

Національна академія наук України
Інститут фізики напівпровідників

На правах рукопису
УДК 621.315.592

МОРОЖЕНКО ВАСИЛЬ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ В НАПІВПРОВІДНИКАХ.

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1994

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00755646 (X)

Національна академія наук України
Інститут фізики напівпровідників

На правах рукопису
УДК 621.315.592

МОРОЖЕНКО ВАСИЛЬ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ В НАПІВПРОВІДНИКАХ.

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1994

Дисертація є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
КОЛЛЮХ Олексія Галактионович.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
МАЛЮТЕНКО Володимир Костянтинович.

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук, професор
ВЛАДИМИРОВ Вадим Володимирович,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
ФЕДОРЕНКО Леонід Леонідович.

Провідна організація - Державний Університет, МВО, м.Київ

Захист відбудеться "16" грудня 1994 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 ознайомитись в бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України (252650, Київ-28, пр.Науки 45).

Автореферат розіслания 1994 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Ради Беляєв О.Є.

Загальні характеристики роботи.

Актуальність теми.

Дослідження вільних носіїв заряду в напівпровідниках є одною з найважливіших задач фізики твердого тіла. Визначаючи особливості усіх кінетичних явищ переносу, поведінка вільних носіїв обумовлює те визначне місце, що посідають напівпровідники у всіх галузях сучасної техніки.

Вільні носії заряду активно взаємодіють з електромагнітним випромінюванням, поглинаючи та випромінюючи кванти світла. При цьому випромінювання несе інформацію про параметри електронної системи, механізми взаємодії електронів з кристалічною решіткою, зовнішніми полями та інш. Дослідження внутрішньозонного випромінювання дає можливість добувати інформацію, яку в ряді випадків не вдається отримати ніякими іншими методами.

Крім цього, актуальність дослідження випромінювальних властивостей напівпровідників зобумовлена ще й широким застосуванням напівпровідників у оптоелектроніці та інфрачервоної (ІЧ) техніці.

Енергія внутрішньозонних переходів визначає спектральний склад випромінювання - від ближнього до субміліметрового ІЧ. В останній час ІЧ область є досить актуальною для створення засобів зв'язку, зняття та обробки інформації, впливу на біологічні об'єкти, тощо.

Широкомасштабні дослідження квазірівноважного теплового випромінювання (ТВ) вільних носіїв заряду були проведені тільки в останні роки. Вони зразу ж дозволили виявити низку закономірностей та особливостей випромінювання напівпровідників за краєм власного поглинання та створити нові неохолоджувальні

джерела випромінювання на ближній та середній ІЧ-діапазон, а також запропонувати ряд нових неруйнівних способів визначення та контролю параметрів напівпровідникових матеріалів: часу життя, концентрації домішок, профілю легування тощо.

Дослідження нерівноважного випромінювання гарячих носіїв в середній ІЧ-області в сильних електричних полях дозволило встановити механізми взаємодії електронів в "активній" області енергія з квантами світла та решіткою напівпровідника. Крім того, в умовах суттєво нерівноважної функції розподілу, в р-Ge вдалось створити інверсію заселення підзон легких та важких дірок та розробити напівпровідниковий лазер на субміліметрову область спектру.

Однак, залишається ряд питань, що потребують дослідження та вирішення.

Зовсім недослідженими є поляризаційні характеристики теплового випромінювання ізотропних напівпровідників та можливість впливу на них зовнішніх чинників.

Відкритим залишається питання можливості модуляції теплового випромінювання шляхом зміни відбивання.

Вкрай недостатньо досліджені характеристики та особливості внутрішньозонної люмінесценції гарячих електронів в "пасивній" області енергія.

Мета роботи.

Враховуючи сказане вище, метою роботи є:

- дослідження особливостей внутрішньозонного теплового випромінювання вільних носіїв заряду в ізотропних напівпровідниках, впливу на них зовнішніх чинників, розширення класу ефектів, що призводять до модуляції випромінювальної

здатності напівпровідників за краєм власного поглинання в умовах рівноважного розподілу носіїв заряду по енергіям;

- дослідження особливостей субміліметрового внутрішньозонного випромінювання вільних електронів в "пасивній" області енергія в умовах суттєво нерівноважної функції розподілу, що формується в сильних електричних полях.

- розробка методик визначення параметрів напівпровідників по вимірам їх випромінювання за краєм власного поглинання.

Наукова новизна.

При виконанні роботи вперше були отримані наступні результати:

- виявлено вплив зовнішнього магнітного поля на поляризаційні характеристики теплового випромінювання ізотропних напівпровідників за краєм власного поглинання;

- показана можливість концентраційної модуляції поляризаційних характеристик теплового випромінювання за краєм власного поглинання, в тому числі і непрозорих напівпровідників;

- показана можливість застосування методу матриці Мюллера для розрахунку власного випромінювання напівпровідників, в тому числі і при впливі ззовні;

- досліджена температурна залежність субміліметрового випромінювання гарячих електронів в $n\text{-InSb}$ та $n\text{-CdHgTe}$ в умовах суттєво нерівноважної функції розподілу, встановлен механізм внутрішньозонних випромінювальних переходів електронів в "пасивній" області енергія;

- виявлена анізотропія та поляризація субміліметрової внутрішньозонної люмінесценції гарячих електронів в $n\text{-InSb}$ в умовах стрімінгу.

Практична цінність.

На основі дослідження теплового випромінювання напівпровідників за краєм власного поглинання, в тому числі і в поляризованих променях запропоновані:

- нові методи внутрішньої модуляції інтенсивності та перебудови спектру напівпровідникових ІЧ-випромінювачей;
- спосіб контролю однорідності розподілу домішок та складових компонентів в напівпровідниках та складних напівпровідникових з'єднаннях;
- спосіб визначення параметрів напівпровідників по реєстрації ступеня поляризації ТВ в магнітному полі.

Наукові положення, що виносяться на захист.

1. Теплове випромінювання ізотропних напівпровідників при кутах спостереження, відмінних від нормалі, поляризоване. Ступінь поляризації залежить від оптичної товщини зразка і спадає при її зменшенні.
2. Для оптично тонких напівпровідників ступінь поляризації ТВ вільних носіїв залежить від зовнішнього магнітного поля. В геометрії Фарадея для монохроматичного випромінювання ця залежність носить осцилюючий характер.
3. При високих концентраціях вільних носіїв в області плазмового резонансу відбувається деформація спектру поляризованого теплового внутрішньозонного випромінювання, кількісний та якісний характер якої залежать від концентрації вільних електронів, поляризації та кута спостереження.
4. Випромінювальні переходи гарячих електронів в "пасивній" області енергії в n-InSb відбуваються з домінуючою участю акустичних фононів.

5. В сильних електричних полях, коли функція розподілу електронів суттєво нерівноважна, субміліметрове випромінювання електронів анізотропно відносно напрямку тягнучого електричного поля.

6. Внутрішньозонне субміліметрове випромінювання гарячих електронів в n -InSb в умовах стрімінгу поляризоване в площині, паралельній тягнучому електричному полю.

Публікації.

Матеріали дисертації опубліковані у 12 друкованих працях. Серед них 2 авторських свідотства. Список приведений в кінці автореферату.

Структура дисертації.

Дисертація складається із вступу, огляду літератури, чотирьох (2-5) оригінальних розділів, висновків та списку цитованої літератури. Загальний обсяг дисертації складає 128 сторінок, з них 95 сторінок тексту, 33 малюнка, бібліографія включає 98 найменувань.

Короткий зміст роботи.

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

В першому розділі приведено огляд літератури з питань дослідження теплового випромінювання та внутрішньозонної люмінесценції вільних носіїв в напівпровідниках. Вказано, що необхідною умовою експериментального спостереження теплового випромінювання є різниця температур зразка та фону. Розглянуто широке коло концентраційних ефектів, що дозволяють здійснювати амплітудну модуляцію ТВ шляхом концентраційної зміни поглинання. Відзначено, що не дослідженим є другий шлях модуляції ТВ за

рахунок зміни показника заломлення.

Приведено ряд робіт, де вказується на те, що ТВ під похилими кутами спостереження є поляризованим в площині падіння. Але поляризаційні характеристики теплового випромінювання напівпровідників та вплив на них зовнішніх чинників зовсім не досліджені.

Широко представлені роботи по дослідженню функції розподілу та випромінюванню вільних носіїв в сильних електричних полях. Відзначено, що внутрішньозонна люмінесценція гарячих електронів в сильних електричних полях докладно досліджена в "активній" області енергія (середній ІЧ-діапазон випромінювання). Випромінюванню електронів в "пасивній" області енергія увага практично не приділялась.

Другий розділ є методичним. В цьому розділі описані технологія виготовлення зразків, методи оптичних вимірів амплітудних, поляризаційних та спектральних характеристик теплового випромінювання вільних носіїв заряду.

Детально викладені методи вимірювання вольт-амперних характеристик та внутрішньозонної люмінесценції напівпровідників в сильних електричних полях при низьких ($15+100\text{K}$) температурах.

В третьому розділі приведені результати досліджень поляризаційних характеристик теплового випромінювання ізотропних напівпровідників за краєм власного поглинання.

На початку проаналізовані вирази для випромінювальної здатності напівпровідників при похилих кутах спостереження. Зроблено висновок, що при кутах спостереження, відмінних від нормалі ступінь поляризації (D) ТВ ізотропних напівпровідників залежить не тільки від кута спостереження, що зумовлене

відмінністю коефіцієнтів відбиття для різних поляризація, але й від оптичних параметрів зразка (поглинання, заломлення, відбивання). Підкреслено, що це дає змогу змінювати поляризаційні характеристики ТВ шляхом впливу на напівпровідник зовнішніх чинників.

Експериментально досліджена залежність ступеня поляризації ТВ від поглинання при похилих кутах спостереження. Зміна оптичної товщини здійснювалась як зменшенням товщини зразка (зразок $n\text{-InSb}$, $n=10^{14}\text{ см}^{-3}$), так і шляхом інжекції в германієвому діоді з довгою n -базою. В обох випадках при збільшенні оптичної товщини ступінь поляризації ТВ збільшувалась і досягала насичення при повному затемненні зразка.

Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на поляризаційні характеристики ТВ. Експерименти проводилися на зразках $n\text{-InSb}$ з концентрацією електронів $N_d - N_a = 1.4 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$.

Зразок, розміщувався в електромагніті таким чином, щоб напрям магнітного поля співпадав з напрямом променів ТВ, що розповсюджуються в об'ємі під кутом Брюстера - тобто 14° до нормалі. ТВ спостерігалось під кутом 76° в спектральному діапазоні $7\text{--}11\text{ мкм}$ та $16 \pm 0.3\text{ мкм}$.

Було виявлено, що ступінь поляризації ТВ залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (В). Для монохроматичного випромінювання ця залежність мала осцилюючий характер.

Дано пояснення виявленому ефекту. За рахунок різниці коефіцієнтів відбиття для випромінювання, поляризованого в площині падіння (p -поляризація) та перпендикулярно їй (s -поляризація) при похилому падінні, ТВ в об'ємі напівпровідника

s-поляризоване. Взаємодія поляризованого ТВ з вільними електронами в магнітному полі призводить до повороту площини поляризації (ефект Фарадея). Це порушує початкові умови відбиття-заломлення на поверхні зразка, що приводить до зміни величини ступеня поляризації спостережуваного ТВ. При величині фарадеевського кута, кратного π , ступінь поляризації набуває початкового (безпольового) значення. Тому залежність $D(B)$ монохроматичного ТВ має осцилюючий характер.

Для інтегрального ТВ залежність $D(B)$ була немонотонна з відсутністю осциляцій. Цей факт пояснюється спектральною залежністю не тільки фарадеевського кута, але й самого ТВ та коефіцієнта поглинання. В результаті цього різні довжини хвиль вносять різний (навіть протилежний) внесок в $D(B)$ і осциляції $D(B)$ не спостерігаються.

Для розрахунків ступеня поляризації ТВ в магнітному полі був застосований метод матриць Мюллера. Отримана аналітична формула для залежності ступеня поляризації ТВ від магнітного поля. Розрахунки $D(B)$ добре співпадають з результатами експериментів.

Аналіз експериментальних даних та порівняння їх з теоретичними розрахунками дає можливість встановити параметри досліджуваного матеріалу, наприклад, значення ефективної маси електронів.

Експериментально та теоретично було розглянуте питання про можливість модуляції ТВ за рахунок концентраційної зміни показника заломлення. Для цього були досліджені поляризовані спектри ТВ сильнолегованого n-GaAs ($N_d - N_a = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в спектральній області, поблизу плазмового мінімуму відбиття ($5 + 15 \text{ мкм}$) при різних кутах спостереження. Встановлено, що

дисперсія показника заломлення по різному впливає на форму спектра р- та s- поляризованного ТВ.

При похилих кутах спостереження спектр р-поляризованного ТВ стає більш крутішим та зміщує максимум в короткохвильову область. Зміни s-поляризованого спектру ТВ протилежні.

Відмічено, що цей ефект може бути застосований для динамічної модуляції інтенсивності та перебудови спектру напівпровідникових джерел випромінювання.

В четвертому розділі приведені експериментальні та теоретичні результати дослідження субміліметрової (80+110мкм) внутрішньозонної люмінесценції (СВЛ) гарячих електронів в n-InSb та n-Cd_xHg_{1-x}Te, викликані електронними переходами в "пасивній" області енергії.

Показані експериментальні залежності інтенсивності СВЛ від величини електричного поля (0+120 В/см) та температури кристалічної решітки (15+80К) при спостереженні як в поперечному відносно електричного поля напрямку, так і в поздовжньому.

Виявлено, що із збільшенням температури кристалічної решітки інтенсивність СВЛ n-InSb збільшується спочатку по закону, близькому до лінійного, а потім по сублінійному закону з тенденцією до насичення.

Виявлено, що інтенсивність СВЛ є анізотропна відносно зовнішнього електричного поля - інтенсивність поздовжньої полю СВЛ менша за інтенсивність поперечної. При збільшенні температури кристалічної решітки ступінь анізотропії зменшується.

Для визначення механізму випромінювального переходу гарячих електронів в "пасивній" області енергії був проведений теоретичний аналіз інтенсивності СВЛ в залежності від механізмів

розсіяння з застосуванням методу Монте-Карло.

Зроблено висновок, що, на відміну від "активної" області енергія, електронні переходи в "пасивній" області відбуваються з домінуючою участю акустичних фононів.

Теоретично проаналізована, також, анізотропія СВЛ. Встановлено, що вона виникає в умовах стримінгу внаслідок виникнення поляризації СВЛ вздовж електричного поля.

Підкреслено, що експериментальні і теоретичні результати мають достатньо добре співпадання.

У п'ятому розділі розглянуті можливості практичного застосування результатів роботи. Описаний спосіб тепловізійного контролю концентрації домішок та складових частин напівпровідникового матеріалу. Підкреслюється, що крім високої точності цей спосіб має високу експресність та простоту реалізації, що дозволяє його використання на всіх стадіях виготовлення напівпровідникових пристроїв.

Висновки та основні результати

Вперше проведені дослідження поляризаційних характеристик теплового випромінювання вільних носіїв в ізотропних напівпровідниках.

Встановлено, що ступінь поляризації ТВ залежить не тільки від кута спостереження, але й оптичних параметрів напівпровідника, в результаті чого існують способи зміни поляризаційних характеристик ТВ шляхом впливу зовнішніх чинників.

Встановлено, що збільшення поглинання напівпровідника призводить до збільшення ступеня поляризації ТВ. Максимального значення ступінь поляризації досягає в непрозорому

напівпровіднику і залежить вже тільки від кута спостереження та коефіцієнта заломлення.

Встановлено, що при високих рівнях концентрації вільних носіїв області плазмового резонансу можлива модуляція поляризованого ТВ навіть в непрозорих напівпровідниках, зумовлена концентраційною залежністю коефіцієнта відбиття. При похилих кутах спостереження спектри р- та s- поляризованого ТВ в цих умовах суттєво відмінні не тільки кількісно, але й якісно. Форма спектрів ТВ залежить як від концентрації вільних носіїв, так і від кута спостереження.

Вперше виявлений вплив зовнішнього магнітного поля на поляризаційні характеристики ТВ вільних електронів в ізотропних напівпровідниках. В області прозорості можлива модуляція ТВ шляхом наведеної анізотропії показника заломлення зовнішнім магнітним полем. Величина та характер ефекту залежать від ступеня монохроматичності ТВ та оптичних параметрів зразка. В геометрії Фарадея для монохроматичного ТВ залежність ступеня поляризації ТВ від магнітного поля носить осцилюючий характер.

Вперше показано можливість застосування методу матриць Мюллера для розрахунків випромінювальної здатності напівпровідників.

Досліджена субміліметрова внутрішньозонна люмінесценція гарячих електронів в "пасивній" області енергії в широкому діапазоні температур решітки.

Встановлено, що внутрішньозонні випромінювальні переходи гарячих електронів в n-InSb в "пасивній" області енергії відбуваються, на відміну від "активної" області, при домінуючій участі акустичних фононів. Температурний хід інтенсивності СВЛ

обумовлюється електрон-фононною взаємодією, що формує функцію розподілу електронів та визначає інтенсивність випромінювальних переходів.

Виявлено, що СВЛ є анізотропною відносно напрямку зовнішнього електричного поля та поляризованою. Це пояснюється анізотропією функції розподілу вільних носіїв у імпульсному просторі (стрімінгом).

Грунтуючись на проведених дослідженнях був запропонований тепловізійний спосіб контролю однорідності розподілу домішок в напівпровідниках та складових в напівпровідникових з'єднаннях, а також розроблені фізичні засади для методу контролю параметрів напівпровідників по ступеню поляризації їх ТВ в магнітному полі та нового способу внутрішньої модуляції та перебудови спектру напівпровідникових ІЧ-випромінювачей;

Список публикация

1. Коллюх А.Г., Малютенко В.К., Мороженко В.А. Излучение n -InSb в далекой ИК-области// ФТП. - 1990. - Т.24, в.5. - С.931-933.
2. Коллюх А.Г., Мороженко В.А. Влияние магнитного поля на поляризацию теплового излучения изотропных полупроводников// ФТП. - 1992. - Т.26, в.12. - С.2107-2111.
3. Maluyutenko V.K., Morozhenko V.A., Chernyakhovsky V.I. Influence of plasma oscillations on thermal emission spectrum of doped semiconductors// Infrared Phys. - 1992. - V.33, No.6, -P.583-587.
4. Малютенко В.К., Булашенко О.М., Коллюх А.Г., Мороженко В.А. Длинноволновое ИК-излучение в n -InSb в сильных электрических полях// ФТП. - 1994. - Т.28, в.10.

5. Bulashenko O.M., Kollyukh A.G., Morzhenko V.A. Anisotropic and polarized intraband light emission of hot electron // Infrared Phys. - 1994. - V.35.

6. Kollyukh A.G., Morozhenko V.A. Effect of the magnetic field on the polarization of thermal emission from an isotropic semiconductors// The Proc. of Int. Conf. "Millimeter-Wave and Far-Infrared Technology" (ICMFFT'92). - Beijing 1992. - P.282-285.

7. Bulashenko O.M., Kollyukh A.G., Malyutenko V.K., Morozhenko V.A. Anisotropy and polarization of hot electron intraband luminescence// 7th Intern. Conf. on Narrow Gap Semiconductors. - Southampton, UK, 1992. - P.143.

8. Morozhenko V.A., Kollyukh A.G. The magnetopolarization effect of thermal emission from an isotropic semiconductors// Proc. of Int. Conf. "Physique en Herbe", Marseille, France, July 6-10 - 1992 - P.270.

9. Малютенко В.К., Булашенко О.М., Коллюх А.Г., Мороженко В.А. Излучение горячих электронов в $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в далекой ИК-области// Труды 1^й респ.конф. "Физика и химия поверхности и границ раздела узкозонных полупроводников". Алушта, 1990. - С.184.

10. Morozhenko V.A., Kollyukh A.G. Free electrons intraband emission investigations in A^3B^5 semiconductors and $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Proc.Int.Conf. "Trends in Physics". Italy, Firenze 1993. - P.54.

11. А.С. 1376846, МКИ 4 Н01L 21/66. Способ контроля однородности полупроводников/ Малютенко В.К., Болгов С.С., Мороженко В.А., и др.

12. А.С. 1349608, МКИ 4 Н01L 21/66. Способ определения местоположения р-п-переходов в полупроводниках/ Малютенко В.К., Мороженко В.А.

ЛНБ ім. В. Стефанива
АН України

452225

AB 33.807

AB 33.807