора. Выявленно эффект ультразвуковой очистки облученных образцов от радиационных нарушений

структуры. Предложен способ восстановления эффективности излучения деградированных промышленных светодиодов.

S U M M A R Y .

Vernidub R.M. Radiation defects in Gallium Phosphide and Indium Phosphide and influence of ultrasonic on their properties.

The thesis is submitted as manuscript for candidate of science in the field of physics and mathematics, speciality 01.04.10 - physics of the semiconductors and dielectrics, Volyn State University, Lutsk, 1996.

The defend of the 18 scientific works and 2 author evidences, which maintain results of experimental and theoretical researches of properties of the radiation defects in GaP and InP. It is establish, that basic positron-sensibility centres in GaP are vacancies of gallium, and in InP are complexes of the vacancies of indium and phosphorum. Discover effect of ultrasonic clearance of irradiated samples from radiation defects. The method of reconstruction of the degrade light emitting diodes to propose.

Ключові слова: радіаційні дефекти, вакансії, ультразвук, дислокація, люмінесценція.

Підписано до друку 30.10.1996 р. Об'єм 0,8. Формат 60x84 1/16.

Друк офсетний. Тир. 100 прим. Зам. 263. Безкоштовно.

ЛОД УДНУ ім. Драгоманова, Київ, Пирогова, 9.



43427

AB 36.054