

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Загальною задачею матеріалознавства є створення матеріалів із заданими властивостями і вивчення процесів, які в них відбуваються за різних умов. До методів контрольованої зміни структури дефектів слід віднести низькоенергетичні акустичні методи, які можуть знайти широке застосування при вирощуванні і легуванні кристалів та багатошарових структур, відпалі різноманітних дефектів. Дана робота стосується розробки фізичних основ модифікації дефектної структури різних класів напівпровідникових матеріалів, які суттєво відрізняються своїми властивостями. Очевидні переваги мають акустостимульовані (АС) методи обробки ртутновмісних вузькощілинних напівпровідників, які характеризуються низькими порогами утворення власних дефектів. Для іншого класу матеріалів, – ковалентних напівпровідників, характерні значно сильніші хімічні міжатомні зв'язки і необхідні для керування їх електрофізичними властивостями високоенергетичні обробки часто є небажаними, що підвищує актуальність застосування АС методів.

З другого боку, різноманіття фізичних явищ, що виникають в процесі генерації та поширення акустичних хвиль (АХ) в кристалах та шаруватих структурах, їхня взаємодія з електронною та фононною підсистемами є важливим об'єктом наукових досліджень і підґрунтям створення нових унікальних акустoeлектронних приладів. При дослідженні впливу АХ ультразвукового (УЗ) діапазону певної інтенсивності на напівпровідники було виявлено багато неочікуваних ефектів, які пов'язані не тільки зі збудженнями електронної підсистеми кристала, а і з модифікацією структури дефектів кристала та, як наслідок, наступними змінами всіх основних характеристик матеріалу [1\*, 28]. Значні АС зміни параметрів були виявлені в багатокомпонентних матеріалах, зокрема, у напівпровідниках типу  $A_2B_6$  (CdS, ZnS). Основний механізм впливу АХ у цих матеріалах був встановлений вже в перших роботах, він пов'язаний із вимушеними коливаннями дислокацій у полі зовнішньої АХ. Дислокації виступають "трансляційними посередниками" між АХ і точковими дефектами (ТД): акумулюючи енергію АХ, вони взаємодіють із підсистемою ТД, стимулюючи їхню генерацію і/або перебудову. Однак, незважаючи на ґрунтовне опрацювання окремих АС ефектів, – наприклад, теоретичний опис АС змін у дислокаційних кристалах, розвинутий у роботах Локтева і Халак [2\*], дозволив пояснити явище акустолюмінесценції та підтвердити дислокаційний механізм акустичної нелінійності в лужно-галоїдних кристалах, – багато явищ залишалися невивченими. Особливо це стосується бездислокаційних матеріалів, таких як кремній та германій, для яких механізми впливу АХ та склад "акусточутливих" дефектів потребували конкретних досліджень для зразків різного домішково-дефектного складу та режимів радіаційних обробок.

Радіаційні технології керування параметрами напівпровідникових матеріалів та приладів мають широке використання. Проте багато вагомих питань контролю за процесами, особливо при наступних після опромінення термообробках, ще не вирішено. Застосування акустичних та комбінованих радіаційно-акустичних методик може

сприяти появі нових можливостей дослідження радіаційних дефектів, розробці селективних режимів відпалу та використанню окремих акустоактивних дефектів для створення нового класу акустокерованих мікроелектронних пристроїв.

Йонно-променева імплантація як унікальний метод модифікації та синтезу нових матеріалів (наноматеріалів), активно розвивається у світі і є технологією високого рівня. Одним із ефективних способів вдосконалення даної методики, який представлено у даній роботі, є використання акустичних хвиль для керування концентрацією точкових дефектів і стимулювання електричної активації домішки [42]. Ефективність та універсальність акусто-йонних методів можуть мати суттєве значення для ряду таких перспективних науково-технічних напрямів, як технологія тонких плівок, наноелектроніка, функціональна мікроелектроніка, оптоелектроніка.

Отже, встановлення фізичних закономірностей акустостимульованої модифікації структури дефектів у напівпровідникових кристалах різних типів та структурної якості, у приладах на їх основі, - є важливим для вирішення перелічених вище проблем й визначає актуальність дисертаційної роботи як з наукового, так і практичного боку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота відповідає основним науковим напрямам діяльності Інституту фізики напівпровідників НАН України і виконувалася відповідно до наступних тем: 1. «Дослідження електронних процесів і структурної досконалості технічно актуальних напівпровідників з метою керування їх властивостями», 1985-1989рр (№ держреєстрації 01850031240); 2. «Вивчення механізмів управління електричною, рекомбінаційною і акустоелектричною активністю структурних недосконалостей, а також легуючих домішок з метою прогнозування їх функціональних можливостей», 1990-1994рр (№ 01930027460); 3. «Комплексні дослідження впливу міждефектної взаємодії в кристалах Si, Ge, KPT і MPT на кінетику електронних процесів», 1995-1999рр (№ 01950024512); 4. «Фізичні та фізикотехнологічні основи створення напівпровідникових матеріалів і функціональних елементів для систем сенсорної техніки», 2000-2002 рр. (№ 0100U000148). 5. «Механізми впливу технології отримання і зовнішніх факторів на властивості напівпровідникових структур і функціональних елементів сенсорних систем на їх основі», 2003-2005 рр. (№ 0103U000364); 6. «Розробка нових підходів для створення перспективних наноструктурованих матеріалів, технологічних та аналітичних багатофункціональних систем на основі напівпровідникових та органічних сполук», 2006-2010 рр. (№ 0106U000878); 7. «Нова технологія виготовлення надмілких *p-n* переходів», 2003-2005рр. (Проект УНТЦ 2367). Роль автора при виконанні – відповідальний виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є встановлення фізичних закономірностей акустостимульованої модифікації структури дефектів у напівпровідникових кристалах різних типів та структурної якості; вивчення фізичних механізмів акусто-дефектної взаємодії (АДВ); розробка методів акустостимульованого покращення електричних і фотоелектричних параметрів. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **наукові задачі**:

- У дислокаційних кристалах CdHgTe: Визначити домінуючі механізми взаємодії АХ з кристалом та процеси АС трансформації дефектів шляхом дослідження температурних, частотних, амплітудних залежностей акустичних характеристик та вивчення динамічних і залишкових змін електрофізичних та фотоелектричних параметрів при акустичному навантаженні зразків з різною дефектною структурою.

- В бездислокаційних радіаційно-опромінених кристалах Si та Ge: З'ясувати особливості впливу залишкових радіаційних кластерів на акустичні характеристики. Дослідити характер та механізми АС змін електрофізичних характеристик при УЗ навантаженні. Встановити механізм АС керування станом акустоактивних дефектів.

- Дослідити механізми акустичного впливу на електролюмінесцентні характеристики світло-випромінюючих структур на основі ZnS:Mn і GaP; визначити ефективність АС методик відновлення радіаційно-деградованих напівпровідникових пристроїв.

- Дослідити можливості використання АХ при імплантації йонів у пластини кремнію й кремнієві структури та встановити механізми впливу АХ на процеси дефектоутворення і релаксації у нерівноважних умовах високоенергетичного опромінення.

**Об'єкт досліджень** – фізичні явища, які викликають АС зміни температурних, частотних, амплітудних, магнітопольових характеристик напівпровідникових монокристалів та структур; процеси дефектоперетворення та механізми взаємодії АХ з дефектами в залежності від типу кристала та умови його акустичного навантаження.

**Предмет досліджень** – дислокаційні складні напівпровідникові сполуки  $A_2B_6$  ( $Cd_xHg_{1-x}Te$  і  $Cd_yMn_xHg_{1-x-y}Te$ ) та  $A_3B_5$  (GaP, InP), бездислокаційні кристали Si та Ge, світловипромінюючі та діодні структури на основі ZnS: Mn, GaP, Si.

**Методи досліджень.** Для реалізації поставлених завдань використано комплекс технологічних і експериментальних методів, який включає: фазово-імпульсні акустичні методи вимірювання коефіцієнта поглинання і швидкості поширення АХ, резонансні методи вимірювання добротності й резонансної частоти; акустичну емісію; ефект Холла; чотиризондовий метод вимірювання поверхневого опору; метод релаксації фотопровідності для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, спектрометрію шумових флуктуацій струму; рентгеноструктурний аналіз; селективне травлення; мас-спектрометрію вторинних пост-йонізованих нейтральних частинок; спектроскопію комбінаційного розсіювання світла та оптичного поглинання; вольт-амперні характеристики, вольт-яскравісні характеристики, електролюмінесценцію; оригінальні методи акустотермічного відпалу та акустохолла.

**Наукова новизна роботи** зумовлена розробкою і застосуванням нових АС методів керування станом дефектів у напівпровідниках, запропонованих на основі експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків. Вперше отримано такі наукові результати:

• На основі комплексних і систематичних досліджень впливу АХ на властивості ртутновмісних вузькощілинних напівпровідників встановлено кореляцію між дислокаційною структурою, акустичними, електрофізичними, шумовими й фотоелектричними параметрами та їх АС змінами в кристалах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Встановлено квазірезонансний характер взаємодії АХ із малокутовими межами субблоків та виявлено ряд нових динамічних акустоелектронних ефектів (акустопровідності та інверсії типу провідності, акустополаризації, дисперсії швидкості АХ і АС акустичної емісії). Визначено механізм та основні характеристики взаємодії й запропоновано фізичну модель внутрішнього термоакустичного відпалу, яка дозволила реалізувати метод покращення властивостей матеріалу.

• Показано, що головна роль в процесах АС деградації електролюмінесценції GaP світлодіодів при їх тривалій УЗ обробці належить рухомим дислокаціям, а виникнення в спектрі часово-нестабільних вузьких ліній і смуг є наслідком утворення складного рухомого дефекту дислокаційної природи. УЗ обробка опромінених (радіаційно пошкоджених) діодів GaP сприяє відновленню характеристик їх світіння.

• Виявлено АС зниження температури відпалу для окремих груп радіаційних дефектів у напівпровідникових кристалах. Так, в кристалах InP, опромінених електронами (енергія 1 MeV, флюєнс  $10^{18}\text{см}^{-2}$ ), спостерігається розпад однієї стадії відпалу (150-250°C) на дві підстадії, 100-140°C та 160-220°C і низькотемпературний зсув температури відпалу на ~50°C.

• Вивчено вплив інтенсивних АХ на температурні та магнітопольові характеристики концентрації носіїв заряду ( $n_e$ ) і їх рухливості ( $\mu_H$ ) у кристалах бездислокаційного  $p$ -Ge; запропоновано механізм динамічних змін, який полягає у АС збільшенні відносного числа легких дірок та зростанні внеску розсіювання носіїв на йонізованих домішках.

• Ідентифіковано "акустоактивні дефекти" в бездислокаційних  $\gamma$ -опромінених кристалах Si, показано можливість їх АС перебудови (зміни конфігурації, структури та зарядності) та з'ясовано умови, при яких можливі або зворотні зміни електрофізичних параметрів, які характерні для метастабільних дефектів і виявляються при низьких температурах, або незворотні, що визначаються дифузійними механізмами.

• Встановлено закономірності впливу АХ на процеси релаксації нерівноважних дефектів при йонній імплантації в пластини й структури кремнію та визначальні механізми акусто-дефектної взаємодії в залежності від вихідних умов експерименту (матеріалу підкладки, типу та енергії йонів).

**Практичне значення одержаних результатів.** Усі напівпровідникові об'єкти досліджень у даний час мають широке застосування у техніці. В роботі запропоновано оригінальні методи контрольованої модифікації властивостей як вузькощілинних напівпровідників  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  та  $\text{Cd}_y\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Te}$   $n$ - та  $p$ -типів, які актуальні для виготовлення оптоелектронних приладів інфрачервоного діапазону, так і Si та Ge - основних матеріалів сучасної мікро- та наноелектроніки. Розроблено та реалізовано нові

методики напівпровідникової технології, а саме термоакустичний відпал, динамічний акустохолл, акустойонна імплантація, методика дослідження кінетики акустопровідності в імпульсному режимі.

- Розроблено ефективні п'єзоперетворювачі для поперечних та повздовжніх АХ на основі  $\text{LiNbO}_3$ : частота (1-100) МГц, інтервал робочих температур (4,2-700) К.

- Запропоновано спосіб покращення електрофізичних та фотоелектричних параметрів (зростання  $n_e$  і  $\mu_n$  на 20-50%; часу життя нерівноважних носіїв  $\tau_{\text{HHЗ}}$  на 50-300%), зменшення рівня шуму  $1/f$  (у  $\sim 10$  разів); показано, що УЗ обробка збільшує довготривалу стабільність параметрів матеріалу та зменшує їхню чутливість до радіаційних впливів.

- Удосконалено методику термоакустичного відпалу напівпровідникових кристалів  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ,  $\text{InP}$ ,  $\text{Ge}$ ; виявлено ефект АС зниження температури відпалу для окремих груп радіаційних дефектів.

- Обґрунтована можливість використання виявленого ефекту АС  $p$ - $n$ -інверсії типу провідності у напівпровідникових кристалах  $p$ -типу  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_y\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Te}$  та  $\text{Ge}$  для створення чутливих сенсорів акустичних та магнітних полів.

- Розроблено метод відновлення характеристик радіаційно пошкоджених напівпровідників та напівпровідникових пристроїв за допомогою УЗ обробки, а саме, відновлення електропровідності кристалів  $\text{InP}$ , прискорення стабілізації структур  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{+2}$ , зростання квантового виходу світловипромінюючих  $\text{GaP}$ -діодів, фоточутливості кремнієвих сонячних елементів.

- Запропоновано і реалізовано (в ІФН НАНУ) методику використання АХ в процесі йонного легування. Показано, що акустична обробка під час йонно-променевої імплантації: а)  $\text{B}^+$ ,  $\text{O}^+$  та  $\text{N}^+$  у пластини  $\text{Si}$  – прискорює дифузію міжвузельного кремнію і при подальших відпалах спричиняє звуження профілю  $\text{B}$ ,  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , відповідно; б)  $\text{B}^+$ ,  $\text{As}^+$  у  $\text{Si}$  – веде до зростання напруги пробою і зменшення струму витоку для  $p^+-n$  і  $n^+-p$  переходів та збільшення чутливості сенсорів в УФ області спектру; в)  $\text{Ag}^+$  у  $\text{Si}$  – зменшує критичну дозу аморфізації  $\text{Si}$ ; г)  $\text{He}^+$  в гетероструктури  $\text{SiGe/Si}$  – збільшує ступінь релаксації механічних напружень і знижує густину проникаючих дислокацій.

- Запатентовано спосіб зменшення глибини  $p$ - $n$  переходу в  $\text{Si}$ . Патент US 6.358.823.31.

Результати можуть бути використані на підприємствах і в організаціях України, що займаються проблемами мікроелектронного приладобудування.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації узагальнено результати багаторічних досліджень, виконаних автором самостійно [40, 41], а також спільно з аспірантами (К.А. Мисливець, К.С. Суханов, Р.К. Савкіна, І.О. Лисюк, М.Д. Тимочко), наукове керівництво та консультація яких здійснювалися здобувачем у процесі їхньої роботи над кандидатськими дисертаціями – роботи [7-10, 14-15, 21-27, 43-49], де здобувачу належить формулювання проблеми і мети, обґрунтування і планування досліджень, постановка конкретних експериментальних і теоретичних задач, вибір методик,

провідна роль в аналізі й інтерпретації експериментальних даних, розробка конкретних фізичних моделей. У роботах [1-4] автором виконано експериментальні вимірювання та узагальнено результати, в роботах [5-6, 11-13] - проведено розрахунки й зроблено інтерпретацію одержаних результатів. У роботах [16-20, 30-39] внесок здобувача полягає у забезпеченні та оптимізації режимів використання акустичних хвиль, спільному формулюванні мети і задачі досліджень та інтерпретації одержаних результатів і написанні статей. Всі нові експериментальні ефекти, представлені в дисертації, виявлені та досліджені автором. Постановка та обґрунтування задач досліджень, усі наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертації належать автору. Переважна частина наведених у дисертації результатів доповідалася автором особисто на міжнародних і вітчизняних конференціях та семінарах.

**Достовірність отриманих результатів** визначається комплексним характером проведених досліджень із застосуванням добре апробованих експериментальних методик, чіткою картиною вивчених явищ і закономірностей, які добре узгоджуються із наявними теоретичними уявленнями про характер змін у структурі напівпровідників та їхніми фізичними характеристиками. В усіх випадках перевірялася відтворюваність результатів, проводився аналіз точності та похибок вимірювань; додатковим чинником перевірки служило порівняння результатів із даними інших дослідників.

**Апробація роботи.** Основні результати роботи були представлені на наступних наукових зібраннях:

- Всесоюзних конференціях „Акустоэлектроника и квантовая акустика твердого тела” (Ташкент, 1978; Саратов, 1983; Чернівці, 1986; Кишинів, 1989; Сыктывкар, 1994). XII Всесоюзній конференції з фізики напівпровідників (Київ, 1990). ”Физика надежности и деградации полупроводниковых приборов” (Кишинев, 1991). 8-th International conference on ternary and multinary compounds (Kishinev, 1992). Регіональних конференціях „Динамические задачи механики сплошной среды” (Батуми, 1987; Геленджик, 1990). Всесоюзному семінарі “Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках” (Павлодар, 1989).

- V International conference ”Acoustoelectronics’91” (Varna, Bulgaria, 1991). International conference ”Advanced Materials” (Kyiv, 1999). International Conference on the Physics of Semiconductors (Flagstaff, USA, 2004; Vena, Austria, 2006; Rio de Janeiro, Brazil, 2008). IEEE International Ultrasonic Symposium (Lake Tahoe, USA, 1999; Puerto Rico, 2000; Munich, Germany, 2001; Seattle, USA, 2002; Montreal, Canada, 2004; Rotterdam, Netherlands, 2005; New York, USA, 2007). II Міжнародній конференції “Взаимодействие излучения с твердым телом” (Минск, Белорусия, 1997).

- Всеукраїнському з’їзді “Фізика в Україні” (Одеса, 2005). Українських конференціях з фізики напівпровідників (Одеса, 2002; Чернівці, 2004; Одеса, 2007; Запоріжжя, 2009). Міжнародних школах-конференціях з актуальних питань фізики напівпровідників, Дрогобич (1999-2010). Міжнародних конференціях з фізики і технології тонких плівок та наносистем (Яремче, 2005; Гута, 2007; Гута, 2009).

Міжнародних науково-технічних конференціях по сенсорній електроніці і мікросистемним технологіям (Одеса, 2004; 2006; 2008; 2010). Міжнародних науково-практичних конференціях “Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (Кременчук, 2008; 2010).

- Семінарах Інституту фізики напівпровідників НАН України 1978 - 2010рр.

**Публікації.** Результати дисертації відображено у 51 основних публікаціях, з них 49 статей у провідних фахових журналах (2 без співавторів), 1 – в тезах конф. і 1 патент.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, оглядового розділу та п’яти розділів оригінальних досліджень, висновків та списку використаних джерел. Вона містить 342 сторінки, з них 301 сторінка основного тексту; 132 рисунки і 26 таблиць, з них 3 на окремих аркушах; список використаних джерел з 351 найменувань на 38 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації подано загальну характеристику стану проблеми, обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень; вказано об’єкти та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; показано зв’язок роботи з науковими програмами та темами; наведено інформацію про апробацію результатів, особистий внесок автора дисертації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** „Ефекти активного ультразвуку та перспективи їх використання в напівпровідниковій електроніці” зроблено короткий літературний огляд акустостимульованих (АС) ефектів у напівпровідниках та основних механізмів взаємодії акустичних хвиль (АХ) з кристалами, які визначають ці ефекти. Проведено узагальнену систематику АС явищ залежно від механізму взаємодії та визначального чинника дії АХ. Показано, що всі відомі АС явища у напівпровідниках за характером дії АХ, способом її виявлення, за функціональними можливостями застосування, можна розділити на три окремі класи: 1) *Динамічні* (Ultrasound in situ), які викликаються АХ і спостерігаються лише в процесі акустичного навантаження зразка; основний механізм впливу АХ в цьому випадку є генерація та переорієнтація дефектів кристалу у полі пружної деформації АХ; 2) *Залишкові, технологічні* ( Ultrasound treatment) АС ефекти, які досягаються тривалою ( $10^2$ - $10^4$ с) УЗ обробкою за рахунок АС дифузії точкових дефектів; відмінність результатів дії АХ для різних матеріалів визначається ефективністю поглинання акустичної енергії; 3) *Інформаційні* (Information Ultrasound) АС ефекти, які виникають лише за умови дії на зразок одночасно з АХ іншого, більш енергетичного агента, яким може бути, наприклад, радіаційне або лазерне опромінення, імплантація йонів тощо. Роль АХ в цих ситуаціях є особливою і зводиться до модуляції процесів релаксації енергетично збудованої нерівноважної структури дефектів, утворення просторово-динамічної матриці об’єму кристала, яка запам’ятовується і може реалізовуватися лише при наступних технологічних операціях.

Запропонована систематика АС явищ в напівпровідниках, яка довершена вперше, використана для формування змісту дисертації, в цілому.

**Другий розділ** „Акустодинамічні явища взаємодії з точковими і лінійними дефектами у вузькощілинних кристалах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ” присвячено дослідженню динамічних акустoeлектронних явищ, які виникають в кристалах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) в процесі їх акустичного навантаження, та з’ясуванню механізму взаємодії АХ з кристалом. На початку розділу проаналізовано перші результати дослідження впливу АХ на властивості кристалів типу CdS [1\*]. Оскільки основний механізм цих ефектів дислокаційний, було зроблено висновок, що кристали потрійних сполук, враховуючи їх високу пластичність (вищу за CdS) теж повинні бути чутливі до дії АХ. Дійсно, кристали  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) характеризуються не тільки унікальними електрофізичними і фотоелектричними властивостями, які забезпечили їхнє широке практичне застосування, але є також зручними модельними матеріалами для вивчення АС ефектів з переважаючим вкладом дислокаційних механізмів. Коротко розглянуто особливості дефектної структури вузькощілинних кристалів та дислокаційні механізми поглинання АХ. Важливою і часто визначальною особливістю для АС ефектів в КРТ є їх дислокаційна структура та наявність малокутових меж (МКМ) між блоками (рис.1).

Оскільки акустичні дослідження КРТ на початок 1984р. були фактично відсутні, то першим необхідним етапом роботи стала розробка методики акустичних вимірювань у цих матеріалах, визначення амплітудних і частотних діапазонів пружного і непружного впливів. З метою з’ясування ролі МКМ в поглинанні АХ досліджено температурні (280-370 С) та частотні (5,5-54 МГц) характеристики внутрішнього тертя (добротності  $Q^{-1}$  та резонансної частоти  $f_p$ ) для пластинчастих зразків з густиною «субблоків»  $N_0 = 1/L_{МКМ} = (20-30) \text{ см}^{-1}$ . Було виявлено, що при збільшенні частоти АХ (віддалені  $f_{АХ}$  від

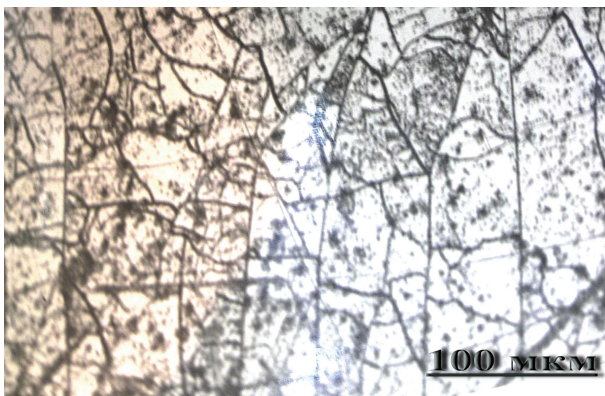


Рис. 1. Мікрофотографія селективно травленої поверхні субблочного зразка КРТ. Видно МКМ, середня відстань між якими  $L_{МКМ}$  визначає їх власну резонансну частоту  $f_{МКМ} = V_{АХ}/2L_{МКМ}$ .

резонансних частот коливання МКМ  $f_{МКМ} = (3-5) \text{ МГц}$ ) плоскі дефекти типу МКМ не встигають за коливаннями АХ, що спричинює зменшення поглинання  $\alpha_{АХ} (\sim Q^{-1})$  та зростання швидкості АХ  $V_{АХ} (\sim f_p)$ , причому в даному випадку спостерігається характерна для субблочних зразків дисперсія  $V_{АХ}$  та її температурного коефіцієнта  $TV_{АХ}$ . Зроблено припущення, що виявлена дисперсія пов’язана з коливаннями субблоків. При акустичному навантаженні зразка в динамічному режимі зафіксовані амплітудні зміни



його акустичних характеристик (рис.2). Виявлено немонотонний характер амплітудних залежностей акустичних характеристик кристалів КРТ, який пояснюється багатопороговим характером процесів АС перебудови структури дефектів.

Наявність ділянок I та II свідчить про якісну відмінність фізичних процесів; отримані експериментальні залежності в подальшому стали основою для вибору режимів акустичних навантажень при дослідженні динамічних (режим I) та залишкових (II) ефектів, відповідно. При акустичному навантаженні зразків КРТ було виявлено ефект появи сигналів акустичної емісії (АЕ); досліджено кореляцію амплітудно-залежних і частотних (2-30 МГц) характеристик акустичного поглинання та амплітуди АЕ. Встановлено, що мінімальний амплітудний поріг виникнення сигналів АЕ, що відповідає початку відриву дислокацій від слабких стопорів, спостерігається при акустичному навантаженні з частотою наближеною до „квazірезонансних” частот вимушених коливань субблоків структури кристала  $f_{МКМ}$ . Таким чином, зміни акустичних характеристик в КРТ продемонстрували нелінійний характер взаємодії. АС збурення домішково-дефектної системи кристалу в результаті позитивного зворотного зв'язку призводять до зміни умов поширення самої АХ (зокрема, до зростання акустичних втрат  $\alpha_{АХ}$ ) і стимулюють подальше посилення взаємодії. Безумовно, АС збурення напівпровідника повинно було б проявитися і у зміні інших фізичних характеристик, наприклад, електрофізичних та фотоелектричних параметрів, які безпосередньо визначаються структурними дефектами.

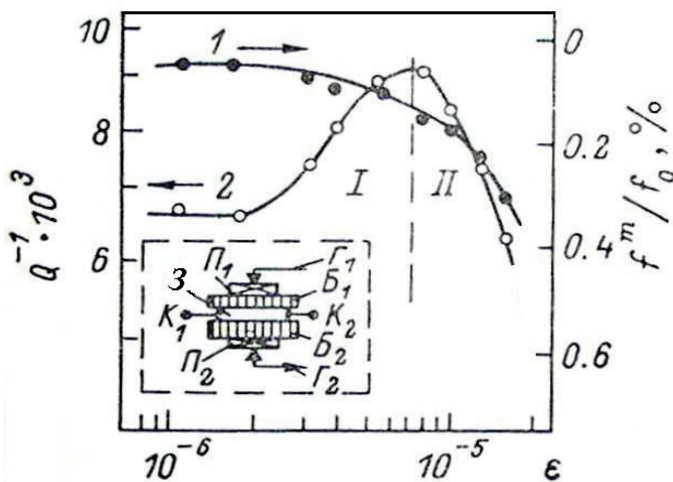


Рис. 2. КРТ. Амплітудно-залежні зміни  $f_p$  (крива 1) та  $Q^{-1}$  (2). На вставці – схема експерименту:  $\Pi_{1,2}$  – п'єзоперетворювачі для УЗ навантаження (10 МГц, поперечні АХ) та вимірювання акустичних характеристик (25 МГц, поздовжні АХ), відповідно;  $B_{1,2}$  – акустичні буфери;  $K_{1,2}$  – електричні контакти на зразку «3».

В процесі подальших досліджень дійсно спостерігалися акустодинамічні ефекти – акусторезистивний ефект, АС інверсія типу провідності, „акустополаризація”. Зокрема, при акустичному навантаженні зразків  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , як  $n$ - так і  $p$ -типу, було зареєстровано появу на омичних контактах електричного потенціалу  $U_{AE} = (10^{-4} - 10^{-1})$  В, з великим степеневим показником амплітудного (від деформації АХ  $\epsilon$ ) нахилу  $k=4-6$ . Запропоновано механізм виникнення  $U_{AE}$ , який пов'язаний з колективним перенесенням заряду електрично зарядженими дислокаціями, що коливаються в акустичному полі.

В даному розділі також описана спеціально розроблена для динамічних досліджень впливу АХ на електрофізичні характеристики напівпровідників методика „акусто-

динамічного Холла», яка дозволила достовірно і незалежно фіксувати зміни типу, концентрації і рухливості носіїв заряду та досліджувати їхні температурні, магнітопольові та амплітудні характеристики. При цьому реалізується можливість дослідження зразка в різних станах: з вихідною структурою дефектів і структурою, яка встановлюється під час акустичного навантаження. Відзначимо, що методика «акусто-Холла» успішно використовувалась для дослідження різних напівпровідників, окремі результати яких описані в дисертації.

З результатів, отриманих даним методом, відзначимо виявлений ефект АС електричної активації точкових дефектів, який головним чином і визначає АС ефекти в кристалах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  та  $\text{Cd}_y\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Te}$ . А саме, встановлено, що при акустичному навантаженні зразка під впливом знакозмінної деформації та в результаті підвищення локальної температури відбувається електроактивація зв'язаних на дислокаціях дефектів (переважно донорного типу), частина яких вивільняється і потім йонізується, що призводить до зміни концентрації носіїв заряду  $\Delta n_{\text{AX}}$ . Після вимкнення ультразвуку спостерігається релаксація цих змін за час від 10 с до  $10^3$  с. Досліджено також динамічний вплив АХ на процес розсіювання носіїв заряду. Визначено, що у різних температурних діапазонах, залежно від переважаючого механізму розсіювання носіїв заряду, вплив АХ на холлівську рухливість  $\mu_H$  зводиться до: а) зменшення  $\mu_H$  в області власної провідності ( $T > 120$  К) – в результаті АС зростання ефективності розсіювання на сплавному потенціалі й оптичних фонах (висновок підтверджено зростанням комбінаційного розсіювання світла при УЗ навантаженні зразка) та б) збільшення  $\mu_H$  в області домішкової провідності при  $T < 120$  К, яке характерне для структурно недосконалих кристалів і є наслідком зменшення ефективності розсіювання на йонізованих домішках. Відзначимо, що при низьких температурах ефективне розсіювання носіїв заряду в кристалах КРТ може відбуватися на кластерах дефектів та неоднорідностях домішково-дефектних комплексів. В роботі [3\*] був запропонований механізм АС руйнування цих кластерів за рахунок перекачування енергії низькочастотної АХ у ВЧ моди власних коливань кластера і подальшому просторовому «надбар'єрному» переміщенні його компонентів до стоків. При цьому вважалося, що взаємодія АХ з усією сукупністю дефектів кластера має колективний характер, а енергія взаємодії пропорційна активаційному об'єму  $\gamma_{\text{ADB}}$  «складного» дефекту. Знайдений нами з динамічних досліджень АС змін  $\Delta n_{\text{AX}}$  ефективний коефіцієнт  $\gamma_{\text{ADB}} = (6-9) \cdot 10^{-27} \text{ м}^{-3}$  підтверджує таке припущення за умови, що кількість атомів у кластері  $N_{\text{ат}} = 10^2-10^3$ .

**У третьому розділі** представлено результати досліджень залишкових змін акустичних, електрофізичних, фотоелектричних та структурних параметрів кристалів  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , які зумовлені АС дифузією точкових дефектів. Основне завдання – полягало у розробці акустичного методу покращення структурної якості пластин КРТ, альтернативного до технологічного термовідпалу. Зауважимо, що на відміну від динамічних АС ефектів, розглянутих у другому розділі, які досліджувалися головним чином при температурах  $T \leq 150$  К, коли провідність має домішковий характер,

технологічні зміни параметрів досліджуваних зразків досягалися довготривалими ( $10^2$ - $10^4$  с) акустичними обробками (УЗО) при  $T \geq 320$  К. За найкращим узгодженням теоретичних кривих (формула Брукса-Херінга) з експериментальними даними ( $T=4,2$  К - 300 К) оцінювалися значення концентрації акцепторних  $N_a$  та донорних  $N_d$  центрів та їх зміни після УЗО. Дослідженню кореляції знаку і величин залишкових змін параметрів зразків з густиною МКМ ( $10$ - $90$ )  $\text{см}^{-1}$  та дислокацій ( $10^9$ - $10^{10}$ )  $\text{м}^{-2}$ ; експериментально показано, що вибір частоти УЗО визначає характер цих змін, а саме, зростання величини ефекту в зразках з більшою густиною дислокацій та при частотах АХ близьких до  $f_{\text{МКМ}}$ . Зроблено висновок, що МКМ виконують роль стоків (джерел) власних і домішкових дефектів. У цьому розділі також розглянуто вплив УЗО на шумові характеристики  $n$ - $p$  структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , і описано виявлений ефект значного зменшення шуму  $1/f$ . Спектральна густина флуктуацій напруги досліджувалася за допомогою стандартної чотиризондової методики в діапазоні частот ( $10$ - $2 \cdot 10^4$ ) Гц з використанням цифрового аналізатора спектру та алгоритму швидкого перетворення Фур'є при обробці масивів даних. В зразках, що оброблялися з більшою інтенсивністю  $W_{\text{АХ}}$ , виявлено значне (більше ніж на порядок) зниження густини шуму (рис.3, криві 3,4).

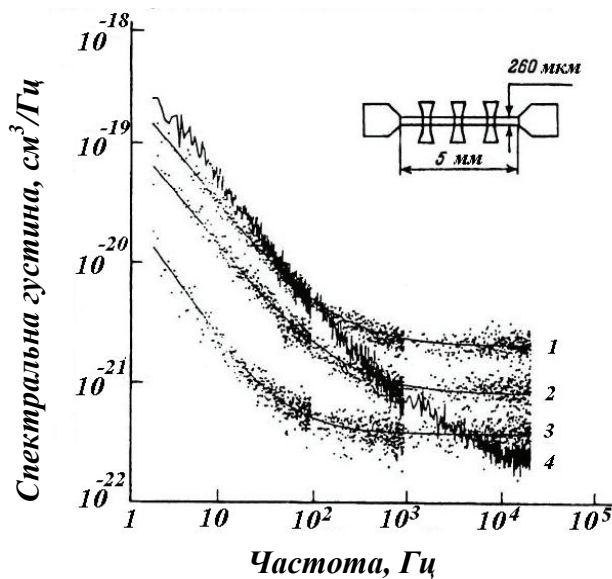


Рис. 3.  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Нормовані  $(\alpha/f)$  спектральні залежності шуму в зразках після УЗ обробки (20 хв) з інтенсивністю  $W_{\text{АХ}}$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ): 1 – 0; 2 –  $10$ ; 3 –  $10^3$ ; 4 –  $10^4$ . На вставці – схема зразка з електричними контактами.

Паралельно з шумовими характеристиками досліджувалися також залежності змін електрофізичних параметрів від тривалості УЗО та  $W_{\text{АХ}}$ , які показали зменшення концентрації акцепторних центрів  $N_a$  та ступеня компенсації. Механізм АС зменшення шуму  $1/f$  пов'язаний зі зменшенням мікронеоднорідностей по зразку, розпадом мікровключень і зниженням потенціальних бар'єрів.

У наступній частині розділу описані дослідження залишкових змін фотоелектричних параметрів для  $n$ - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в залежності від режимів попередньої акустичної обробки та структурної якості вихідних зразків. Коротко розглянуто механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду (ННЗ) та методика розрахунку часу життя ННЗ  $\tau_{\text{ННЗ}}(T)$ . Відомо, що  $\tau_{\text{ННЗ}}$  є не тільки визначальним параметром придатності конкретного зливка матеріалу для подальшого виготовлення фотосенсора, але й є

надзвичайно чутливим до структурної якості. Теоретична межа величини  $\tau_{\text{HHЗ}}$  в кристалах  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  складу  $x \sim 0,2$  досягає значень  $10^{-4}$  с при  $T=77$  К. Експериментально визначені обмеження  $\tau_{\text{HHЗ}}$  пов'язані з впливом точкових і лінійних дефектів на рекомбінаційні процеси. Вимірювання  $\tau_{\text{HHЗ}}$  проводилось в інтервалі  $(77 \div 180)$  К методом релаксації фотопровідності на довжині хвилі  $\lambda=10,6$  мкм. Виявлено явище трансформації домінуючого (основного) механізму рекомбінації носіїв заряду в залежності від інтенсивності  $W_{\text{AX}}$  та частоти  $f_{\text{AX}}$  УЗО для зразків різної структурної досконалості. Експериментально встановлено, що УЗО (поздовжні АХ  $f_{\text{AX}}=5\text{--}17$  МГц,  $W_{\text{AX}} \approx 10^4$  Вт·м $^{-2}$ ) не змінює  $\tau_{\text{HHЗ}}(T)$  в області власної провідності  $T > 150$  К, а основні залишкові зміни спостерігаються лише в області домішкової провідності при  $T < 150$  К – з'являється характерна для Шоклі-Рідовського механізму рекомбінації термоактиваційна ділянка з енергією  $E \approx 60$  меВ (рис. 4, крива 4), причому температура початку активації послідовно зростає зі збільшенням  $W_{\text{AX}}$  (криві 2, 3, 4). Експериментальні результати зміни  $\tau(T, n)$  при УЗО описано в рамках статистики Шоклі-Рідовської рекомбінації [4\*].

$$\tau_n = \frac{1}{C_n n_0} \frac{N_{va} + N_a}{N_a}, \quad (1)$$

де  $N_{va} = N_v \exp(-E_a / kT) \approx 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $T=77$  К. Визначено концентрацію рекомбінаційних центрів (РЦ)  $N_a = 10^{14}\text{--}10^{15}$  см $^{-3}$  (акцепторні рівні), енергетичне положення рівнів відносно вершини валентної зони  $E_a = (32\text{--}64)$  меВ та коефіцієнт і переріз захоплення електронів  $C_n = (0,6\text{--}4,2) \cdot 10^9$  см $^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\sigma_n \approx 10^{-19}$  см $^2$ , відповідно. УЗО зразка в „резонансному” режимі, коли  $f_{\text{AX}} \approx f_{\text{МКМ}}$ , приводить до збільшення  $N_a$ ,  $E_a$  і  $C_n$ , при цьому зростає і  $\tau_{\text{HHЗ}}$ . (рис.4).

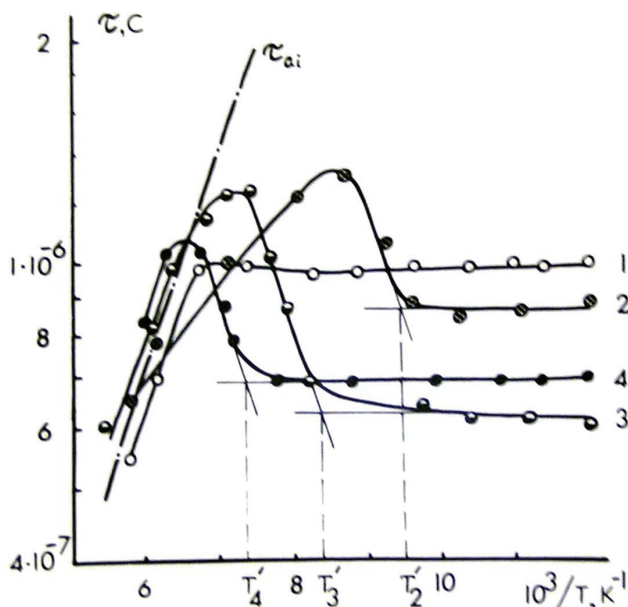


Рис. 4.  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ .  $\tau_{\text{HHЗ}}(T)$ . До УЗО (крива 1): після УЗО(2–4) при  $W_{\text{AX}}$ ,  $10^3 \text{ Вт/м}^2$ : 0,8 (2); 2,1 (3); 3,2 (4). Розраховані параметри.  $\tau_{\text{HHЗ}}^{77} \cdot 10^6$  с: 1,0 (крива 1), 0,9(2), 0,6(3), 0,7(4).  $n^{77} \cdot 10^{-14}$  см $^{-3}$ : 11,8 (крива 1); 5,9(2); 5,5(3); 5,9(4).  $N_a \cdot 10^{15}$ , см $^{-3}$ : 1,5 (крива 2); 4,3 (3); 12,6 (4).  $N_d \cdot 10^{15}$ , см $^{-3}$ : 3,6 (крива 2); 9,2 (3); 25,8 (4).

РЦ, що утворюються в кристалічній матриці в результаті УЗО, є типовими для КРТ і пов'язані з власними дефектами – вакансіями ртуті  $V_{\text{Hg}}$ . Детально досліджено резонансні ефекти при УЗО, підтверджено визначальну роль МКМ для ефективності АС впливу.

В кінці розділу наведено результати аналізу кореляції величини АС змін електрофізичних та фотоелектричних параметрів зразків КРТ з вихідними характеристиками їхньої структурної досконалості. Методом селективного травлення та растрової електронної мікроскопії досліджено зміни в структурі лінійних дефектів (дислокації та МКМ)  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $n$ - і  $p$ -типу. Порівняльний аналіз мікрофотографій поверхні дозволив зробити висновок про те, що акустична обробка є причиною релаксації внутрішніх механічних напружень в об'ємі кристалу, які виникли при попередніх технологічних операціях, АС релаксація цих напружень відбувається шляхом виходу на поверхню дислокацій і спостерігається для кристалів  $p$ -типу при  $W_{\text{AX}} > 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , а для кристалів  $n$ -типу - при  $W_{\text{AX}} > 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Більш низький поріг для зразків  $p$ -типу пов'язаний з їхньою підвищеною пластичністю за рахунок значно вищої концентрації вакансійних дефектів. Порівняльний аналіз змін параметрів зразків КРТ (як контрольних, так і після УЗО) протягом тривалого часу зберігання в кімнатних умовах (до 3 років) показав, що позитивні результати (збільшення  $\mu_n$  та  $\tau_{\text{HHЗ}}$ ) „низькоамплітудної” УЗО ( $W_{\text{AX}} < 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  на частоті  $< 10 \text{ МГц}$ ) зберігаються. В той же час при застосуванні УЗО з більшими інтенсивностями ( $W_{\text{AX}} \approx 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ) і частотами ( $> 15 \text{ МГц}$ ) з часом спостерігається зниження величин  $\mu_n$  та  $\tau_{\text{HHЗ}}$  і деяке відновлення ФЕ параметрів. Зроблено висновок, що процес УЗО прискорює деградаційні процеси і таким чином збільшує довготривалу стабільність  $n_e$ ,  $\mu_n$  і  $\tau_{\text{HHЗ}}$  завдяки підвищенню рівномірності розподілу гетерованих в області МКМ власних і домішкових дефектів та зниження їхньої концентрації у цих областях. Процес інтенсивної АС деградації твердих розчинів  $n$ -КРТ, пов'язаний із дифузією ртуті з областей лінійних дефектів структури та наступним утворенням перенасичених ртуттю рекомбінаційно активних областей, призводить до зменшення рухливості  $\mu_n$  та  $\tau_{\text{HHЗ}}$  – згасання фоточутливості матеріалу.

Спираючись на описані вище результати комплексних досліджень, запропонована модель „внутрішнього” термо-акустичного відпалу власних дефектів в КРТ, яка полягає в наступному. При УЗ обробці субблочного зразка основна частина акустичної енергії поглинається на МКМ та дислокаціях. За рахунок локального збільшення температури в умовах існування градієнту пружних напружень (поля АХ) відбувається відрив генерованих на МКМ надлишкових (нерівноважних при температурі обробки) власних та домішкових дефектів (в першу чергу атомів ртуті) та їхній дифузійний рух в об'єм субблоків. За час  $t_{\text{оп}} \sim 2 \cdot 10^3 \text{ с}$  встановлюється рівноважний розподіл концентрації міжвузельної ртуті в об'ємі субблока і відбувається її рекомбінація (заліковування) з вакансіями. Виходячи з експериментальних даних оцінено ефективний коефіцієнт АС дифузії  $D_{\text{Hg}}^{\text{AX}} \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , який значно вищий за відомі значення  $D_{\text{Hg}} \approx (10^{-12} - 10^{-11}) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . В рамках моделі визначені критерії вибору оптимальних режимів УЗО субблочних зразків, які підтверджені експериментально.

**У четвертому розділі** викладено результати дослідження впливу АХ (в основному, залишкові ефекти) на електролюмінесцентні (ЕЛ) характеристики світловипромінюючих структур, які широко застосовуються в фото- і оптоелектроніці, а

саме:  $\text{ZnS:Mn}^{+2}$ , GaP і InP; розглянуто АС зміни люмінісцентних характеристик структур, що зумовлені особливостями міждефектної взаємодії. Різноманітність дефектів кристалічної ґратки, наявність блоків та локальних потенціальних бар'єрів визначають як складний характер збудження ЕЛ в таких об'єктах, так і можливості багатоваріантного впливу на їхню структуру. Була проведена перевірка можливостей застосування розробленої (для КРТ) методики акустичної обробки до інших об'єктів. Відзначимо, що дані матеріали за їх дислокаційною структурою теж відносяться до кристалів з переважаючими дислокаційними механізмами взаємодії АХ, однак для структур ці механізми суттєво відрізняються. Зокрема, необхідно враховувати п'єзополе, що супроводжує поширення АХ у п'єзоелектрику і може локально досягати значної величини (десятки кВ/см). Такі поля здатні інjektувати в активну область напівпровідника носії струму, збільшуючи чи зменшуючи інтенсивність випромінювальної рекомбінації. Важливо, що АХ викликає збурення не тільки системи структурних дефектів кристала, але й екситонів, які нерідко відповідають за випромінювальну рекомбінацію в світлодіодах. В цьому випадку виникає якісно інша властивість системи: тривале (під час обробки) АС накопичування відхилень від рівноважного стану, обумовлене внутрішніми процесами самоорганізації.

Залишковий вплив УЗО на ЕЛ в МДНДМ-структурах на основі  $\text{ZnS:Mn}^{+2}$  (скляні підкладки, комірки  $(0,06 \times 0,05 \times 1,6 \cdot 10^{-4}) \text{ см}^{-3}$ , товщина полікристалічної плівки  $\text{ZnS:Mn}^{+2}$  – 0,6 мкм) полягав у розширенні гістерезису вольт-яскравісних характеристик та ефекту власної пам'яті (ВП). АС переміщення до поверхні зразка (до межі поділу  $\text{ZnS}$  – діелектрик) точкових та лінійних дефектів кристалу призводить до зміни енергетичного положення та густини поверхневих станів, що і визначає формування стійкої зарядової поляризації, відповідальної за ВП. В режимі височастотного навантаження структур  $\text{ZnS:Mn}^{+2}$  при дослідженні частотної залежності напруги запалювання  $U_3$  спостерігалось збільшення яскравості (на сотні процентів) та зменшення напруги  $U_3$ . Зафіксовані при цьому піки на амплітудно-частотній характеристиці, які відповідали частотам контурних та згинних мод акустичних коливань елемента у частотному діапазоні (3-8) МГц, підтвердили п'єзоелектричні властивості текстурованих плівок.

Іншим типом досліджених світловипромінюючих структур були червоні GaP світлодіоди, як вихідні, так і  $\gamma$ -опромінені. Відомо, що в структурах GaP ефективність ЕЛ випромінювання залежить від наявності точкових дефектів безпосередньо поблизу  $p$ - $n$  переходу, особливо в  $p$ -області; при цьому екситонна компонента випромінювання є найбільш чутливою до зміни концентрації дефектів і, як виявилось, чутливою до АХ. АХ, як і малі дози радіації, можуть бути зручним інструментом впливу на наявні у зразку неоднорідності, скупчення точкових дефектів, термодинамічно-нерівноважні утворення з великими періодами релаксації. Було показано, що завдяки акустичному впливу можна досягти прискорення процесів відпалу  $\gamma$ -опромінених зразків. Особливістю такого АС відпалу є зростання позитивного ефекту очищення зразка від безвипромінювальних центрів при зворотньому зміщенні діода. При динамічному



акустичному навантаженні виявлено ефект АС нестабільності ЕЛ – акустодинамічний ефект “блукаючих смуг” та виникнення низькочастотних (НЧ) коливань (герцового діапазону) світіння (рис.5). Встановлено, що поява таких НЧ коливань не пов’язана з формуванням акустоелектричного домена, а пояснюється в рамках екситонного механізму. А саме, внаслідок дії АХ екситони стають рухливими і можуть захоплюватися дислокаціями, переходячи в локалізовані екситонні стани з меншою енергією; при цьому зростає довготривала компонента релаксації ЕЛ. Існування складного дефекту структури, утвореного близько розташованими дискретними рівнями, створює передумови виникнення автоколивального процесу.

Досліджено АС деградацію ЕЛ GaP-світлодіодів, яка відбувається у дві стадії: швидка компонента задовільно описується лінійною часовою залежністю, повільна – ближча до експоненційної. Основною причиною зменшення ЕЛ є рухомі дислокації – потужні області безвипромінювальної рекомбінації, які мігрують по кристалу і утворюють скупчення, що і є джерелами темних ліній і плям. Виявлено, що при ввімкненні акустичного навантаження одночасно зі зменшенням інтенсивності ЕЛ

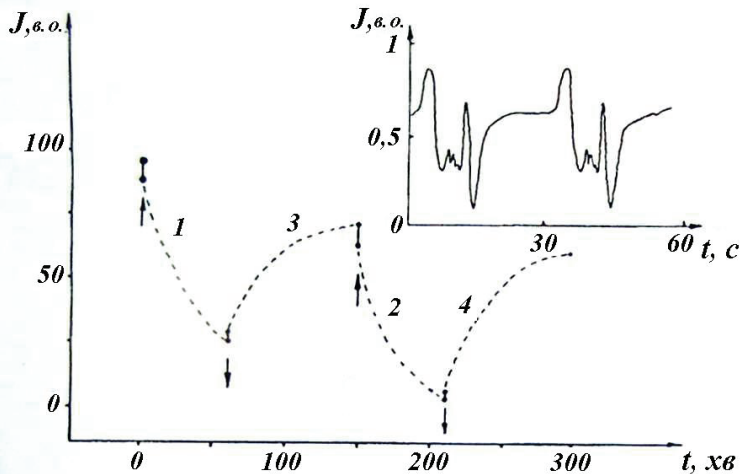


Рис. 5. Залежність інтенсивності світіння GaP-світлодіодів від тривалості УЗО ( $f_{AX} = 4,75$  МГц,  $W_{AX} = 10^4$  Вт·м<sup>-2</sup>). Криві 1,2 – відповідають деградації ЕЛ, 3,4 – релаксації після припинення УЗ обробки. На вставці – НЧ коливання світіння при 77 К.

зростає струм через  $p$ - $n$  перехід – ефект, що зумовлений АС руйнуванням екситонів. Виявлено також, що АХ, проходячи через кристал, руйнує неоднорідності, які є центрами зародження мікроплазм. Тому метод УЗО може успішно застосовуватися для покращення випромінювальних якостей  $p$ - $n$  структур, які містять підвищену концентрацію дефектів, в тому числі й для радіаційно опромінених. Однак, УЗО при кімнатних температурах не завжди дозволяє досягти повного відпалу радіаційних дефектів (очищення робочого об’єму зразка), а при підвищенні інтенсивності АХ поряд з гетеруванням дефектів відбувається небажане нагромадження лінійних порушень структури зразка та складних комплексів з високою енергією активації відпалу. Як певний компроміс цих чинників виникла ідея поєднання УЗО та термічного відпалу. Нами вперше реалізована така операція акусто-термічного відпалу радіаційних дефектів у спеціально розробленій печі. У підрозділі 4.3 розглянуто окремі результати таких експериментів. Описана оригінальна методика термо-акустичного відпалу, яка дозволяє проводити відпал при температурах до 400 °С при одночасній дії АХ (5-30 МГц). На

рис.6 наведені результати впливу АХ на низькотемпературний зсув стадій ізохронного відпалу радіаційних дефектів. Опромінені електронами ( $E_{\text{ел}}=1 \text{ MeV}$ ,  $\Phi=10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) зразки фосфіду індію  $\text{InP}$  містили високу концентрацію радіаційних порушень (областей розупорядкування та вакансійних комплексів). Ізохронний відпал ( $100^\circ\text{C}$ - $400^\circ\text{C}$ ), проведений в акустичному полі, показав, що неперервна у відсутності АХ стадія відпалу ( $100^\circ\text{C}$ - $300^\circ\text{C}$  в умовах дії АХ розщеплюється на дві підстадії:  $(100\text{-}140)^\circ\text{C}$  та  $(160\text{-}220)^\circ\text{C}$ , відповідно; при цьому спостерігається зсув стадій в бік нижчих температур та відбувається прискорення відпалу.

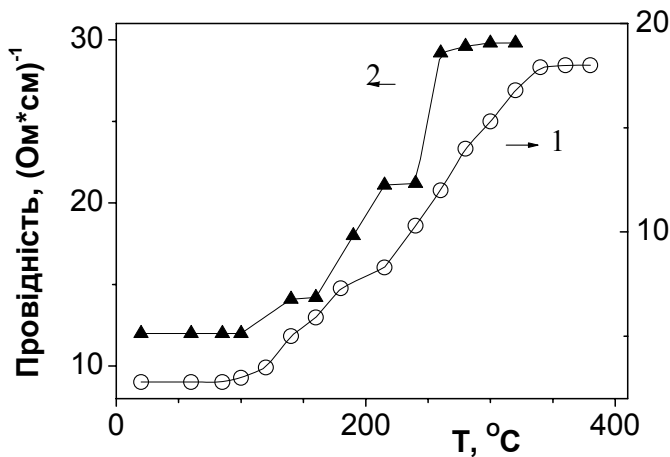


Рис. 6. Залежність величини електроопору радіаційно-обробленого зразка  $\text{InP}$  від температури відпалу. Крива 1 – відпал без АХ; 2 – при дії АХ ( $f_{\text{АХ}} = 5 \text{ МГц}$ ,  $W_{\text{АХ}} = 10^3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ).

Іншим модельним об'єктом дослідження впливу АХ на кінетику ізохронного відпалу радіаційних дефектів були зразки нейтронно легованого (НЛ)  $\text{Ge}$  ( $\Phi_n \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). Встановлено, що вплив АХ на процес відпалу РД в НЛ  $\text{Ge}$  еквівалентний певному збільшенню температури і механізм УЗ дії зводиться, в основному, до прискорення дифузії донорних ( $\text{Sb}+V$ ),  $E=E_C-0,21 \text{ eV}$  та акцепторних ( $\text{Sb}+V_2$ ),  $E=E_V+0,16 \text{ eV}$  дефектів. Далі в цьому розділі описано ще один позитивний результат дії АХ – АС відновлення характеристик  $\gamma$ -опромінених  $\text{Co}^{60}$  ( $\sim 10^6 \text{ рад}$ ) кремнієвих діодних структур – „сонячних елементів”. УЗО сприяє перегрупуванню і акустичному відпалу радіаційних дефектів, що приводить до зростання часу життя неосновних носіїв і їх дифузійної довжини в базі. Зроблено висновок про можливість відновлення робочих характеристик радіаційно-пошкоджених напівпровідникових приладів за допомогою спеціальних режимів УЗ обробки.

**У розділі 5** розглянуто акустичні та акустoeлектричні явища, зумовлені взаємодією АХ з пружними полями радіаційних дефектів у кристалах іншого класу – бездислокаційних  $\text{Si}$  та  $\text{Ge}$ . Якщо АС механізми в дислокаційних матеріалах, загалом, на кінець 90-х років були добре вивчені [1\*-3\*], то для бездислокаційних – були відомі лише окремі експериментальні результати і повністю відсутня теорія. Причому перші тестові дослідження показали, що структурно досконалі зразки  $\text{Si}$  й  $\text{Ge}$  майже не чутливі до традиційних режимів УЗО. А от зразки, що містять значну кількість домішок чи радіаційних дефектів, при певних умовах таку «чутливість» виявляли, в них



спостерігалися АС ефекти, зумовлені взаємодією деформаційного поля АХ з пружними полями дефектів. З метою з'ясування природи цієї «чутливості» та дослідження особливостей акусто-дефектної взаємодії були проведені експерименти, результати яких аналізуються в даному розділі. В перших параграфах розділу розглянуто зміни акустичних характеристик в зразках Si та Ge, обумовлені наявністю радіаційних дефектів, а в наступних – АС зміни електрофізичних характеристик. Розглянуто результати дослідження впливу залишкових радіаційних кластерів на акустичні характеристики нейтронно-легованих (НЛ) кристалів кремнію та германію. Для зразків НЛ кремнію: а) встановлено механізм взаємодії АХ з кристалом – розсіювання на коливаннях ґратки (при  $T > 150$  К) та розсіювання на недосконалоостях ( $T < 100$  К); б) виявлено вплив залишкових (після технологічного відпалу при  $T = 750-800^\circ\text{C}$ ) радіаційних дефектів на зменшення нахилу температурних (4,2-300 К) залежностей коефіцієнта поглинання  $\alpha_{\text{АХ}}$  та швидкості  $V_{\text{АХ}}$ ; виявлено анізотропію радіаційно наведених змін пружних сталих, яка пов'язана з наявністю областей розупорядкування. Для кристалів НЛ германію (вихідного, опроміненого та відпаленого) наведено результати дослідження швидкості поширення АХ. Виявлено, що пружні модулі та їхні температурні і деформаційні (при одновісному стискуванні) коефіцієнти чутливі до радіаційних дефектів, а також до рівня легування і ступеня компенсації.

В наступному параграфі розділу описані результати дослідження дії АХ на протікання струму в  $\gamma$ -опроміненених зразках кремнію ( $^{60}\text{Co}$ , дози  $10^8$  і  $10^9$  рад), вирощених методом Чохральського ( $n\text{-Si-Cz:P}$ ) та зонної плавки ( $n\text{-Si-Fz:P}$ ), які містять анізотропні (пружні диполі) радіаційні дефекти. На таких зразках проведені комплексні дослідження впливу АХ, як в динамічному, так і в статичному режимах. Із аналізу температурних (100÷300 К) холлівських залежностей  $n(T)$  визначено енергетичні положення і концентрації центрів, що відповідають за температурні та АС зміни електрофізичних параметрів. Встановлено, що для Si-Cz зразків акустоактивними дефектами, які характеризуються глибокими акцепторними рівнями  $E_a^1 = (E_c - 0,424 \text{ eV})$ ,  $E_a^2 = (E_c - 0,205 \text{ eV})$  і  $E_a^3 = (E_c - 0,19 \text{ eV})$ , відповідають дивакансія  $V_2^-$ , А-центр ( $V\text{-O}$ ), та невідомий комплекс, яким може бути А-центр модифікований близько розташованим домішковим атомом. В зразках  $n\text{-Si-FZ}$  акустоактивними виявилися глибокі центри з енергією активації  $E_a \sim E_c - 0,20 \text{ eV}$ , що відповідають радіаційним комплексам типу дивакансії або ( $P_s\text{-}C_i$ ) - центра. Важливий результат для подальшого застосування АС ефектів у напівпровідниках, що містять метастабільні дефекти, був отриманий при використанні імпульсного режиму акустичного навантаження. Вперше в реальному часі вдалося спостерігати кінетику АС релаксації електропровідності  $\sigma$  у зразках  $\gamma\text{-}n\text{-Si-Fz}$ , яка спричинюється переорієнтацією анізотропних радіаційних дефектів. Це явище виникає як наслідок АС перебудови метастабільного дефекта з однієї просторової конфігурації в іншу та відповідної зміни його зарядового стану. При цьому під час дії УЗ імпульсу спостерігається оборотна зміна  $\sigma$ , зростання та спад якої при фіксованій температурі відбувається з характерними часами релаксації  $\tau_s(T)$  і  $\tau_c(T)$ , відповідно.

Причому  $\tau_{3,c}(T) = \tau_{3,c}^0 \exp(U_{3,c}/kT)$ , де  $U_3$  та  $U_c$  - енергії активації процесів АС перебудови центра та його зворотної релаксації, відповідно. Дослідження температурних залежностей  $\tau_3(T)$  і  $\tau_c(T)$  дозволили розрахувати характерні енергетичні параметри такої перебудови (Рис.7):  $U_3 \approx 0,09$  еВ,  $U_c \approx 0,13$  еВ і  $\tau_3^0 \approx 4 \cdot 10^{-8}$  с,  $\tau_c^0 \approx 10^{-9}$  с.

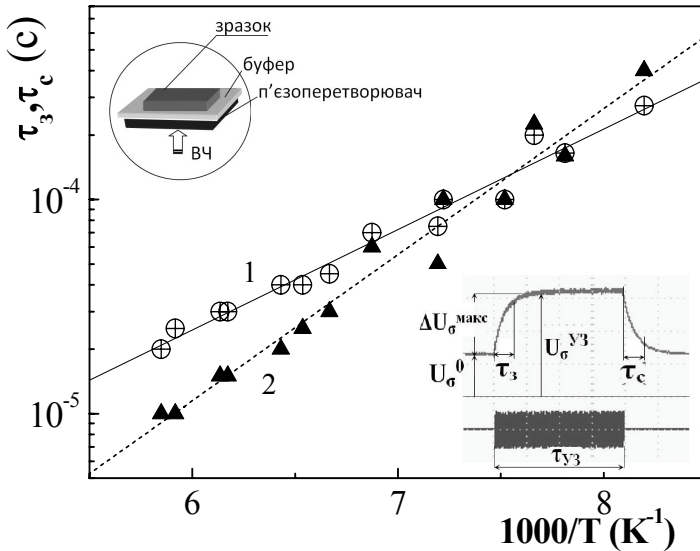


Рис. 7. n-Si-Fz:P. Температурні залежності: крива 1 -  $\tau_3(T)$ , 2 -  $\tau_c(T)$ . Вставки: вверху - акустичний вузол (п'єзоелектричний перетворювач, акустичний буфер і зразок); внизу - осцилограми «імпульсу  $U_\sigma$ » на зразку і ВЧ імпульсу на п'єзоперетворювачі.

Про загальний характер акустодинамічних явищ у напівпровідникових матеріалах, що містять метастабільні радіаційні дефекти свідчать і результати, отримані методом акусто-Холла, для НЛ германію. А саме, у зразках НЛ Ge, на яких вивчався ефект впливу АХ на відпал РД (розділ 4), виявлено АС збільшення електропровідності та зсув температури інверсії ( $T_i$ ) знаку коефіцієнта Холла  $R_H$ . Проведено аналіз спостережених явищ в рамках феноменологічної теорії моделі квазірівнів Фермі; розраховано АС зміни концентрації та рухливості. При послідовному поєднанні УЗ та температурних режимів обробок зразка були виявлені характерні гістерезисні ефекти. Обговорюється можливий механізм АС перетворень дефектної підструктури кристала, який зумовлений акусто- та термічно-активованими процесами перезарядки глибоких рівнів.

Було виявлено, що АС явище  $p \rightarrow n$  конверсії типу провідності спостерігається не тільки в зразках  $Cd_xHg_{1-x}Te$  та  $Cd_yMn_xHg_{1-x-y}Te$  (розділ 2), але й в НЛ Ge з певним дефектним складом. Якщо механізм такої інверсії в дислокаційних матеріалах пов'язаний з АС зростанням концентрації електронної компоненти провідності, то для НЛ Ge ефект визначається АС зростанням параметра  $b = \mu_n/\mu_p$  ( $\mu_n$  і  $\mu_p$  - рухливості електронів та дірок, відповідно). Спираючись на виявлений ефект АС зсуву  $T_i$ , запропоновано новий принцип роботи акусточутливого сенсора на основі напівпровідникового датчика Холла. Значне підвищення чутливості датчика зумовлене ефектом АС зсуву  $T_i$  та наближенням її до температури навколишнього середовища, при якій використовується сенсор. При цьому реалізується можливість динамічного

керування чутливістю датчика шляхом зміни інтенсивності АХ. Такий датчик Холла може бути використаний і як сенсор акустичного поля.

В кінці розділу описано ефект взаємодії АХ з бездислокаційними ( $\rho_d < 10^7 \text{ м}^{-2}$ ) напівпровідниками, у яких відсутні акустоактивні дефекти. Для  $n$ -Si,  $p$ -Si та  $n$ -Ge АС зміни електрофізичних параметрів не спостерігалися. В той же час для зразків  $p$ -Ge, легованих галієм з концентрацією носіїв  $n(77\text{K}) = (10^{19} - 10^{21}) \text{ м}^{-3}$ , такі АС зміни транспортних характеристик виявлено (рис. 8).

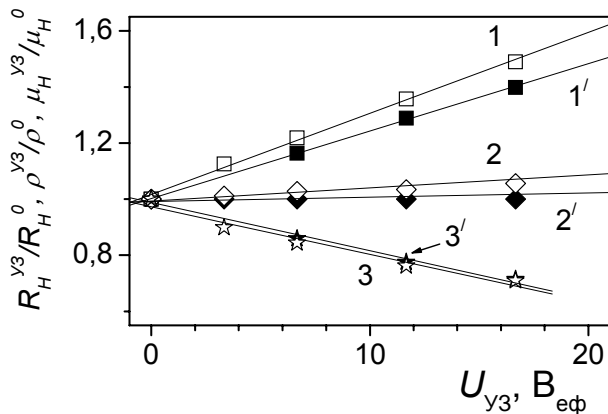


Рис. 8.  $p$ -Ge. АС залежності динамічних змін магнетоопору (криві 1,1'), коефіцієнта Холла (2,2') та холлівської рухливості дірок (3,3') від амплітуди АХ при 120 К. Криві 1, 2 і 3 (світлі точки) — при  $B=0,05$  Тл; 1', 2', 3' (темні точки) — при  $B=0,5$  Тл.

Аналіз одержаних результатів проведено в рамках теорії явищ переносу в моделі гофрованих сфер для напівпровідників з виродженою валентною зоною. АС збурення фундаментальних зонно-енергетичних характеристик кристала вказують на можливі зміни розсіювання носіїв заряду в умовах УЗ навантаження, які відмінні для важких і легких дірок. До початку досліджень (кінець 90-х років), результати яких викладено в наступному розділі, загальна картина деформаційних механізмів взаємодії АХ в напівпровідникових кристалах була якісно з'ясована. Було зрозуміло також, що «акустична чутливість» дефектно-домішкової структури (ДДС) кристала визначається її лабільністю. В той же час акустичний вплив на енергетично збурену ДДС, що знаходиться в термодинамічно-нерівноважному стані, який виникає, наприклад, при радіаційному чи лазерному опроміненні, імплантації йонів тощо, - не досліджувалися. Запропонована проф. Б.М. Романюком співпраця по вивченню дії АХ на процеси йонної імплантації дозволила не тільки отримати багаточисленні практичні і фізичні результати, але поставила питання про механізми акусто-дефектної взаємодії принципово відмінного характеру, а саме про інформаційний чинник впливу АХ на систему нерівноважних радіаційних дефектів твердого тіла [5\*].

**У шостому розділі** розглянуто особливості процесів АС модифікації дефектно-домішкової структури кристалу при імплантації та при одночасній дії інтенсивних АХ. Використання АХ в процесі формування надмілких  $p$ - $n$  переходів дозволило отримати ряд важливих технологічних результатів, перелік яких наведено далі. Аналіз у кожному випадку вимагав спеціального пояснення механізму акусто-дефектної взаємодії, яка проявлялась, в основному, вже після технологічних відпалів зразків (в атмосфері  $\text{Ar}$  при  $700$ - $1200^\circ\text{C}$ ).

- *АС звуження профілю імплантованого в кремній бору.* Використовуючи методи вторинної іонної мас-спектроскопії (ВІМС) та просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ) встановлено, що відпал кремнієвої структури імплантованої без УЗ навантаження, призводить до розширення профілю розподілу бору в глибину зразка. В той же час, профіль при дії АХ залишається незмінним навіть після відпалу. Запропонована загальна модель, згідно з якою під дією УЗ навантаження відбувається АС видалення з області імплантації міжвузлових атомів кремнію, які утворюються при йонній імплантації; в результаті, у приповерхневій області накопичуються вакансійні дефекти і відбувається частковий відпал радіаційних дефектів та активація імплантованих атомів бору уже в процесі їхньої імплантації. Виявлено значне підвищення фоточутливості кремнієвих сенсорів видимого та ультрафіолетового випромінювання виготовлених методом АС імплантації йонів бору та арсену.

- *АС покращення вольт-амперних характеристик надмілких  $p^+-n$  і  $n^+-p$  переходів* та підвищення однорідності розподілу їх електрофізичних характеристик по площі пластини було отримано для МОН-транзисторів. Досягнуте зростання напруги пробую  $V_{HP}$  в 1,5-1,6 рази і відповідне зменшення струму витоку при зворотному зміщенні (рис.9) засвідчили покращення дефектної структури переходу і перспективність застосування акусто-йонної імплантації в виробництві мікроелектронних приладів.

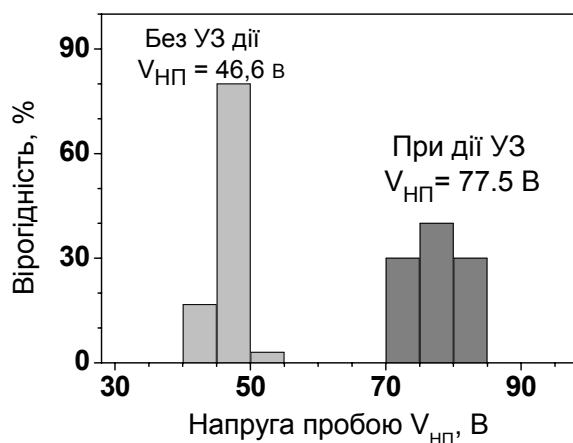


Рис. 9. Діаграми розподілу порогових значень напруги пробую  $V_{HP}$  на зворотніх гілках ВАХ  $p^+-n$  переходів, сформованих як без АХ, так і при АХ, відповідно.

- Застосування АХ при імплантації в Si атомів Ag зумовило збільшення (в ~1,3 рази) товщини аморфізованого шару, що було встановлено методами зворотнього резерфордівського розсіювання та спектральної еліпсометрії. При цьому АХ спричинює рух внутрішньої межі розділу аморфної та кристалічної фаз до поверхні і аморфний шар в результаті приповерхневого накопичення вакансій виникає вже безпосередньо в приповерхневій області пластини.

- Використання АХ при йонній імплантації  $He^+$  в епітаксійні структури спричинило додаткове зменшення механічних напруг в структурі  $Si_xGe_{1-x}/Si$  (виявлене методами рентгенівської дифракції та комбінаційного розсіювання), що дало змогу отримувати малодфектні структури з більшою товщиною SiGe-плівки та вмістом Ge (до 30%). Основним механізмом прискореної АС релаксації механічних напружень в

SiGe/Si:He, як показали результати просвічуючої електронної мікроскопії і селективного травлення, є АС впорядкування дислокаційної сітки та зростання імовірності анігіляції проникаючих дислокацій.

- Досліджено вплив АХ на формування нанокластерів (НК)  $Si/SiO_2$  в процесі імплантації йонів  $Si^+$  в  $SiO_2$  з наступним відпалом при  $1050^\circ C$ . Встановлено, що при використанні АХ з  $W_{AX}=(0,2-1,0) \text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$  спостерігається послаблення (в  $\sim 2$  рази) інтенсивності фотолюмінесценції (ФЛ – смуга 1,5 eV) та зміна (при зростанні  $W_{AX}$ ) складу рекомбінаційних Рb-центрів (метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії), які розташовані на границі поділу НК-Si/SiO<sub>2</sub>; відбувається зменшення (від 11% до 1%) недоокислених фрагментів одно-трьох валентних кремнієвих окислів  $Si^{I+}$  -  $Si^{3+}$ . Отже, застосування АХ in-situ дозволяє керувати певними характеристиками нанокластерів Si та їхніми ФЛ властивостями і це може бути основою для розробки принципово нових технологічних методів АС йонно-променевої інженерії формування нанокристалів як кремнію, так й інших матеріалів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено проблему встановлення фізичних закономірностей акустостимульованої модифікації параметрів у напівпровідниках. Отримано широкий набір експериментальних результатів стосовно механізмів взаємодії акустичних хвиль (АХ) в залежності від матеріалу, структури дефектів та умов експерименту; визначено умови використання АХ для дослідження дефектів напівпровідникових кристалів та технології матеріалів. Виходячи з аналізу проведених досліджень можна сформулювати такі основні результати та висновки роботи:

1. Вперше досліджено зміни фізичних характеристик напівпровідникових кристалів  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x=0,17-0,23$ ) при динамічному акустичному навантаженні; виявлено ряд нових АС ефектів: амплітудно-залежне внутрішнє тертя, акустополаризація (виникнення електричного заряду на поверхні зразка), акустопровідність, інверсія типу провідності тощо. Немонотонний характер амплітудних залежностей акустичних характеристик кристалів КРТ пояснюється багатопороговим характером процесів АС перебудови як точкових, так і лінійних дефектів кристала. Виявлено квазірезонансний характер взаємодії АХ з малокутовими межами субблоків, який проявляється у низькочастотній ( $< 30 \text{ МГц}$ ) дисперсії швидкості та коефіцієнта поглинання АХ.

2. В кристалах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  виявлено АС динамічні оборотні (час релаксації від 10 до  $10^3$  с) зміни концентрації електронів  $n_e$  та їх рухливості  $\mu_n$ . Встановлено, що зміни  $n_e$  викликані збільшенням внеску в провідність електронної компоненти; зменшення  $\mu_n$  в області власної провідності ( $T > 120 \text{ К}$ ) є результатом АС зростання ефективності розсіювання на сплавному потенціалі й оптичних фононах; збільшення  $\mu_n$  в області домішкової провідності ( $T < 120 \text{ К}$ ) характерне лише для структурно недосконалих кристалів і є наслідком збільшення ефективного об'єму кристалу на рівні протікання за рахунок АС згладжування макроскопічного внутрішньо-кристалічного потенціалу.

Розроблено модель акустоактивації зв'язаних на дислокаціях електрично-активних дефектів, в рамках якої розраховано характерні параметри акусто-дефектної взаємодії.

3. Проведено комплексні дослідження залишкових АС ефектів в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Встановлено взаємозв'язок та кореляцію між дислокаційною структурою, акустичними ( $\alpha_{AX}$  і  $V_{AX}$ ), електрофізичними ( $n_e$  і  $\mu_H$ ), шумовими (параметр Хоуге) та фотоелектричними (час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau_{HH3}$ ) параметрами та їх АС змінами в КРТ. УЗ обробка, в залежності від  $W_{AX}$ , стимулює процес „заліковування” (в об'ємі субблоків) та генерацію (область МКМ) вакансій ртуті, що веде до зміни електрофізичних параметрів матеріала аналогічно до низько-температурних відпалів у насичених парах ртуті. Показано, що УЗО збільшує довготривалу стабільність електрофізичних та фотоелектричних параметрів. На основі отриманих результатів запропоновано спосіб покращення цих параметрів (зростання  $n_e$  і  $\mu_H$  на 20-50%;  $\tau_{HH3}$  на 50-300%) та зменшення рівня шуму  $1/f$  (в  $\sim 10$  разів).

4. Виявлено АС зростання квантового виходу світловипромінюючих  $\text{GaP}$ -діодів; показано, що головна роль в процесах їхньої деградації при інтенсивних УЗО належить рухомим дислокаціям, а виникнення в спектрі нестабільних з часом вузьких ліній і смуг є наслідком утворення складного рухомого дефекта дислокаційної природи. Встановлено, що УЗО радіаційно опромінених кристалів  $\text{InP}$  та світлодіодів  $\text{GaP}$  сприяє відновленню характеристик їхнього світіння, яке пов'язане з АС упорядкуванням дефектної структури кристала.

5. Розроблено нові методики дослідження дефектів у напівпровідникових кристалах в процесі (in situ) їх акустичного навантаження – динамічний акусто-Холл, термоакустичний відпал, кінетика акустопровідності в імпульсному режимі.

6. Досліджено вплив АХ на електрофізичні характеристики кристалів бездислокаційного  $p\text{-Ge}$ ; встановлено, що ефективність впливу залежить від температури та магнітного поля і визначається процесами АС збільшення відносної кількості легких дірок та зростання розсіювання важких дірок на йонізованих домішках.

7. У радіаційно-опромінених зразках  $\text{Si}$  та  $\text{Ge}$  виявлені та ідентифіковані “акустоактивні дефекти”, які характеризуються наявністю метастабільних станів; АС перехід між цими центрами супроводжується повторно-оборотними змінами електрофізичних характеристик. Встановлено, що такими дефектами є: в  $\text{Si-Cz}$  зразках – А-центри і дивакансії; в  $\text{Si-Fz}$  зразках – дивакансії і/або комплекси  $\text{P}_s\text{-C}_i$ .

8. Запропоновано і реалізовано метод використання АХ в процесі йонного легування. Виявлено цілий ряд позитивних АС ефектів при технологічних операціях виготовлення  $p\text{-n}$  переходів методом йонної імплантації: а) звуження профілю імплантованого  $\text{B}^+$  в  $\text{Si}$ ; б) збільшення товщини аморфізованого шару  $\text{Si}$  при імплантації  $\text{Ag}^+$ ; в) прискорення релаксації механічних напружень в гетероструктурах  $\text{SiGe/Si}$ ; г) удосконалення діодних структур сформованих імплантацією атомів  $\text{B}^+$  та  $\text{As}^+$  в  $\text{Si}$  та покращення їхньої фоточутливості; д) упорядкування нанокластерів  $\text{Si}$  в матриці  $\text{SiO}_2$ . Показано практичну можливість акустичного керування процесами дефектотворення

при імплантації безпосередньо на стадії релаксації атомних зміщень шляхом вибору параметрів АХ.

9. Проведено аналіз особливостей процесів дефектоутворення у приповерхневій області кристалів Si в нерівноважних умовах, викликаних одночасними імплантацією та дією АХ. Показано, що залежно від вихідних умов експерименту (матеріал підкладки, тип та енергія йонів) змінюються процеси дефектоутворення і визначальні механізми дії АХ; розвиток структури радіаційних дефектів є результатом спільної взаємодії всіх підсистем кристала, причому їхня поведінка узгоджена. Закономірності АС перебудови структурних дефектів при імплантації йонів Ag, As, B, Si, O визначаються механізмом „акустостимульованої самоорганізації” радіаційних дефектів, який, в свою чергу, пов’язаний з процесами нелінійної взаємодії АХ з нерівноважними дефектами кристала. Показано, що в цих умовах саме нерівноважність і лабільність дефектів є головними чинниками їх ефективної взаємодії з АХ.

10. Проведено узагальнену систематику АС явищ залежно від механізму взаємодії та визначального чинника дії АХ. Показано, що всі відомі АС явища у напівпровідниках за характером дії АХ, способом її виявлення, за функціональними можливостями застосування, можна розділити на три окремі класи: а) динамічні; б) технологічні; в) інформаційні. Вперше сформульовано характерні передумови та прикмети реалізації інформаційного чинника дії АХ у різних експериментальних ситуаціях.

Отримані в дисертації результати є системою даних щодо впливу АХ на точкові та лінійні дефекти у кристалах КРТ, Ge та Si. Ці результати та розроблені в дисертації методи досліджень можуть бути використані для подальшого вивчення фізичних властивостей напівпровідників, для вироблення рекомендацій щодо акустичного керування властивостями напівпровідникових пристроїв та методик вимірювання параметрів акустоактивних дефектів в кристалах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1\*. Островський И. В. Акустооптика / И. В. Островський, О. О. Коротченков. – К. : Вища школа, 2003. – 223 с.
- 2\*. Loktev V. M. On the nature of ionic crystals' sonoluminescence excitation threshold: point-defect generation / V. M. Loktev, J. Khalack // J. Lumin. – 1998. – Vol. 76-77. – P. 560-563.
- 3\*. Баранский П. И. Механизм изменения подвижности носителей заряда при УЗ обработке полупроводниковых твердых растворов / П. И. Баранский, А. Е. Беляев, С. М. Комиренко, Н. В. Шевченко // ФТТ. –1990. –Т. 32, –№7. –С. 2159-2161.
- 4\*. Любченко А. В. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники / А. В. Любченко, Е. А. Сальков, Ф. Ф. Сизов. – К. : Наукова думка, 1984. – 254с.
- 5\*. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин; пер. с англ. В.Ф.Пастушенко.– М. : Мир, 1979. – 512 с.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ

1. Поглощение и скорость распространения УЗ в нейтронно-легированном кремнии / Я. М. Олих, А. Д. Беляев, Е. Г. Миселюк [и др.] // Электронная техника. Сер. 6: Материалы. – 1983. – Т. 175, № 2. – С. 40–43.
2. Олих Я. М. Влияние УЗ на акустические характеристики кристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / Я. М. Олих, Е. А. Сальков, К. Р. Курбанов // ФТП. – 1985. – Т. 19, № 4. – С. 762–765.
3. Любченко А. В. Электрические эффекты, стимулированные колебательной деформацией, в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / А. В. Любченко, Я. М. Олих // ФТТ. – 1985. – Т. 27, № 8 – С. 2505–2506.
4. Олих Я. М. Дисперсия звука в субблочных кристаллах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / Я. М. Олих, К. С. Дуброва, К. С. Суханов // УФЖ. – 1989. – С. 1-6. Деп. в ВИНТИ, № 4726-B89.
5. Влияние УЗ на гальваномагнитные эффекты в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / П. И. Баранский, Р. М. Винецкий, Я. М. Олих [и др.] // ФТП. – 1986. – Т. 20, № 6 – С. 1104–1106.
6. Калитенко В. А. Дислокационный механизм акустических потерь в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / В. А. Калитенко, Я. М. Олих, В. М. Перга // УФЖ. – 1998. – Т. 33, № 5. – С. 788–790.
7. Баранский П. И. Роль МУГ в изменении электрофизических параметров  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  под действием УЗ / П. И. Баранский, К. А. Мысливец, Я. М. Олих // ФТТ. – 1989. – Т. 31, № 9 – С. 278–280.
8. Любченко А. В. Рекомбинация носителей через акцепторные уровни собственных дефектов в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , подвергнутых УЗ обработке / А. В. Любченко, К. А. Мысливец, Я. М. Олих // ФТП. – 1990. – Т. 24, № 1. – С. 171–174.
9. Мысливец К. А. Роль МУГ в изменении рекомбинационной активности глубоких центров  $\text{CdHgTe}$  под действием УЗ / К. А. Мысливец, Я. М. Олих // ФТТ. – 1990. – Т. 32, № 10. – С. 2912–2916.
10. Особенности акустического воздействия на кристаллы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с разным содержанием собственных акцепторов / Л. А. Карачевцева, Я. М. Олих, К. А. Мысливец [и др.] // УФЖ. – 1990. – Т. 35, № 3. – С. 468–472.
11. ВЧ усиление свечения ЭЛ МДГДМ структур на  $\text{ZnS:Mn}$  / В. В. Дякин, Б. В. Куриленко, Я. М. Олих [и др.] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, № 12. – С. 2389–2391.
12. Олих Я. М. О влиянии УЗ на отжиг радиационных дефектов в нейтронно-легированном Ge / Я. М. Олих, Н. И. Карась // ФТП. – 1996. – Т. 30, № 8. – С. 1455–1459.
13. Олих Я. М. Акустостимулированное подавление шума в кристаллах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  / Я. М. Олих, Ю. Н. Шавлюк // ФТТ. – 1996. – Т. 38, № 11. – С. 3365–3371.
14. Олих Я. М. Акустостимулированная активация глубоких уровней в нейтронно-легированном германии / Я. М. Олих, Р. К. Савкина // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 1996. – № 31. – С. 62–67.
15. Оліх Я. М. Акустостимульований зсув температури інверсії знака коефіцієнта Холла у радіаційно-легованих кристалах германію / Я. М. Оліх, Р. К. Савкіна // УФЖ. – 1997. – Т. 42, № 11-12. – С. 1385–1389.



16. Воробкало Ф. М. Особливості пружних властивостей кристалів нейтронно-легованого германію / Ф. М. Воробкало, Я. М. Оліх // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. – 1997. – № 32. – С. 90–95.
17. Вплив дефектів ультразвукового походження на електролюмінесценцію в GaP / Р. М. Вернидуб, Я. М. Оліх, П. Г. Литовченко [та ін.] // УФЖ. – 1995. – Т. 40, № 8. – С. 886–890.
18. Особливості деградації електролюмінесценції випромінення фосфороіндієвих структур, спричинене ультразвуком / О. М. Гонтарук, А. П. Кудін, Я. М. Оліх [та ін.] // УФЖ. – 1997. – Т. 42, № 10. – С. 1267–1272.
19. Деградационно-релаксационные явления в светоизлучающих *p-n* структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком / О. М. Гонтарук, Д. В. Корбутяк, В. Ф. Мачулин, Я. М. Оліх [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 15. – С. 64–68.
20. Деградаційно-релаксаційні процеси в GaP, стимульовані ультразвуком / В. Г. Литовченко, О. М. Гонтарук, Я. М. Оліх [та ін.] // Доповіді НАН України. – 1998. – № 11. – С. 83–88.
21. Власенко А. И. Акустостимулированная активация связанных дефектов в твердых растворах / А. И. Власенко, Я. М. Оліх, Р. К. Савкина // ФТП. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 410–414.
22. Власенко О. І. Особливості динамічного впливу ультразвуку на електрофізичні параметри напівпровідникових кристалів CdHgTe ( $x=0,2$ ) / О. І. Власенко, Я. М. Оліх, Р. К. Савкіна // УФЖ. – 1999. – Т. 44, № 5. – С. 618–621.
23. Власенко А. И. Подвижность носителей заряда в кристаллах *n*-CdHgTe в условиях динамического ультразвукового нагружения / А. И. Власенко, Я. М. Оліх, Р. К. Савкина // ФТП. – 2000. – Т. 34, № 6. – С. 670–676.
24. Olikh Ya. M. Acoustodynamic transformation of the defect structure in  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  alloys / Ya. M. Olikh, R. K. Savkina, O. I. Vlasenko // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2000. – Vol. 3, № 3. – P. 304–307.
25. Власенко О. І. Природа акустостимульованої зміни рухливості електронів в кристалах *n*-Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te / О. І. Власенко, Я. М. Оліх, Р. К. Савкіна // УФЖ. – 2001. – Т. 46, № 9. – С. 950–956.
26. Мачулін В. Ф. Анізотропія пружних властивостей Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te ( $x=0,2; 1,0$ ) / В. Ф. Мачулін, Я. М. Оліх, І. О. Лисюк // УФЖ. – 2000. – Т. 45, № 11. – С. 1341–1344.
27. Lysiuk, I.O. Properties and application of ultrasonic Lamb waves in Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te plates / I. O. Lysiuk, V. F. Machulin, Ja. M. Olikh // Semiconductor Physics, Quantum Electronic & Optoelectronics. – 2002. – Vol. 5, № 1. – P. 31–35.
28. Olikh Ja. Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics / Ja. M. Olikh, O. Ya. Olikh // Сенсорна Електроніка і Мікросистемні Технології. – 2004. – №1. – С. 19–29.

29. Гусейнов Н. А. Восстановление ФЭ параметров кремниевых СЕ облученных  $\gamma$ -квантами с помощью УЗ / Н. А. Гусейнов, Я. М. Олих, Ш. Г. Аскеров // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 1. – С. 38–44.
30. Ultrasound effect on radiation damages in boron implanted silicon / B. Romanjuk, D. Kruger, Ya. Olikh, V. Melnik [et.al.] // Semiconductor Physics, Quantum Electronic & Optoelectronics. – 2000. – V. 3, № 1. – P. 15–18.
31. Mechanisms of silicon amorphization at the US action during ion implantation / B. Romanyuk, D. Kruger, Ya. Olikh [et.al.] // УФЖ. – 2001. Т. 46, № 2. – С. 191–195.
32. Modification of the Si amorphization process by in situ ultrasonic treatment during ion implantation / B. Romanyuk, V. Melnik, Ya. Olikh [et.al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2001. – № 16. P. 397–401.
33. Influence of in-situ ultrasound treatment during ion implantation on amorphization and junction formation in silicon / D. Krüger, B. Romanyuk, Ya. Olikh, V. Melnik [et.al.] // J. Vac. Sci. Technol. – 2002. – V. B20, № 4. – P. 1448–1452.
34. SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> phase formation by ion implantation with in-situ us treatment / O. Martinyuk, Ya. Olikh, V. Melnik [et.al.] // In “Science and Technology of Semiconductor-on-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment”, Ed. D. Flandre et al. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. – 2005. – P.97–102.
35. Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in situ ultrasound treatments / B. Romanyuk V. Kladko, Ya. Olikh [et.al.] // Mater. Sci. in Semicond. Processing. – 2005. – Vol. 8, № 4. – P. 171–175.
36. Characteristics of silicon *p-n* junction formed by ion implantation with in-situ ultrasound treatment / V. P. Melnik, Ya. M. Olikh., V. G. Popov [et.al.] // Material Science and Engineering B. – 2006. – V. 124-125. – P. 327–330.
37. Поліпшення фоточутливості Si-сенсорів, виготовлених методом акустостимульованої імплантації йонів бору та арсену / Ю. В. Голтв'янський, В. Ф. Мачулін, Я. М. Оліх [та ін.] // Сенсорна Електроніка і Мікросистемні Технології. – 2007, № 2. – С. 3–8.
38. Peculiarities of the defect formation in the near-surface layers of si single crystals under acoustostimulated implantation of ions of boron and arsenic / O. I. Gudymenko, V. P. Kladko, Ya. M. Olikh [et.al.] // Ukr. J. Phys. – 2008. –V. 53, № 2. – P. 140–145.
39. Light emission from nanocrystalline silicon clusters embedded in silicon dioxide: Role of the suboxide states / A. Romanyuk, V. Melnik, Ya. Olikh [et.al.] // Journal of Luminescence. – 2010. – V. 130, № 1. – P. 87–91.
40. Оліх Я. М. Про можливості акустокерованої інженерії дефектів у „нерівноважних напівпровідниках” / Я. М. Оліх // Нові технології. Наук. вісник КУЕІТУ. – 2008. – № 2 (20). – С. 188–193.
41. Оліх Я. М. Вплив ультразвуку на формування домішково-дефектної структури кремнію в процесі йонно-променевої імплантації / Я. М. Оліх // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2010. – № 1 (27). – С. 124–130.

42. Акустойонні та акустоелектронні технології / В. Ф. Мачулін, Я. І. Лепіх, Я. М. Оліх, Б. М. Романюк. // Вісник НАН України. – 2007. – № 5. – С. 3–8.
43. Олих Я. М. Акустостимулированное понижение температуры отжига радиационных дефектов в Ge / Я. М. Олих, И. А. Лисюк, Н. Д. Тимочко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 9–13.
44. Бабич В. М. Вплив УЗ на транспортні явища в бездислокаційних кристалах p-Ge / В. М. Бабич, Я. М. Оліх, М. Д. Тимочко // Наукові записки НаУКМА. Фіз.-мат. науки. – 2004. – Т. 23. – С. 44–50.
45. Олих Я. М. Акустостимулированное преобразование радиационных дефектов в  $\gamma$ -облученных кристаллах кремния n-типа / Я. М. Олих, Н. Д. Тимочко, А. П. Долголенко // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, № 13. – С. 67–73.
46. Вплив ультразвуку на електричну активність радіаційних дефектів у  $\gamma$ -опромінених кристалах кремнію n-типу // В. М. Бабич, О. П. Долголенко, Я. М. Оліх, М. Д. Тимочко // Ядерна фізика та енергетика. – 2007. – № 1 (19). – С. 95–102.
47. Тимочко М. Д. Акусточутливий сенсор на основі напівпровідникового датчика Холла / М. Д. Тимочко, Я. М. Оліх // Сенсорна Електроніка і Мікросистемні Технології. – 2007. – № 1. – С. 44–49.
48. Babych V. M. Influence of ultrasound treatment and dynamic (in-situ) ultrasound loading on the temperature hysteresis of electrophysical characteristics in irradiated n-Si-Fz / V. M. Babych, Ya. M. Olikh, M. D. Tymochko // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2009. – V. 12, № 4. – P. 375–378.
49. Олих Я. М. Прямое наблюдение релаксации проводимости в  $\gamma$ -облученном кремнии n-типа под влиянием импульсов ультразвука / Я. М. Олих, Н. Д. Тимочко // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 1. – С. 78–84.
50. Olikh Ya. M. Thermoacoustic annealing of radiation-induced defects in InP / Ya. M. Olikh, V. P. Tartachnik, R. M. Vernidub. // Proc.Extern.Abstracts Intern. Conf. AE'91. Varna, 1991. – P. 95–96.
51. Pat. No. US 6,358,823 B1 USA, H 01 L 021/266. Method fabrication ion implanted doping layers in semiconductors materials and integrated circuits made therefrom". //Krueger Dietmar; Romanjuk Boris; Olikh Jaroslav [et.al.]; appl. No. 549103; filed 12.04.00; registration 19.03.02.

### АНОТАЦІЯ

**Оліх Я. М. Акустостимульовані явища у напівпровідникових реальних кристалах ( $A_2B_6$ ,  $A_3B_5$ , Ge, Si) – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків – Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, 2011.

Дисертація присвячена дослідженню акустостимульованих (АС) змін акустичних, електрофізичних та фотоелектричних властивостей напівпровідникових кристалів (сполуки  $A_2B_6$  та  $A_3B_5$ ; кристали Si та Ge; світловипромінюючі та діодні структури

ZnS:Mn, GaP) при дії ультразвуку (УЗ). В  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0.17-0.23$ ) виявлено нові динамічні АС ефекти: акустопровідність та інверсія типу провідності, акустополаризація, дисперсія УЗ хвиль, акустична емісія; встановлено резонансний характер взаємодії УЗ; показана можливість покращення фізичних характеристик матеріалу та їхньої стабільності. Запропоновані нові методики дослідження дефектів: динамічний акусто-холл, термоакустичний відпал, імпульсна акустопровідність. Вивчено механізми АС відновлення радіаційно пошкоджених напівпровідникових пристроїв. У радіаційно-опромінених зразках Si та Ge виявлені та ідентифіковані “акустоактивні дефекти”, які характеризуються наявністю метастабільних станів; АС перехід між ними супроводжується повторно-оборотними змінами електрофізичних характеристик. Реалізовано використання УЗ в процесі йонної імплантації в кремнієві пластини та структури; виявлено низку позитивних АС ефектів при технологічних операціях виготовлення  $p$ - $n$  переходів; проведено аналіз процесів дефектоутворення в нерівноважних умовах, викликаних одночасними йонною імплантацією та дією УЗ; показана можливість АС посилення процесів самоорганізації. Проведено узагальнену систематику АС явищ у напівпровідниках.

**Ключові слова:** напівпровідники, ультразвук, дислокації, радіаційні дефекти, акустостимульовані ефекти, ультразвукова обробка,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , Si, йоно-променева імплантація.

## ABSTRACT

**Olikh Ya. M. Acoustic-stimulated phenomenon in semiconductor real crystals ( $A_2B_6$ ,  $A_3B_5$ , Ge, Si) – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Science degree by the speciality 01.04.10 – physics of semiconductors and dielectrics. – V. E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2011.

The thesis is devoted to the study of acoustic-stimulated (AS) changes of acoustic, electro-physical and photoelectrical properties of semiconductor crystals ( $A_2B_6$  and  $A_3B_5$  compounds; Si and Ge crystals, ZnS:Mn, GaP light-emitting and diode structures) treated by ultrasound. In  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0.17-0.23$ ) new dynamic AS effects have been discovered: acoustic conductivity and inversion of the conductivity type, acoustic polarization, ultrasound waves' dispersion and acoustic emission. Also the possibility to improve of the material physical properties and its stabilities has been stated. New methods of defect studies have been proposed, namely dynamical acoustic-Hall effect, thermal-acoustic annealing, and pulse acoustic conductivity. Mechanisms of the AS restoring of the characteristics of radiation damaged semiconductor devices have been studied. In irradiated Si and Ge samples “acoustic-active defects”, characterized by the metastable states presence have been discovered and identified. AS transition among them is accompanied by the repeat-reverse changes of electro-physical characteristics. US treatment in the process of the ion doping in Si plates has been realized and some positive AS effects during technological operations of ion-implanted  $p$ -

$n$ -transitions' production have been discovered. Analysis of the defect creation in nonequilibrium conditions, caused by the simultaneous ion-implantation and intensive ultrasound has been made; a possibility of AS intensify of self-organization processes has been shown. Generalized systematics of AS phenomenon in semiconductors has been done.

**Keywords:** semiconductors, acoustic waves, dislocations, radiation defects, acoustic-stimulated effects, ultrasound treatment,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , Si, ion implantation.

## АННОТАЦИЯ

**Олих Я. М. Акустостимулированные явления в полупроводниковых реальных кристаллах ( $A_2B_6$ ,  $A_3B_5$ , Ge, Si) – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков – Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарьова НАН Украины, Киев, 2011.

Диссертация посвящена исследованию закономерностей акустостимулированных (АС) изменений акустических, электрофизических (ЭФ) и фотоэлектрических (ФЭ) свойств полупроводниковых кристаллов (дислокационные сложные соединения  $A_2B_6$  и  $A_3B_5$ ; бездислокационные кристаллы Si и Ge; светоизлучающие и диодные структуры  $\text{ZnS:Mn}$ , GaP; Si пластины и структуры) под действием ультразвукового (УЗ) нагружения. Показано, что взаимодействие УЗ с субблочным кристаллом  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0.17-0.23$ ) проявляет квазирезонансный характер, который предопределен малоугловыми границами субблоков. При динамической акустической нагрузке обнаружен ряд новых акустоэлектрических эффектов: амплитудно-зависимое внутреннее трение, акусто-поляризация (возникновение электрического заряда на поверхности образца), акустопроводимость, инверсия типа проводимости, акустическая эмиссия; обнаружено динамические обратимые (время релаксации от 10 до  $10^3$  с) изменения концентрации электронов  $n_e$  и их подвижности  $\mu_n$ . Установлено, что изменения  $n_e$  вызваны увеличением вклада в проводимость электронной компоненты; уменьшение  $\mu_n$  в области собственной проводимости ( $T>120\text{K}$ ) является результатом АС роста эффективности рассеивания на сплавном потенциале и оптических фононах. Разработана модель акустоактивации связанных на дислокациях электрически активных дефектов, в рамках которой рассчитаны характерные параметры акустодислокационного взаимодействия. На основе комплексных исследований остаточных АС эффектов рассмотрена модель внутреннего термоакустического отжига. Показано, что УЗ обработка (УЗО) увеличивает долговременную стабильность ЭФ и ФЭ параметров и приводит к их улучшению (рост  $n_e$  и  $\mu_n$  на 20-50%;  $\tau_{\text{HHЗ}}$  на 50-300%) и уменьшению уровня шума  $1/f$  (в  $\sim 10$  раз). Предложены новые методики исследования дефектов в кристаллах: динамический акустохолл, термоакустический отжиг, импульсная акустопроводимость. Изучены механизмы восстановления характеристик радиационно поврежденных полупроводниковых устройств с помощью УЗО. Обнаружен АС рост квантового выхода светоизлучающих GaP-диодов; показано, что главная роль в

процессах АС деградации (интенсивные УЗО) электролюминесценции *GaP* принадлежит подвижным дислокациям, а возникновение в спектре нестабильных со временем узких линий и полос является следствием образования сложного подвижного дефекта дислокационной природы.

В радиационно облученных образцах Si и Ge обнаружены и идентифицированы “акустоактивные дефекты”, которые характеризуются наличием метастабильных состояний; АС переход между этими состояниями сопровождается повторно-обратимыми изменениями ЭФ характеристик. Установлено, что такими дефектами являются: в Si-Cz образцах - А-центры ( $E_c-0.20$ ) эВ и дивакансии ( $E_c-0.26$ ) эВ; в Si-Fz образцах - дивакансии и/или комплексы  $P_s-C_i$  ( $E_c-0.23$ ) эВ. Обнаружено влияние УЗ на ЭФ характеристики бездислокационного p-Ge; установлено, что эффективность влияния зависит от температуры и магнитного поля и определяется АС процессами увеличения вклада в проводимость легких дырок.

Предложен и реализован метод использования УЗ в процессе ионного легирования. С помощью современных диагностических методов - вторичной ионной масс-спектропии, просветляющей и электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и комбинационного рассеивания, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии – обнаружен ряд положительных АС эффектов при технологических операциях изготовления p-n переходов: а) сужение профиля имплантированного  $B^+$  в Si; б) увеличение толщины аморфизированного слоя Si при имплантации  $Ag^+$ ; в) ускорение релаксации механических напряжений в гетероструктурах SiGe/Si; г) улучшение в УФ области фоточувствительности сенсоров, сформированных имплантацией атомов  $B^+$  и  $As^+$  в Si; д) упорядочение нанокластеров Si в матрице  $SiO_2$ . Проведен анализ особенностей процессов дефектообразования в приповерхностной области кристаллов Si в неравновесных условиях, вызванных одновременными имплантацией и действием УЗ. Показано, что закономерности АС перестройки структурных дефектов определяются механизмом „акустостимулированной самоорганизации” радиационных дефектов, который, в свою очередь, связан с процессами нелинейного взаимодействия УЗ с неравновесными дефектами кристалла.

Проведена обобщенная систематика АС явлений. Показано, что все известные АС явления в полупроводниках по характеру акустического действия, способу его проявления, по функциональным возможностям применения, - можно разделить на три отдельных класса: а) динамические; б) технологические; в) информационные. Впервые сформулированы характерные предпосылки и приметы реализации информационного фактора действия УЗ для различных экспериментальных ситуаций.

**Ключевые слова:** полупроводники, ультразвук, дислокации, радиационные дефекты, акустостимулированные эффекты, ультразвуковая обработка,  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , Si, ионно-лучевая имплантация.



