

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Грищенко Сергія Володимировича

«Спектральні властивості фотодетекторів на багатошарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN матеріалів із вбудованим мікрорезонатором»,

яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика та лазерна фізика.

1. Актуальність та практичне значення роботи.

Розвиток галузі оптичних комунікацій потребує впровадження нових оптоелектронних приладів, які мають малі енерговитрати, високу ефективність та можуть бути інтегровані у сучасні системи зв'язку. Багато уваги приділяється дослідженням нових типів детекторів, зокрема, резонансним фотодетекторам у телекомунікаційному діапазоні довжини хвиль. У цьому діапазоні широко використовуються напівпровідникові квантово-розмірні гетероструктури на основі InGaAs. Резонансні фотодетектори значно посилюють оптичне поле на резонансній частоті що приводить до підвищення їх ефективності і також забезпечують спектральну вибірковість за рахунок оптичного резонатора. При цьому швидкісні характеристики резонансних фотодетекторів залишаються високими завдяки малому розміру активної області. Однак робочі характеристики таких приладів досі не задовольняють вимогам телекомунікаційних стандартів. Сучасні теоретичні дослідження спрямовані на створення об'єднаної теоретичної моделі, яка б могла передбачувати характеристики вже існуючих резонансних фотодетекторів та допомагати проектуванню нових оптоелектронних приладів з високою квантовою ефективністю.

Активні прилади, що генерують та підсилюють електромагнітні хвилі довжиною кілька сотень нанометрів, знаходять своє застосування у пристроях, що використовуються як в науці, так і в повсякденному житті. У цьому діапазоні широко використовуються напівпровідникові гетероструктури на основі арсенідів. Значний інтерес у експериментаторів та розробників напівпровідникових оптоелектронних пристроїв в останнє десятиліття отримали структури, що містять нітриди галію InGaN та GaN. Інтерес до таких матеріалів пов'язаний з тим, що вони завдяки сильній внутрішній поляризації квантово-каскадної структури дозволяють запобігти необхідності використання зовнішньої напруги і, таким чином, значно спростити процес виготовлення. Однак оптичні характеристики резонансних фотодетекторів на основі як напівпровідникових нітридів, так і більш

відомих арсенідів галію значно залежать від умов їх вирощування, фізичних процесів у багат шаровій структурі детектора. Тому актуальними для дослідження є фізичні процеси, пов'язані з впливом температурних ефектів, динамічних характеристик носіїв заряду та процесів поглинання випромінювання на квантову ефективність таких детекторів. Задача, яка поставлена та вирішена автором роботи, щодо встановлення фізичних закономірностей процесу детектування випромінювання у багат шарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN квантоворозмірних активних шарів, теоретичного опису їх оптичних характеристик та динамічних характеристик носіїв заряду безумовно є актуальною для розуміння фундаментальних процесів та практичного створення якісних приймачів електромагнітних хвиль інфрачервоного діапазону.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.

У дисертації проведено теоретичний опис та дослідження квантової ефективності напівпровідникового резонансного фотодетектора. Були одержані залежності квантової ефективності від коефіцієнта відбивання верхнього дзеркала резонатора при різних параметрах багат шарової структури. Метою дисертаційної роботи є рішення наукової задачі, яка полягає у встановленні фізичних закономірностей процесу детектування випромінювання у багат шарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN квантово-розмірних активних шарів, теоретичного опису їх оптичних характеристик та динамічних характеристик носіїв заряду і встановлення сутності їх впливу на спектральні властивості.

Встановлена залежність спектрів відбивання і квантової ефективності резонансних фотодетекторів (РФД) від температури підкладки. Математично описані дипольні матричні елементи переходів і спектр поглинання квантово-каскадних фотодетекторів. Показано, що на поглинання випромінювання в квантово-каскадних фотодетекторах на внутрішньозонних переходах істотно впливає ефект заповнення підзон. Запропоновано спосіб зменшення впливу цього ефекту за рахунок використання оптичного резонатора з високою добротністю. З використанням математичного моделювання поглинання в квантово-каскадному РФД на основі нітрідних з'єднань отримано зниження впливу ефекту на 80%.

Вважаю, що теоретичні та обчислювальні методи оптики та квантової електроніки, які використані автором та за допомогою яких у дисертації

сформульовані висновки та рекомендації, цілком коректні та обґрунтовані.

3. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати дисертації досить повно викладені в 6 статтях в фахових журналах, серед яких більшість відносяться до міжнародних журналів (Telecommunications and Radio Engineering, Opto-Electronics Review, Superlattices and Microstructures, NATO Science for Peace and Security) та 19 тезах доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, симпозиумах, семінарах.

4. Достовірність та новизна отриманих результатів.

Достовірність наведених в дисертації теоретичних результатів забезпечена тим, що автором проведено детальне вивчення багатьох теоретичних та експериментальних літературних джерел. Для теоретичних результатів автор використовує апробовані у багатьох теоретичних роботах методи аналізу.

Рішення розглянутих у дисертації задач дають можливість прогнозувати характеристики резонансних фотодетекторів та інших пристроїв на основі багатошарових гетероструктур з квантовими ямами, виготовлених з матеріалів InGaAs, InGaN та GaN.

В роботі отримано такі нові результати:

- 1) Показано, що залежність квантової ефективності від коефіцієнту відбиття вхідного дзеркала має екстремум та наведено аналіз залежності коефіцієнта відбиття від числа шарів дзеркала. Автором встановлено, що на величину квантової ефективності впливають два взаємозалежних чинники – товщина активної області та коефіцієнт поглинання. При сильному збільшенні коефіцієнта поглинання в активній області кількість проходів різко зменшується і достатньої інтерференції не спостерігатиметься. Як результат, спостерігається високий коефіцієнт відбиття від детектора і відповідно низька добротність резонатора.
- 2) Виявлено, що змінюючи число шарів вхідного дзеркала, можна досягти компенсації повної фази відбиття у певному діапазоні довжини хвилі. У цьому діапазоні довжини хвилі, перша похідна повної фази відбиття буде близька до нуля, що приводять до появи плато квантової ефективності.

При цьому, плато квантової ефективності не змінюється у тому діапазоні довжин хвиль, в якому резонанс внутрішнього електромагнітного поля між дзеркалами практично не залежить від довжини хвилі, якщо смуга високого поглинання матеріалу досить широка. Це дає можливість запобігти застосування систем перебудови частоти і спростити систему.

- 3) Встановлено, що зсув робочої частоти приводить до неузгодженості спектральних характеристик передавача і детектора та може призвести до сильного погіршення характеристик оптичного з'єднання. Також виявлено, що зміна показника заломлення під дією температури значно впливає на спектр квантової ефективності.
- 4) Показано, що завдяки сильній внутрішній поляризації квантово-каскадної структури на основі нітридних з'єднань зонна структура активного середовища має нахил. Це дає можливість запобігти необхідності використання зовнішньої напруги.
- 5) Виявлено ефект заповнювання зон при наближенні імовірності переходу електрона на вищий енергетичний рівень у квантовій ямі до імовірності переходу у найближчу квантову яму. Цей ефект приводить до зменшення поглинання, яке відбувається завдяки заповненню рівня енергії в наступній квантовій ямі, і таким чином блокує переміщення збуджених електронів через каскад.
- 6) Запропоновано спосіб зменшення впливу ефекту заповнення підзон за рахунок використання високоякісного резонатора. Він створює можливість отримати вузький спектральний діапазон випромінювання, яке потрапляє у активне середовище. Внаслідок цього зменшується число електронних переходів із базового енергетичного рівня поглинаючої ями до найближчої квантової ями.

5. Наукове та практичне значення результатів дисертації.

В дисертації були досліджені процеси поглинання, відбиття і проходження оптичного випромінювання, впливу зміни температури на показник заломлення напівпровідникових шарів та квантової ефективності резонансних фотодетекторів. Завдяки проведенню аналізу геометричних параметрів дзеркал резонатора встановлено екстремальний характер залежності квантової ефективності від коефіцієнтів відбиття дзеркал та отримано правило появи спектрального плато квантової ефективності. В роботі теоретично описані процеси, що приводять до зниження ефекту заповнення підзон у квантово-каскадних фотодетекторах. Показано, що

завдяки вузькій смузі проходження резонатора число електронних переходів до найближчої квантової ями може бути суттєво зменшене.

Одержані результати можуть бути використані для подальшого розвитку теоретичних та експериментальних досліджень процесів детектування випромінювання і прикладних задачах, пов'язаних із створенням фотонних і оптоелектронних приладів.

6. Зауваження до роботи

При ознайомленні з дисертаційною роботою С.В. Грищенка не виникло принципових зауважень, які б стосувалися її основних положень і висновків. Є зауваження, пов'язані з подачею низки результатів, неясністю деяких формулювань, оформленням роботи тощо.

1. Описані в роботі результати мають дуже важливий практичний характер, але порівняння теоретичних результатів з практичними відсутнє. Бажано навести приклади експериментальних даних, для яких можуть бути успішно застосовані запропоновані теоретичні підходи.
2. Не повністю зрозумілим є використання терміну «мікрорезонаторний дефект», адже дефектами скоріш є незаплановані недоліки реальної системи у порівнянні з ідеальною, в той час як у даному випадку автори пропонують контрольоване введення мікрорезонатору з заданим положенням з метою покращення характеристик гетеросистеми.
3. Відсутній аналіз впливу температури на спектральні характеристики квантово-каскадних детекторів, в той час як у попередньому розділі показано, що температура може значно впливати на РФД.
4. Розділи 1 і 2 здаються дещо переобтяженими і завеликими.
5. У роботі присутні технічні огріхи: в розділі 1.1 використовуються інтервали між абзацами, в той час як в інших розділах їх немає; с. 50 написано «слою в структурі на рис 2.6» – явно має бути на увазі рисунок 2.2, а малюнок 2.6. в дисертаційній роботі взагалі немає; с. 57 написано «близок к параболичной залежності» в той час як має бути «близок к параболической залежності»; с. 58 написано «уравнения Лиувилля фон-Неймана», в той час як має бути «уравнения Лиувилля фон-Неймана»; на рисунку 4.1 повинно бути «Дефектний» замість «Деффектний»; назва журналу має бути «Telecommunications and Radio Engineering» замість «Telecomunications and Radio Engeneering».


Вказані недоліки не є принциповими і не зменшують важливості отриманих результатів.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Результати наукових досліджень, які склали зміст дисертації Грищенко С.В., викладені у ній зрозуміло і чітко. Це свідчить про професіоналізм автора. Дисертація написана з використанням академічного стилю викладення матеріалу і якісно оформлена. Основні результати дисертації опубліковані у 6 статтях в фахових наукових журналах. Загальна кількість наукових публікацій, в яких викладені основні наукові та практичні результати дисертації, відповідає вимогам ДАК України. У авторефераті дисертації повністю відображено основний зміст дисертації, її актуальність і мету, новизну одержаних результатів, особистий внесок автора та висновки.

Вважаю, що дисертаційна робота Грищенко С.В. виконана на високому рівні. Вона є закінченим дослідженням, в якому розв'язана важлива і актуальна наукова задача оптики і лазерної фізики, яка полягає у встановленні фізичних закономірностей процесу детектування випромінювання у багатошарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN квантоворозмірних активних шарів, теоретичного опису їх оптичних характеристик та динамічних характеристик носіїв заряду і встановлення сутності їх впливу на спектральні властивості. Дисертаційна робота повністю відповідає всім вимогам, які ставляться «Порядком присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» до кандидатських дисертацій, а її автор Грищенко С.В. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Зав. лабораторії Інституту
сцинтиляційних матеріалів НАН України,
к.ф.-м.н., с.н.с.

 О.В. Сорокін

Підпис О.В. Сорокіна засвідчую.
Учений секретар Інституту
сцинтиляційних матеріалів НАН України,
к.т.н.



 Ю.М. Дацько