

## **Відділ фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства (№27)**



В лабораторії проф. К.Д.Глінчука.

Сидять (зліва направо): проф. А.В. Прохорович, проф. К.Д. Глінчук.

Стоять (зліва направо): Н.О.Бурлака, Н.М. Литовченко, Ф.М. Воробкало  
О.М. Стрільчук.

Відділ №27 було створено в 1996 р. на базі лабораторії фізики локальних центрів в напівпровідниках (керівник - д-р фіз.-мат. наук К. Д. Глінчук) для вивчення локальних центрів у технічно важливих напівпровідниках (кремній, напівпровідники груп  $A_2B_6$  і  $A_3B_5$  та їх потрійні сполуки) і більш інтенсивного впровадження в промисловість результатів досліджень впливу локальних центрів на властивості напівпровідників.

Відділ очолювали: д-р фіз.-мат. наук А. В. Прохорович (1996 – 2003 рр.), канд. фіз.-мат. наук О. Г. Коллюх (2003 - 2009 рр.), з 2009 р. відділ очолює д-р фіз.-мат. наук О. В. Мельничук. У відділі працює 3 доктори та 8 кандидатів наук.

Основний науковий напрямок – вивчення нерівноважних процесів в атомарних та інтерметалічних напівпровідниках та впливу різноманітних локальних центрів на їх перебіг; дослідження когерентного теплового випромінювання.

Вивчення локальних центрів розпочиналось в лабораторії фізики локальних центрів в напівпровідниках. Було проведено детальне дослідження впливу легування, пластичної деформації, опромінення, прогріву на поведінку глибоких центрів у кремнії, арсеніді галію та інших сполуках типу  $A_3B_5$ . Вперше отримано дані про взаємодію глибоких центрів з дефектами, створеними зовнішніми чинниками, визначено найважливіші рекомбінаційні параметри (енергетика, перерізи захоплення електронів та дірок, механізм рекомбінації, схема електронних переходів) багатьох електрично-активних домішок, а також структурних дефектів та різноманітних комплексів. Отримані результати дозволили створити загальну картину перебігу нерівноважних процесів на глибоких центрах (Глинчук К. Д., Литовченко Н. М., Прохорович А. В., Родіонов В.Є., Лінник Л.Ф.).

В результаті досліджень рекомбінаційних властивостей термодефектів та кисневих комплексів в кремнії отримані нові дані про структуру та характеристики цих комплексів, детально розглянуто статистику рекомбінації на них, вплив термообробки при різних температурах на їх концентрацію та час життя носіїв струму, що визначається цими комплексами, встановлені причини термічної нестабільності кремнію (Глинчук К.Д., Боримський В.В., Литовченко Н.М., Птицин В.Ю., Трошин А.Л.). Встановлено гетеруючу дію атомів вуглецю на зниження часу життя носіїв струму в кремнії, завдяки чому в термооброблених кристалах кремнію, що містять вуглець, спостерігаються досить високі часи життя носіїв струму (Глинчук К.Д., Литовченко Н.М.).

Досліджена дислокаційна фотолюмінесценція (0.5-1.2 eV) в одночасно пластично-деформованому, слабо-легованому кремнії при зміні різних параметрів: ступеня деформації, легування донорами або акцепторами, відсутністю або наявністю кисню та інш. Вперше виявлено зумовлений структурною перебудовою взаємозв'язок між залежностями максимуму смуги дислокаційної фотолюмінесценції та парамагнітної складової намагніченості від ступеня деформації в кисневмісному кремнії (Воробкало Ф.М.).

Завдяки систематичному дослідженню люмінесцентних властивостей арсеніду галію, вперше встановлена природа ряду глибоких центрів, детально вивчено вплив термообробок, деформацій та структурної недосконалості на спектри фотолюмінесценції кристалів арсеніду галію, вплив електронного, протонного та нейтронного опромінення та наступних відпалів на їх фотолюмінесценцію. Виявлено нові дефектні центри люмінесценції, з'ясовано їх природу, структуру та кінетику утворення, взаємодію з атомами міді і антиструктурними EL2 дефектами, визначено коефіцієнти дифу-

зії деяких домішок та радіаційно-створених дефектів (Воробкало Ф.М., Заєць М.С., Гурошев Вл.І., Гурошев В.І, Вінник Є.В., Вовченко В.І., Глинчук К.Д., Прохорович А.В., Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

Встановлено вплив нестехіометрії та атомів вуглецю на люмінесцентні характеристики кристалів арсеніду галію та участь нестехіометричних дефектів у рекомбінаційних процесах. Запропоновано неруйнівний метод визначення концентрації мілких домішок в напівізолюючому GaAs із спектрів крайової люмінесценції та отримано калібровочні залежності, що дозволяють визначати їх вміст в кристалах напівізолюючого GaAs ( Гурошев Вл.І., Гурошев В.І., Глинчук К.Д., Прохорович А.В. Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

Детальне вивчення низькотемпературної ( $T = 4.2$  К) екситонної фотолюмінесценції кристалів арсеніду галію дозволило уточнити статистику екситонної рекомбінації та визначити імовірність зв'язування вільних екситонів мілкими акцепторами та донорами ( Глинчук К.Д., Прохорович А.В., Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

Детально досліджено та проаналізовано спектри люмінесценції плівок GaAlAs різного складу ( Глинчук К.Д., Прохорович А.В., Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

Проведено детальні дослідження матеріалів, перспективних для створення детекторів іонізуючого випромінювання. Вивчено фотолюмінесценцію кристалів CdTe, CdZnTe при кімнатній ( $T=300$  К) температурі. Детальні дослідження низькотемпературної фотолюмінесценції кристалів та плівок  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  дали змогу сформулювати та уточнити основні критерії оцінки визначення складу  $x$  потрібних сполук  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . Встановлено пряму кореляційну залежність між спектрами низькотемпературної фотолюмінесценції легованих та нелегованих кристалів CdZnTe та енергетичною роздільною здатністю детекторів  $\gamma$ -випромінювання, виготовлених з цих кристалів. На підставі проведених досліджень запропоновано методику відбору кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , придатних для створення на їх основі високоякісних детекторів іонізуючого випромінювання (Глинчук К.Д., Прохорович А.В., Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

Проведено дослідження впливу потужного лазерного випромінювання та  $\gamma$ -опромінення на фотолюмінесцентні характеристики потрібних сполук  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ . Встановлено, що стимульовані лазерним випромінюванням зміни люмінесцентних властивостей кристалів  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ , зумовлені процесами дрейфу атомів ґратки в приповерхневій області в умовах сильних термічних напружень та термоградієнту, а також ефектом квантового обме-

ження (Прохорович А.В., Литовченко Н.М., Насєка Ю.М., Стрільчук О.М.). Гамма-опромінення кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  призводить до зміни концентрацій випромінювальних центрів, перетворення старих центрів, формування та введення нових центрів випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінацій, що пов'язано зі створенням вакансій кадмію та інших дефектів ґратки. Встановлено, що попередня обробка  $\gamma$ -опромінених кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  потужним лазерним випромінюванням призводить до суттєвого зменшення інтенсивностей радіаційно стимульованих смуг люмінесценції, що пов'язано з особливостями взаємодії радіаційних та лазерно-стимульованих дефектів (Глинчук К.Д., Насєка Ю.М., Литовченко Н.М., Стрільчук О.М.).

З 2003 року у відділі розпочато дослідження когерентного теплового випромінювання. В даний час ці роботи проводяться в лабораторії резонаторних джерел інфрачервоного випромінювання (керівник — Ліптуга А.І.), яка створена нещодавно і входить до складу відділу. Робота проводиться за тісної співдружності з співробітниками теоретичного відділу Інституту. Отримані такі найважливіші результати.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження теплового випромінювання (ТВ) напівпрозорих плоскопаралельних напівпровідникових пластин і шарів. Вперше показано, що в ТВ таких систем (одношарових та багатошарових) проявляється антенний ефект - пелюсткова діаграма направленості випромінювання та гострі спектральні піки, що свідчить про прояв когерентних властивостей ТВ. Ці особливості обумовлені резонаторними властивостями плоскопаралельних об'єктів, в яких виникає багатопроменева інтерференція. При високих значеннях коефіцієнту відбивання пластини напівширина спектрального піка випромінювання може становити 0.01 мкм (в області спектра 8 - 10 мкм), а ширина пелюсток - менше 1 градуса. Інтенсивність ТВ в спектральних діапазонах, що відповідають максимумам інтерференції плоскопаралельної пластини може суттєво перевищувати інтенсивність випромінювання ідентичної неплюскопаралельної пластини і досягати інтенсивності випромінювання чорного тіла. Отримані результати дозволили розробити і запатентувати ефективні джерела ІЧ-випромінювання з керованими параметрами (Коллюх О.Г., Ліптуга А.І., Мороженко В.О., Піпа В.Й.).

Виявлено, теоретично та експериментально досліджено новий магнітооптичний ефект - низькочастотна амплітудна модуляція спектра когерентного ТВ напівпровідникових шарів у зовнішньому магнітному полі. Ефект спостерігається в умовах анізотропії діелектричної проникності на-

півпровідника, створеної магнітним полем. Показано, що в конфігурації Фарадея спектр ТВ плоскопаралельного шару є сумою двох осцилюючих спектрів, один з яких відповідає поширенню хвиль з правою, а інший - з лівою циркулярною поляризацією. Досліджено аналогічний ефект, коли анізотропія діелектричної проникності напівпровідника створюється одновісним стисненням кристала. На підставі проведених досліджень запропоновано метод вимірювання параметрів напівпровідників (Коллюх О.Г., Ліптуга А.І., Мороженко В.О., Піпа В.Й.).

Вперше досліджено спектри і кутовий розподіл негативної люмінесценції планарних резонаторних структур з оптично тонким активним напівпровідниковим шаром. Показано, що в максимумах інтерференційних піків ефективність негативної люмінесценції таких структур може бути близькою до одиниці. Цим резонаторні структури вигідно відрізняються від відомих оптично тонких нерезонаторних структур, де неможливо досягти високої ефективності негативної люмінесценції. Внаслідок резонаторних властивостей структури в діаграмі направленості її негативної люмінесценції проявляється антенний ефект. Напрямки максимального поглинання зовнішнього фонового випромінювання для фіксованих довжин хвиль можуть відповідати нормальному падінню або ж утворювати коаксіальні конуси, осі яких перпендикулярні до поверхні структури. Кількість пелюсток у діаграмі направленості, їх направленість і ширини визначаються параметрами структури. Результати роботи можуть бути використані для створення нових джерел негативної люмінесценції з великою густиною випромінювання на певних довжинах хвиль, а також джерел із заданою діаграмою направленості (Коллюх О.Г., Ліптуга А.І., Мороженко В.О., Піпа В.Й.).

В роботі відділу велика увага приділяється прикладним розробкам.

На підставі досліджень поверхневого плазмонного резонансу розроблено низку приладів, що використовуються як біосенсиори. Ці прилади (під загальною назвою «Плазмон») відрізняються високою чутливістю та простотою використання і зарекомендували себе дієвим діагностичним засобом у біології та медицині. На даний час у біологічних та медичних закладах Києва використовуються десять приладів «Плазмон» різних поколінь. За кордоном ці прилади також здобули визнання, там вони відомі під назвою Biosuplar. Велика увага приділяється удосконаленню та модернізації біосенсорів для вирішення конкретних задач медицини. Спільно з Інститутом молекулярної біології та генетики НАН України розроблено біосенсорний елемент для label-free діагностики деяких видів лейкемії в реальному



часі. Спільно з Інститутом мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України створена імуносенсорна тест-система, що виявляє специфічні антитіла до вірусу Епштейна-Барра в сироватках крові хворих. Спільно з Інститутом нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова АМН України розроблено методики ранньої діагностики онкологічних захворювань головного мозку людини за допомогою біосенсорів. Розроблені біосенсори захищені патентами України (Ушенін Ю.В., Самойлов А.В., Христосенко Р.В., Ляпін О.М., Зиньо С.А.).

Одним з основних видів неселективних швидкодіючих неохолоджуваних сенсорів ІЧ-випромінювання є піроелектричні приймачі випромінювання, але їх широке використання, зокрема в системах дистанційного теплового контролю, ускладнюється необхідністю використання механічних модуляторів. Проведені разом з колегами із Інституту фізики НАН України дослідження дозволили запропонувати нові принципи побудови піроелектричних систем безконтактної температурної діагностики з неселективною електронною модуляцією теплового випромінювання. В дослідженнях в якості елементів модуляції використовувались інжекційні напівпровідникові модулятори інфрачервоного випромінювання. Було виявлено, що інжекційні модулятори є джерелом власного, в даних умовах - паразитного теплового випромінювання, яке суттєво ускладнює вимірювання слабких радіаційних потоків. Вивчення особливостей роботи інжекційних модуляторів дало змогу розробити оригінальний блок модуляції, який дозволяє компенсувати вплив випромінювання модулятора на точність вимірювання потоків малої потужності. Було створено низку безконтактних піроелектричних вимірювачів локальної температури, що працюють в діапазоні 200 ÷ 2000 °С. Вимірювачі можна використовувати в автоматичних системах керування різних технологічних процесів (лазерне й електронне зварювання, зонна плавка), а також для діагностики температури об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях (печі, двигуни, високовольтне устаткування та ін.).

Створений прилад, а також деякі його модифікації, в даний час використовуються в промисловості та в наукових дослідженнях, зокрема на НВО «Азурит» (м. Калуга) для контролю лазерної обробки керамічних плат; на підприємстві «СЕЛМІ» (м. Суми) для технологічного контролю при вакуумному напиленні; в Інституті надтвердих матеріалів НАН України для технологічного контролю при вирощуванні штучних алмазів. Прилад запатентовано в Україні та в Росії (Леваш Л.В., Ліптуга А.І., Самойлов В.Б.).

В межах Державних цільових програм «Сенсорика» та «Сертифікація» розроблено та створено низку твердотільних лазерів, малогабаритну лазерну уста-

новку середньої потужності для точкового зварювання, розроблено технологію проєкційного швидкісного мікромаркування (Орєшко Є.В.). Імпульсні твердотільні лазери з електрооптичною модуляцією добротності, активним елементом  $\text{Nd}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  і ламповим збудженням мають високі енергетичні характеристики (енергія моноімпульсу до 250 мДж при тривалості менш ніж 10 нсек) та невеликі габарити. Вони успішно експонувалися на міжнародних виставках лазерної техніки у Києві та Мюнхені. В даний час їх використовують для проведення наукових досліджень в Інституті фізики НАН України, Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, в наукових закладах Ізраїлю та Китаю. Установка для точкового зварювання може використовуватись у технологічних процесах для виготовлення прецизійної техніки, медичного інструментарію, в ювелірній справі, в захисному маркуванні та інше. Вона також може бути використана для різання різних матеріалів та виготовлення поверхневого рельєфу (розмір ширини різання – десятки мікрон). В межах названих цільових програм розроблено та створено надчутливий лазерний віброметр - енергетична чутливість  $2 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц, рівень шуму менше 0,01 нм для смуги частот  $0 \text{ Гц} < f < 10 \text{ КГц}$  (Серьожкін Ю.Г.). Надвисока чутливість віброметра та особливості конструкції дозволяють використовувати його як для вирішення традиційних задач неконтактної віброметрії, так і для вирішення задач мікроструктурного аналізу і дефектоскопії, а також застосовувати віброметр в біології та медицині.