

Академія наук України  
Інститут фізики напівпровідників

На правах рукопису  
УДК 621.315.592.

САЛЮК ОЛЬГА КРИЇВНА

"ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ ТА ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ InSb ТА Ge"

01.04.10. /фізика напівпровідників та діелектриків/

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико - математичних наук

Київ - 1993



00815351 (N)

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників АН України  
м. Київ.

- Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук, професор  
Малютенко Володимир Костянтинівич.  
кандидат фізико-математичних наук, старший  
науковий співробітник Болгов Сергія  
Семенович.
- Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
Владимиров Вадим Володимирович.  
кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Білинєць Юрій Юрійович.

Провідна організація - Політехнічний інститут, МВССО, м. Київ.

Захист відбудеться "15" жовтня 1993 року о "14" годині на  
засіданні Спеціалізованої Вченої Ради 016.25.01 при Інституті фізики  
напівпровідників АН України (252650, Київ-28, пр. Науки 45).З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту фізики  
напівпровідників АН України (252650, Київ-28, пр. Науки 45).Автореферат розісланий "14" вересня 1993 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Ради

Бєляєв О.Є.

## Загальна характеристика роботи.

Актуальність теми. Широке застосування напівпровідників в оптоелектроніці та інфрачервоної (ІЧ) техніці висуває на перший план задачу дослідження їх випромінювальних властивостей.

Випромінювання напівпровідника несе інформацію про рекомбінаційні процеси в матеріалі, його параметри та властивості. Крім того, дуже цікавим уявляється створення ІЧ-випромінювачів з внутрішньою модуляцією на спектральному діапазоні 3-5, 8-14 мкм, де практично відсутні джерела з високою швидкістю та достатньо великою потужністю випромінювання.

Для вирішення цієї задачі можуть бути використані вузькозонні напівпровідники, де міжзонні (прямі) переходи забезпечують випромінювання в заданому спектральному діапазоні. Але, при температурах, близьких до кімнатної, в вузькозонних напівпровідниках бар'єрні механізми управління концентрацією нерівноважних носіїв заряду не є ефективними. В той же час достатньо ефективними є безбар'єрні біполярні концентраційні ефекти і серед них магнітоконцентраційний ефект (МКЕ). В умовах МКЕ детально досліджено люмінесценцію напівпровідників з власною провідністю. Також була показана можливість збудження люмінесценції в умовах МКЕ в напівпровідниках з невласною провідністю. Розроблено неохолоджуваний випромінювач середнього ІЧ-діапазону, принцип дії якого заснований на МКЕ.

Іншою відомою можливістю створення джерела ІЧ-випромінювання з електричним управлінням в даному спектральному діапазоні є використання модуляції теплового випромінювання (ТВ), що формується вільними носіями заряду. Досліджено модуляцію теплового випромінювання однорідних напівпровідників, температура яких відрізняється від температури навколишнього фону.

Незважаючи на інтенсивні дослідження випромінювальних властивостей напівпровідників в середньому та далекому ІЧ-діапазонах, залишається ряд питань, які потребують вирішення та уточнення.

Практично не досліджена в умовах МКЕ люмінесценція легованих напівпровідників. Зважаючи на те, що на розвиток МКЕ значний вплив мають генераційно-рекомбінаційні процеси на поверхнях кристалу, актуальними вважається дослідження можливостей зменшення впливу на ефект недосконалості реальної

фізичної поверхні напівпровідника. Не вивчена модуляція теплового випромінювання за краєм власного поглинання багатоконпонентних напівпровідникових структур, де значний вплив мають умови відбиття на границях компонент. Не розглядалася можливість спостереження модуляції ТВ напівпровідника, який знаходиться в тепловій рівновазі з навколишнім фоном. Не вивчена модуляція ТВ напівпровідника в умовах магнітоградієнтного ефекту.

Мета роботи. Враховуючи вищевказане, метою даної роботи є:

- дослідження люмінесценції та ТВ напівпровідників і напівпровідникових структур в умовах різних концентраційних ефектів, розробка нових методів дослідження напівпровідникових матеріалів, створення ефективних випромінюючих пристроїв середнього ІЧ-діапазону.

Наукова новітність. При виконанні даної роботи вперше одержані результати:

1. Показана можливість управління характером польових залежностей позитивної та негативної люмінесценції в умовах МКЕ шляхом легування напівпровідників. Вказані оптимальний рівень легування і область полів, при яких досягається збільшення потужності випромінювання домішкового напівпровідника в порівнянні з матеріалом, що має власну провідність.

2. Показано, що в напівпровідникових структурах InSb з неоднорідним легуванням приповерхневої області створюються оптимальні умови для реалізації МКЕ.

3. В неоднорідній структурі InSb на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) в режимі збіднення виявлено область від'ємної диференційної провідності N-типу (N-ВДП) і нестабільність струму нелокальної природи, які виникають при МКЕ коли домінуючою є Оже-генерація-рекомбінація носіїв заряду.

4. Досліджено модуляцію ТВ двохкомпонентних структур на основі Ge.

5. Показана можливість спостереження модуляції ТВ напівпровідникових структур, які знаходяться в ізотермічних умовах з навколишнім фоном.

6. Досліджено модуляцію ТВ напівпровідників в умовах магнітоградієнтного ефекту (МГЕ).

Практична цінність. Розроблено високоефективні випромінюючі структури для середнього ІЧ-діапазону, що відрізняються високою технологічністю, яка дозволяє створювати одно- та багатоелементні випромінювачі, а також міри - пристрої для визначення роздільної

здатності оптико-електронних приладів з високою однорідністю випромінювання по площі поверхні.

Запропоновано і реалізовано комплексну методику визначення параметрів вузькозонних напівпровідників при кімнатній та більш високих температурах: часу життя, рухливості неосновних носіїв заряду та швидкості поверхневої рекомбінації на грані, що випромінює.

Запропоновано спосіб визначення компонент градієнту індукції магнітного поля по тепловому випромінюванню напівпровідника.

Наукові положення, що виносяться на захист.

1. Змінення рівня легування напівпровідників дозволяє керувати характером польових залежностей люмінесценції в умовах МКЕ. При великих відхиленнях концентрації носіїв заряду від рівноважного значення досягається збільшення потужності випромінювання домішкового напівпровідника в порівнянні з напівпровідником, що має власну провідність, в напівпровідниках з оптимальним легуванням.

2. В структурах InSb з неоднорідним легуванням приповерхневої області створюються оптимальні умови для реалізації МКЕ, при яких досягаються великі відхилення концентрації носіїв заряду від рівноважного значення. При цьому на ВАХ в режимі збіднення виникає область N-ВДП, що обумовлена зниженням темпу Оме-генерації за рахунок значного зменшення ефективної швидкості поверхневої рекомбінації в порівнянні з однорідними напівпровідником.

3. Модуляція ТВ двохкомпонентної структури, один з компонентів якої непрозорий, відбувається за рахунок змінення ефективного коефіцієнту відбиття даної структури, якщо коефіцієнт відбиття на границі компонентів не дорівнює нулю.

4. Модуляція ТВ напівпровідника, який знаходиться в ізотермічних умовах з навколишнім фоном, можлива при умові, що компенсація потоків теплового випромінювання напівпровідника, а також відбитого фонового випромінювання і того, що пройшло, порушується за рахунок випромінювання охолоджуваного фотоприймача.

5. В умовах магнітоградієнтного ефекту спостерігається модуляція ТВ напівпровідника. Величина модуляції ТВ визначається компонентом градієнта магнітної індукції, яка перпендикулярна до поверхонь зразка з великою швидкістю поверхневої рекомбінації.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися на

міжнародній школі-конференції по фізиці напівпровідників в Алушті в 1991 році "Notrmas-91" і в 1992 році "Semfa-92", четвертій Всесоюзній конференції по електронним датчикам "Сенсор-91" в Ленінграді в 1991 році.

Публікації. Зміст дисертації опубліковано в 8 друкованих творах, серед них 2 авторських свідоцтва. Список приведення в кінці автореферату.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, огляду літератури, методичного розділу, чотирьох оригінальних розділів, висновків та списку цитованої літератури. Загальний обсяг дисертації складає сторінок, з них сторінок тексту, малюнків, бібліографія включає 99 найменувань.

#### Короткий зміст роботи.

У вступі обумовлено актуальність теми і мету роботи, наукову новітність і практичну цінність отриманих результатів, приведено короткий зміст дисертації по розділах.

В першому розділі приведено огляд літератури, присвяченої дослідженням випромінювальних властивостей напівпровідників у середньому ІЧ-діапазоні. Відзначається, що практично не досліджений вплив рівня легування на люмінесценцію напівпровідників в умовах МКЕ. Не досліджені можливості оптимізації умов розвитку МКЕ за рахунок зниження впливу на ефект генераційно-рекомбінаційних властивостей недосконалої фізичної поверхні кристалу. Не досліджено вплив умов відбиття на границях поділу компонент складних напівпровідникових структур на їх теплове випромінювання. Вказано, що для спостереження модульованого сигналу ТВ необхідно, щоб температури напівпровідника і зовнішнього фону відрізнялись. При цьому не досліджено збурення, яке вноситься в баланс теплових потоків охолодженням фотсприймачем, що використовується для реєстрації модуляції ТВ напівпровідника. Відзначається, що для отримання модульованого сигналу ТВ позитивного і негативного контрасту може бути використаний МГЕ. Проте дослідження в цій галузі не проводилися. Такий стан досліджень в значній мірі стримує створення випромінюючих пристроїв середнього ІЧ діапазону і широке їх використання.

Другий розділ є методичним. В ньому обумовлений вибір матеріалів, описано технологію виготовлення однорідних зразків напівпровідни-

ка та напівпровідникових структур. Приведено блок-схему установки і методичку експериментальних досліджень нерівноважного випромінювання напівпровідників, які знаходяться під зовнішнім впливом.

В третьому розділі представлені результати досліджень міжзонного рекомбінаційного випромінювання легованих напівпровідників в умовах МКЕ. В наближенні лінійної рекомбінації проаналізовано хід польових залежностей позитивної та негативної люмінесценції р-InSb. Приведено числовий розрахунок польових залежностей  $\Delta P(E)$  і  $\Delta P(H)$  для двох рівнів легування ( $N_a = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і  $N_a = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) при різних швидкостях поверхневої рекомбінації на грані кристалу, що випромінює. Порівняння результатів числового розрахунку польових залежностей потужності люмінесценції  $\Delta P(\gamma)$  для лінійної і Оме-рекомбінації показує, що в кристалах з оптимальним легуванням навіть при кінцевих значеннях  $v_s = 10^4 \text{ см/с}$  досягається збільшення потужності люмінесценції домішкового напівпровідника в порівнянні з напівпровідником, що має власну провідність, в широкому діапазоні значень  $\gamma (\gamma \sim EH)$ . Значне збільшення потужності люмінесценції досягається при  $v_s = 0$ . В сильно легованих напівпровідниках, в яких носії мають дуже малий час життя, досягти вказаного збільшення потужності не вдається. При концентрації акцепторів  $1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  час життя носіїв при Оме рекомбінації досягає свого максимального значення, яке вдвічі перевищує час життя у власному матеріалі ( $\tau_i = 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ), що характерне для напівпровідників, в яких ефективні маси електронів і дірок суттєво відрізняються. При цьому час життя неосновних носіїв заряду визначається рекомбінацією Шоклі-Ріда і становить  $4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  в кристалах р-InSb з  $N_a = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і  $9 \cdot 10^{-10} \text{ с}$  в кристалах з  $N_a = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При малих значеннях електричного поля  $E$  ( $H = \text{const}$ ) потужність позитивної люмінесценції р-InSb з  $N_a = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  параболічно зростає, що свідчить про лінійну рекомбінацію носіїв заряду, характерну для низького рівня збудження ( $\Delta n = \Delta p \ll p_0$ ), і виходить на лінійний відрізок при великих значеннях  $E$ . В області слабких полів потужність люмінесценції власного напівпровідника більша, ніж домішкового, так як малий час життя неосновних носіїв заряду в р-InSb зважає значному їх накопиченню поблизу грані, що випромінює. Проте, при більших значеннях  $E$ , коли Оме-рекомбінація викликає сильну сублінійність залежності  $\Delta P_i(E)$ , потужність випромінювання р-InSb з  $N_a = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  стає більшою ніж потужність випромінювання

власного напівпровідника. Залежність  $\Delta P(E)$  для p-InSb з  $N_a = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  надлінійна у всьому діапазоні змінення електричного поля і лежить нижче  $\Delta P_i(E)$ . Залежність  $\Delta P(E)$  для p-InSb з  $N_a - N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  по мірі збільшення електричного поля має надлінійну, лінійну і сублінійну ділянки, які свідчать про зміну домінуючого механізму рекомбінації носіїв. Нахил початкових ділянок залежності негативної люмінесценції до осі абсцис по мірі збільшення рівня легування зменшується. Вихід на насичення відбувається при більших значеннях  $E$ . На залежності негативної та позитивної люмінесценції  $\Delta P(H)$  в p-InSb спостерігається замагнічування носіїв. По мірі збільшення рівня легування положення мінімумів і максимумів випромінювання зміщується в бік більших магнітних полів. Це пов'язано зі зменшенням рухливості носіїв заряду, так як для домішкового напівпровідника  $H_{min} \sim c/\mu_n$ . Обґрунтовано комплексний метод визначення параметрів вузькозонних напівпровідників при температурі, близькій до кімнатної. Він включає в себе вимірювання польових залежностей негативної люмінесценції  $\Delta P(H)$  при різних значеннях  $E$  і швидкостей поверхневої рекомбінації на грані, що випромінює, а також аналіз початкових ділянок залежностей  $\Delta P(H)$  і  $H_{min}(1/E)$ . Визначені такі значення для p-InSb з  $N_a = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ :  $\mu_n = 3.1 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В с}$ ,  $\tau = 3.3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ,  $s_- = 2 \cdot 10^4 \text{ см/с}$  на травлення поверхні і  $s_- = 5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$  на злегка полірованія поверхні InSb.

Досліджено особливості МКЕ в структурах InSb з різко неоднорідним розподілом домішок. Неоднорідність в розподіленні домішок досягається шляхом опромінення поверхні кристалу, що випромінює, рубіновим лазером з послідовним збільшенням інтенсивності випромінювання і кількості імпульсів. При цьому на опромінюванія поверхні формується неоднорідний легований шар завтовшки менш ніж 1 мкм з концентрацією акцепторів  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  в області максимального легування. Характер ВАХ до лазерної обробки поверхні і після неї показує, що швидкість поверхневої рекомбінації на опромінюванія грані зменшується. Про це свідчить підйом прямих ділянок ВАХ в режимі збагачення і зменшення струму, що тече через зразок, в режимі збіднення. При  $T = 180 \text{ К}$  значення  $s_-$  на опромінюванія грані зменшилось від  $2,8 \cdot 10^3 \text{ см/с}$  до  $4 \cdot 10^2 \text{ см/с}$ . Аналогічні результати були отримані при  $T = 300 \text{ К}$ . Зменшення  $s_-$  фіксувалося по зменшенню нахилу початкової прямолінійної ділянки польової залежності негативної люмінесценції. При обох температурах спостерігалось збільшення

інтенсивності позитивної люмінесценції. Зниження ефективної швидкості поверхневої рекомбінації пояснюється тим, що завдяки вбудованому полю, сформованому в приповерхневій області, максимальний перерозподіл носіїв відбувається не біля реальної поверхні кристалу, а на польовій грані, де практично повністю відсутні центри рекомбінації поверхневого типу.

При  $T = 300 \text{ K}$  в одержаній структурі InSb на ВАХ в режимі збіднення формується область N-ВДП, що обумовлена уповільненням темпу Оже-генерації носіїв. В однорідних вузькозонних напівпровідниках при домінуючій Оже-рекомбінації носіїв спостереження N-ВДП даного типу неможливо через великі значення  $s_+$ .

В четвертому розділі наводяться результати досліджень модуляції теплового випромінювання багатоконцентних (шарових) структур в умовах неоднорідного температурного поля фону. Аналізується модуляція ТВ структури, що складається з напівпровідника і непрозорої підкладки, які знаходяться в теплому контакті при температурі, котра відрізняється від температури навколишнього фону. Теплове випромінювання Р такої структури модулюється при змінненні її ефективного коефіцієнту відбиття за рахунок управління прозорістю напівпровідника. Якщо коефіцієнт відбиття на границі напівпровідник-вакуум  $R_1 = 1$ , то Р визначається тільки випромінюванням навколишнього фону. Якщо коефіцієнт відбиття на границі компонентів  $R_2 = 0$ , Р не залежить від прозорості напівпровідника і тому не модулюється. При  $R_2 > 0$  виникає модульований сигнал ТВ, який росте з ростом  $R_2$ . Максимальна величина модуляції ТВ досягається при  $R_2 = 1$  і не залежить від  $R_1$  при повному збідненні напівпровідника. Експериментальні дослідження проводились на зразках Ge в умовах МКЕ, який дозволяє як збільшувати, так і зменшувати прозорість напівпровідника. Змінення умов відбиття на границі компонентів структури напівпровідник-непрозора підкладка може привести як до збільшення, так і до зменшення величини модульованого сигналу ТВ в порівнянні з однорідним напівпровідником. Форма польових залежностей модуляції ТВ Ge в умовах МКЕ при цьому не змінювалась. При дзеркальному відбитті на границі компонентів амплітуда модуляції ТВ негативно-го контрасту даної структури вдвічі більша ніж однорідного напівпровідника.

Розглянуто можливість спостереження модуляції теплового випромінювання напівпровідника, який знаходиться в ізотермічних

умовах з навколишнім фоном, коли компенсація теплових потоків інтенсивності теплового випромінювання напівпровідника, а також відбитого фонового випромінювання і того, що пройшло порушується за рахунок холодного випромінювання фотоприймача. В даному випадку ефект модуляції ТВ спостерігається тільки, якщо  $R_2 > 0$ , тобто коли випромінювання холодного фотоприймача відбивається від зворотної поверхні напівпровідникового шару. Величина модульованого сигналу максимальна в плоскопаралельній структурі при наявності на віддалення від фотоприймача грані дзеркального шару. Досліджувалась модуляція ТВ планарних інжекційних структур  $p^+-Ge/p-Ge$  при  $T = 300$  К при різних умовах відбиття на зворотній грані. Відношення  $\Delta R(\eta)$  ( $\eta$  - прозорість напівпровідника) в структурі з дзеркальною поверхнею до  $\Delta R(\eta)$  при  $R_2 = R_1$  зменшується по мірі зменшення прозорості напівпровідника. При невеликому ( $\Delta T = 5^\circ - 10^\circ$ ) нагріві або охолодженні досліджуваної структури імпульс модульованого сигналу ТВ не змінював полярності. Це свідчить про те, що умови ізотермічності порушуються саме за рахунок випромінювання охолоджуваного фотоприймача. Потужність випромінювання близько  $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>.

В п'ятому розділі наведені результати досліджень модуляції ТВ Ge в умовах магнітоградієнтного ефекту. Вимірювались ВАХ, а також польові залежності ТВ напівпровідника в магнітному полі квадруполя при різній обробці бокових граней кристалу. Залежність ТВ зразка від величини магнітного поля, виміряна при його переміщенні відносно центра квадруполя, немонотонна і повторює хід відповідної компоненти градієнта магнітної індукції. Віддалення зразка від центра квадруполя приводить спочатку до зменшення, а потім до зміни знака теплового випромінювання. Положення, при якому відбувається зміна знака теплового випромінювання, характеризується відсутністю градієнта магнітної індукції в центрі зразка і наявністю градієнтів індукції протилежних знаків по обидві сторони від його центру. При розміщенні зразка в центрі магнітного квадруполя модуляція ТВ максимальна. При цьому область найбільшого перерозподілу носіїв заряду розміщена в центрі зразка, а не поблизу поверхні, генерація-рекомбінація носіїв на котрі суттєво обмежує їх перерозподіл. Зміна знака електричного поля приводить до інверсії характеристик ТВ. Залежність модуляції ТВ від електричного поля в даному випадку близька до лінійної як при збагаченні так і при збідненні напівпровідника носіями заряду. Зміна обробки бокових

граней кристалу також приводить до інверсії характеристик ТВ. В обох випадках теплове випромінювання напівпровідника визначається компонентою градієнта магнітної індукції, перпендикулярною до поверхонь з великою  $s$ .

Обґрунтовано спосіб визначення компонент градієнта магнітної індукції по тепловому випромінюванню напівпровідника.

В шостому розділі розглядаються принципи дії, конструкції та характеристики випромінюючих пристроїв середнього ІЧ-діапазону.

1. Випромінюючий елемент являє собою епітаксію структуру  $n$ -InSb/ $p$ -InSb/GaAs з омичним контактом до шару  $p$ -InSb, розміщену між полюсами електромагніту. Границя  $p$ -InSb/GaAs характеризується великою  $s_+$ , границя  $n$ -InSb/ $p$ -InSb має ефективну  $s_- = 0$ . Випромінююча поверхня має герметизуюче покриття з халькогенідного скла  $As_{36,5}Sb_{2,0}S_{23,0}Se_{23,0}Br_{15,5}$ , котре збільшує зовнішній квантовий вихід випромінювання. Робочий діапазон довжини хвилі 4-8 мкм, густина випромінювання  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>, інерційність  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с.

2. Випромінюючий елемент являє собою планарну структуру, яка складається з базового шару  $n$ -Ge або  $p$ -Ge. Шар  $p^+$ -Ge являє собою прозорий інжекційний або антизапірний (ексклюзивний) контакт. На протилежній поверхні базового шару сформований дзеркальний омичний контакт. Інжекція або ексклюзія нерівноважних носіїв заряду відбувається паралельно випромінюючій поверхні, що забезпечує високу однорідність випромінювання. Висока технологічність дозволяє створювати багатоелементні випромінювачі, а також міри - пристрої для визначення роздільної здатності оптико-електронних приладів. Непрозорі елементи міри наносяться на  $p^+$ -шар і відділені від нього шаром прозорого діелектрика. Робочий діапазон довжини хвилі 5-20 мкм, інерційність  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с, густина випромінювання  $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>, робочий діапазон температур  $T=300$ - $360$  К.

Основні результати і висновки.

1. Теоретично і експериментально досліджені польові залежності позитивної та негативної люмінесценції  $p$ -InSb в умовах МКЕ в широкому діапазоні зміни концентрації домішок і швидкості поверхневої рекомбінації на грані зразка, що випромінює. Показано, що зі збільшенням рівня легування напівпровідника форма польової залежності позитивної люмінесценції змінюється від сублінійної до лінійної і надлінійної за рахунок зміни домінуючого механізму рекомбінації.

Доведено, що в умовах лінійної рекомбінації потужність люмінесценції домішкового напівпровідника може бути більша, ніж власного при великих відхиленнях концентрації носіїв від рівноважного значення. Знайдено оптимальний рівень легування  $N_a - N_d = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , при якому спостерігається збільшення потужності випромінювання.

2. Запропоновано комплексну методику визначення в єдиному циклі параметрів вузькозонних напівпровідників при кімнатній і більш високих температурах - часу життя нерівноважних носіїв заряду, рухливості неосновних носіїв заряду і швидкості поверхневої рекомбінації на грані, що випромінює. З аналізу польових залежностей негативної люмінесценції  $\Delta P(H)$  для p-InSb з  $N_a - N_d = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  отримані такі значення:

$\mu_n = 3,1 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В с}$ ,  $\tau = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  і  $s_0 = 2 \cdot 10^4 \text{ см/с}$  для травленої поверхні InSb.

3. Досліджено особливості МКЕ в напівпровідниках з різко неоднорідним розподілом домішок. Показано, що лазерна обробка поверхні InSb, яка формує приповерхневий шар з концентрацією акцепторів близько  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , приводить до суттєвого зменшення ефективної швидкості поверхневої рекомбінації на цій грані від значення  $s_0 = 2,8 \cdot 10^3 \text{ см/с}$  до  $4 \cdot 10^2$  при  $T = 180 \text{ К}$ . При цьому для МКЕ реалізуються умови, наближені до оптимальних ( $s_0 \rightarrow 0$ ). Одержано критерія для концентрації домішок в приповерхневому шарі, яка забезпечує суттєве зменшення  $s_0$  і підвищення ефективності управління концентрацією нерівноважних носіїв при МКЕ.

4. Вперше в структурі InSb з різко неоднорідним розподілом домішку в приповерхневій області при  $T = 300 \text{ К}$  на ВАХ в режимі збіднення спостерігалась область N-ВДП, обумовлена уповільненням темпу оже-генерації носіїв завдяки значному зменшенню ефективної швидкості поверхневої рекомбінації на границі шарів структури.

5. Досліджено модуляцію теплового випромінювання напівпровідника, який знаходиться в тепловій рівновазі з непрозорою підкладкою при температурі, яка відрізняється від температури навколишнього фону. Показано, що модуляція ТВ такої двохкомпонентної структури виникає при зміні її ефективного коефіцієнта відбиття. При цьому модуляція ТВ структури можлива, якщо коефіцієнт відбиття на границі компонентів  $R_2 \neq 0$ . Максимальна величина модуляції досягається при  $R_2 = 1$ . При цьому амплітуда ТВ негативного контрасту даної структури вдвічі перебільшує таку саму для напівпровідника при відсутності дзеркальної підкладки.

6. Показано, що наявність у реструктурній системі охолоджуваного фотоприймача вносить значне збурення в баланс теплових потоків, так що спостереження ТВ напівпровідника можливе навіть коли його температура дорівнює температурі навколишнього фону.

7. Вперше досліджено модуляцію ТВ напівпровідника в умовах магнітоградієнтного ефекту. При цьому досягається як збільшення так і зменшення ТВ напівпровідника в порівнянні з рівноважним значенням. В обох випадках для зразка, розташованого в центрі магнітного квадрупольа, залежність ТВ від електричного поля практично лінійна. Доведено, що величина модуляції ТВ визначається компонентою градієнта магнітної індукції, перпендикулярної до граней зразка з великою швидкістю поверхневої рекомбінації. Показано, що МГЕ являється більш вигідним для збурення модуляції ТВ, ніж МКЕ, за рахунок переносу області максимального перерозподілу носіїв заряду від поверхні в об'єм напівпровідника.

8. Запропоновано високо ефективний багатофункціональний ІЧ-випромінювач на основі епітаксіальної структури, який дозволяє застосувати інтегральну технологію виготовлення випромінювачів.

Робочий діапазон довжини хвилі 4-8 мкм, густина випромінювання  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>, інерційність  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с.

9. Розроблено планарні випромінюючі напівпровідникові структури на основі Ge, які характеризуються високою технологічністю і великою однорідністю випромінювання по площі випромінюючої поверхні. Принцип роботи базується на явищах контактної ексклюзії та інжекції. Робочий діапазон довжини хвилі 5-20 мкм, густина випромінювання  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>, інерційність  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с, робочий діапазон температур 300 - 360 К.

10. Запропоновано безконтактний спосіб визначення компонент градієнта магнітної індукції за вимірами ТВ напівпровідника.

Список публикация.

1. Болгов С.С., Малютенко В.К., Пипа В.И., Салюк О.Ю., Яблоновский Е.И. Модуляция теплового излучения полупроводников в условиях неоднородного температурного поля фона // ЖПС. - 1990. - Т.52, N2. - С. 276 - 279.
2. Акопян А.А., Болгов С.С., Савченко А.П., Салюк О.Ю. Магнито-концентрационный эффект в неоднородно легированных полупроводниках // ФТП. - 1990. - Т.24, Вып. 10. - С. 1875 - 1878.
3. Болгов С.С., Медвидь А.П., Салюк О.Ю. Тепловое излучение германия в условиях магнитоградиентного эффекта // Литовский физ. сборник. - 1991. - Т.31, N4. - С. 350 - 354.
4. Савченко А.П., Салюк О.Ю. Т-ОДП в узкозонных полупроводниках при высоких температурах // Физика полупроводников, современные исследования. Сборник статей, г. Киев. - 1991. - С. 20 - 23.
5. Болгов С.С., Пипа В.И., Салюк О.Ю., Арутюнов А.С. К вопросу о модуляции теплового излучения полупроводников // УФЖ. - 1993. - Т.38, N1. - С. 20 - 22.
6. Болгов С.С., Пипа В.И., Салюк О.Ю. Гальваномагнитная люминесценция легированных полупроводников // УФЖ. - 1993. - Т.38, N9. - С. 1327 - 1333.
7. А.С. 1568689, МКИ 4 G01M 11/00. Устройство для определения разрешающей способности оптико-электронных приборов ИК-области спектра / Малютенко В.К., Болгов С.С., Пипа В.И., Салюк О.Ю.
8. Положительное решение по заявке Т 4830037/25, МКИ 4 H05 B 33/12, НОП 33/00 Инфракрасный полупроводниковый излучатель / Болгов С.С., Яблоновский Е.И., Салюк О.Ю., Игуменов В.Н., Константинов В.Т., Морозов В.А.

Подписано в печать 30.07.93г Формат 60x84/16  
Бумага писчая. Усл.печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №1604  
Отпечатано ЦУОП ГНПП "Плодвиконсерв" г.Киев,Саксаганского, 1

AB 27.984