

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**БОЙКО
ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 538.958

**ТЕОРІЯ
АКТИВНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ СТРУКТУР**

01.04.02 – теоретична фізика

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Чернівці – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теоретичної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Ткач Микола Васильович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, завідувач кафедри
теоретичної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Григорчук Микола Іванович,
Інститут теоретичної фізики імені
М.М. Боголюбова НАН України, провідний
науковий співробітник відділу нелінійної фізики
конденсованого стану;

доктор фізико-математичних наук, професор
Лукіянець Богдан Антонович,
національний університет “Львівська
політехніка”, професор кафедри прикладної
фізики та наноматеріалознавства.

Захист відбудеться “ _ “ ____р. о __⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 76.051.01 при Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58012, м. Чернівці, вул. Університетська, 19, корпус №2, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (вул. Лесі Українки, 23).

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: вченому секретарю, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012.

Автореферат розісланий “ _____ ” _____ 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.В. Курганецький

Підписано до друку 27.02.2013. Формат 60х84/16.

Папір офсетний. Друк різкографічний. Умов.-друк. арк. 0,9.

Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. А-007.

Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету
58012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 891 від 08.04.2002

электронов с электромагнитным полем на основе решения уравнений Шредингера модифицированным методом Бете.

Показано, что, в соответствии с экспериментом, при увеличении напряженности магнитного поля лазерного излучения сдвигается в область больших энергий, а его относительная интегральная интенсивность резко уменьшается из-за того, что магнитное поле значительно увеличивает эффективный потенциал выходных ям и барьеров, и вызывает разрушение энергетической структуры согласованных между собой постоянным электрическим полем соседних каскадов квантового каскадного лазера.

Ключевые слова: электрон, квантовый каскадный лазер, квантовый каскадный детектор, квазистационарное состояние, активная динамическая проводимость, резонансно-туннельная структура.

SUMMARY

Boyko I.V. Theory of active dynamic conductivity of multi-layer resonance tunnel structures. – Manuscript.

Thesis on search of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on the speciality 01.04.02 – Theoretical Physics. – Chernivtsy National University named after Yuriy Fed'kovich, Chernivtsy, 2013.

The quantum theory of electrons quasi-stationary states and active dynamic conductivity of open multi-layer resonance tunnel structures is developed within the model of effective masses and rectangular potential barriers. The electron-electron interaction and interaction between the electron and constant electric and magnetic field as well as an electromagnetic one are taken into account in the theory.

Using the example of experimentally produced QCL and QCD it is shown that only the model of complete cascade, as open RTS, allows the reliable optimization of the operation of these devices by the geometrical design of their active bands and describes the happening physical properties.

The quantum theory of electronic transport through the RTS driven by the constant longitudinal electric and transversal magnetic field is developed taking into account the interaction of electrons with the electromagnetic field using the Bethe modified method.

It is shown that in accordance with the experiment, when the intensity of the magnetic field increases, the energy of laser radiation shifts into the region of higher energies and its relative integral intensity sharply decreases due to the magnetic field essentially increases the effective potential of output wells and barriers causing the destruction of energetic structure of coordinated neighbour cascades of QCL.

Key words: electron, quantum cascade laser, quantum cascade detector, quasi-stationary state, active dynamic conductivity, resonance tunnel structure.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Розвиток нанофізики за останні десятиліття привів не лише до нових фундаментальних знань академічного характеру, а й до створення нових нанотехнологій з унікальними прецизійними характеристиками таких наноприладів, як квантові каскадні лазери та детектори. У зв'язку з винятковими можливостями наноприладів у фізиці, хімії, техніці, біології, медицині та в інших науках, саме слово “нано” вийшло далеко за лексикон фізиків-професіоналів. Воно стало часто вживаним не лише науковцями різних галузей, але й політиками.

Одна з галузей нанотехнологій, що продовжує інтенсивно розвиватися, – це створення таких квантових каскадних лазерів (ККЛ) і квантових каскадних детекторів (ККД), які працюють в актуальному терагерцовому діапазоні частот електромагнітних хвиль. Оскільки ж елементною базою цих наноприладів є багатопарові відкриті резонансно-тунельні структури (РТС), то дослідження транспортних властивостей електронних потоків крізь ці структури є вкрай актуальним завданням. Адже лише достатньо розвинена теорія фізичних процесів, що відбуваються при проходженні заряджених квазічастинок крізь РТС з електричними, магнітними та електромагнітними полями, може бути надійною базою для свідомого вибору такого геометричного дизайну каскадів, який дозволить оптимізувати роботу ККЛ і ККД.

Отже, актуальність теми дисертації полягає в тому, що вона присвячена дослідженню властивостей квазістаціонарних станів і активної динамічної провідності електронів, яка виникає внаслідок їх взаємодії з високочастотним електромагнітним полем у відкритих РТС як моделях каскадів ККЛ і ККД. Розвинена теорія дозволяє оптимізувати геометричну конфігурацію активної зони каскадів і в такий спосіб поліпшувати робочі характеристики цих наноприладів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати досліджень, представлені у дисертації, виконані згідно з програмою наукової тематики кафедри теоретичної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича „Дослідження оптичних і термодинамічних властивостей напівпровідників та напівпровідникових низькорозмірних наносистем” (номер Держреєстрації 0111U001163) та в рамках держбюджетної теми „Теорія електромагнітного випромінювання квантових каскадних лазерів внаслідок переходів між квазістаціонарними станами електронів у резонансно-тунельних структурах” (номер Держреєстрації 0113U003246).

У межах цієї тематики в дисертації методами теоретичної фізики досліджено властивості стаціонарних і квазістаціонарних спектрів електронів

і активної динамічної провідності електронного потоку крізь плоскі РТС у зовнішніх полях.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є побудова послідовної теорії спектральних параметрів квазістаціонарних станів (КСС) електронів і зумовленої електромагнітним полем їх активної динамічної провідності плоскими багатопаровими відкритими РТС з урахуванням впливу міжелектронної взаємодії та зовнішніх постійних електричних і магнітних полів.

Застосувати розвинену теорію для оптимізації роботи ККЛ і ККД за рахунок доцільного геометричного дизайну активних зон цих наноприладів.

Завдання, що виконуються у дисертаційній роботі:

1. Побудувати теорію коефіцієнта прозорості і активної динамічної провідності відкритої двобар'єрної резонансно-тунельної структури (ДБРТС) відносно пучка електронів, які взаємодіють між собою та з електромагнітним полем у моделі прямокутних потенціалів і різних ефективних мас електрона у ямах і бар'єрах цієї наносистеми.

2. Побудувати теорію спектральних параметрів електронних КСС і динамічної провідності багатопарових РТС відносно моноенергетичного потоку електронів, які взаємодіють з електромагнітним полем. Дослідити властивості спектральних параметрів і динамічної провідності відкритої багатопарової РТС як моделі окремого каскаду ККД залежно від геометричного дизайну активної зони цього наноприладу з метою оптимізації його роботи.

3. Побудувати теорію КСС і електронної динамічної провідності відкритих багатопарових РТС у поздовжньому постійному електричному полі. Дослідити властивості відкритої РТС у електричному полі як моделі окремого каскаду ККЛ з метою оптимізації його роботи.

4. Побудувати теорію електронного транспорту крізь плоску відкрити багатопарову РТС як каскад ККЛ, що знаходиться в поздовжньому електричному та поперечному магнітному полях. Дослідити властивості активної динамічної провідності залежно від напруженості поперечного магнітного поля з метою пояснення експериментальних результатів.

Об'єктом дослідження є плоскі багатопарові напівпровідникові РТС з шарами-ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ та шарами-бар'єрами $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$.

Предметом дослідження є: спектральні параметри КСС електрона у відкритих плоских багатопарових РТС; стаціонарні енергетичні спектри обмежених та інтерфейсних фонових і електронів, а також сили осциляторів квантових переходів у закритих плоских РТС; активна динамічна провідність відкритих РТС у постійних електричному і магнітному полях.

Методи дослідження. Розрахунок резонансних енергій та ширин квазістаціонарних станів електрона у відкритих РТС здійснювався шляхом

АННОТАЦИЯ

Бойко И.В. Теория активной динамической проводимости многослойных резонансно-туннельных структур. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, 2013.

Диссертация посвящена исследованию туннельного транспорта электронов сквозь многослойные резонансно-туннельные структуры.

В модели эффективных масс и прямоугольных потенциальных барьеров развита теория коэффициента прозрачности, спектральных параметров квазистационарных состояний и активной динамической проводимости электронов двухбарьерной резонансно-туннельной структурой с учетом электрон-электронного взаимодействия.

Показано, что междueleктронное взаимодействие деформирует форму коэффициента прозрачности от лоренцевой к клиновидной, слабо изменяет величину динамической проводимости и независимо от ее знака смещает положение максимума в область больших энергий электромагнитного поля. Показано, что наличие детальной информации о зависимости величины σ от E и Ω , позволяет оценить важные спектральные параметры величин обобщенных резонансных энергий и ширин электронных квазистационарных состояний.

В модели разных эффективных масс в разных слоях гетеросистемы и прямоугольных потенциальных барьеров на основе решения стационарного уравнения Шредингера развита квантово-механическая теория квазистационарных состояний электронов, а в малосигнальном одномодовом приближении – на основе решения полного уравнений Шредингера активной динамической проводимости открытых многослойных резонансно-туннельных структур, как отдельных каскадов квантовых каскадных детекторов и лазеров.

На примере экспериментально реализованных квантовых каскадных лазеров и детекторов показано, что только модель полного каскада, как открытой многослойной резонансно-туннельной структуры, позволяет надежно оптимизировать работу этих наноприборов геометрическим дизайном их активных зон и описать физические процессы, происходящие в них.

Развита квантовая теория электронного транспорта сквозь открытую многослойную резонансно-туннельную структуру, как модель полного каскада квантового каскадного лазера в постоянных продольном электрическом и поперечном магнитном полях с учетом взаимодействия

18. Ткач М. В. Квантові каскадні детектори у слабких і сильних електромагнітних полях / М. В. Ткач, Ю. О. Сеті, В. О. Матіск, І. В. Бойко // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології: 5-та Міжнародна науково-технічна конференція, 4-8 червня 2012 р.: тези доповідей. – Одеса, 2012. – С. 121.
19. Tkach M. Conductivity of quantum cascade laser with four-barrier active band/ M. Tkach, Ju. Seti, O. Voitsekhivska and I. Boyko // The 4-th Conference on “Statistical Physics: Modern Trends and Applications”, July 3-6, 2012: abstracts – 2012, Lviv, Ukraine. – P. 203.

АНОТАЦІЯ

Бойко І.В. Теорія активної динамічної провідності багат шарових резонансно-тунельних структур. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2013.

У моделі ефективних мас і прямокутних потенціальних бар'єрів розвинена квантова теорія квазістаціонарних станів електронів і активної динамічної провідності відкритих багат шарових резонансно-тунельних структур. У теорії врахована міжелектронна взаємодія, а також взаємодія електронів з постійними електричним, магнітним і електромагнітним полями.

На прикладі експериментально реалізованих ККЛ і ККД показано, що лише модель повного каскаду, як відкритих РТС, дозволяє надійно оптимізувати роботу цих наноприладів геометричним дизайном їх активних зон і описати фізичні процеси, що в них відбуваються.

Розвинена квантова теорія електронного транспорту крізь РТС у постійних поздовжньому електричному і поперечному магнітному полях з урахуванням взаємодії електронів з електромагнітним полем на основі модифікованого методу Бете.

Показано, що згідно з експериментом, при збільшенні напруженості магнітного поля, енергія лазерного випромінювання зміщується в область більших енергій, а його відносна інтегральна інтенсивність різко зменшується через те, що магнітне поле значно збільшує ефективний потенціал вихідних ям і бар'єрів, чим викликає руйнування енергетичної структури узгоджених між собою сусідніх каскадів квантового каскадного лазера.

Ключові слова: електрон, квантовий каскадний лазер, квантовий каскадний детектор, квазістаціонарний стан, активна динамічна провідність, резонансно-тунельна структура.

розв'язування стаціонарного рівняння Шредінгера в наближенні ефективних мас та у моделі прямокутних потенціалів з подальшим використанням функції розподілу густини ймовірності чи коефіцієнта прозорості. Нелінійне рівняння Гросса-Пітаєвського розв'язувалося пертурбаційним методом, а також методом числової прогонки. Нестационарне рівняння Шредінгера для електрона, що взаємодіє зі слабким електромагнітним полем у плоских РТС без постійних зовнішніх полів і з постійним електричним полем, розв'язувалося із застосуванням часової теорії збурень у малосигнальному наближенні.

Спектральні параметри КСС електрона й електронна динамічна провідність РТС у постійних поздовжньому електричному та поперечному магнітному полях знаходилися шляхом розв'язування відповідних стаціонарного та повного рівнянь Шредінгера із застосуванням модифікованого методу Бете. Безпосередні розрахунки досліджуваних величин здійснювалися числовими методами за допомогою ЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Побудовано теорію спектральних параметрів (резонансних енергій (РЕ) та ширин (РШ)) КСС й активної динамічної провідності відкритої ДБРТС відносно пучка електронів, які взаємодіють між собою та з електромагнітним полем у моделі прямокутних потенціалів і різних ефективних мас у ямах і бар'єрах цієї наносистеми.

2. Показано, що навіть значна міжелектронна взаємодія слабо впливає на величину і знак динамічної провідності.

3. Розвинена теорія квазістаціонарних станів і активної динамічної провідності електронів відкритими багат шаровими РТС у моделях прямокутних потенціалів і різних ефективних мас у різних шарах каскадів і активних зон ККЛ і ККД з урахуванням взаємодії електронів з високочастотним електромагнітним полем. На прикладі експериментально реалізованих ККЛ і ККД у моделях відкритих РТС з три- та чотирибар'єрними активними зонами каскадів запропоновано такий їх геометричний дизайн, який дозволяє надійно оптимізувати роботу цих наноприладів.

4. Розвинена квантовомеханічна теорія транспорту електронних потоків крізь відкриту багат шарову РТС у постійних поздовжньому електричному та поперечному магнітному полях з урахуванням взаємодії електронів з електромагнітним полем. Модифікованим методом Бете розв'язано стаціонарне та повне рівняння Шредінгера. Це дало можливість дослідити залежність від напруженості магнітного поля спектральних параметрів електронних КСС і негативної активної динамічної провідності багат шарової РТС як у моделі активної зони, так і в моделі окремого каскаду ККЛ.

5. Досліджено відносну інтегральну інтенсивність лазерного випромінювання у залежності від величини напруженості магнітного поля. Показано, що згідно з експериментом зупинка роботи ККЛ, спричинена магнітним полем, пов'язана з руйнуванням узгодженості між робочими квазістаціонарними станами сусідніх каскадів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розвинена теорія спектральних параметрів КСС і активної динамічної провідності електронів відкритими багатошаровими РТС у зовнішніх постійних і високочастотних електромагнітних полях може бути застосована і для вивчення тунельних властивостей РТС з урахуванням взаємодії електронів з різними дисипативними підсистемами (фонони, домішки і т.п).
2. Розвинена теорія активної динамічної провідності електронів відкритими багатошаровими РТС дає можливість здійснювати такий геометричний дизайн активної зони окремого каскаду ККЛ і ККД, який забезпечує оптимальну роботу цих наноприладів.

Достовірність отриманих результатів, викладених у роботі, обґрунтована застосуванням надійних теоретичних методів розрахунку (рівняння Шредінгера) фізичних величин і добрим узгодженням теоретичних і експериментальних результатів.

Особистий внесок здобувача за списком праць за темою дисертації. У праці [1] дисертант виконав аналітичний та числовий розрахунок спектра оптичних фононів. У працях [2, 3] дисертант виконував аналітичні та самостійно здійснював числові розрахунки спектральних параметрів КСС, динамічної провідності електронів ДБРТС з урахуванням електрон-електронної взаємодії. У працях [4, 5] дисертант виконував числові розрахунки спектральних параметрів КСС та динамічної провідності електронів відкритими багатошаровими РТС з дво- та чотирибар'єрними активними зонами каскадів ККЛ та ККД. Виконав аналітичний та числовий розрахунок стаціонарного електронного спектра та сил осциляторів квантових переходів для закритих моделей цих РТС. У працях [6-8] брав участь у постановці задачі. Самостійно виконував більшу частину аналітичних розрахунків при розв'язуванні стаціонарного та повного рівнянь Шредінгера у квантовомеханічній теорії транспорту електронних потоків крізь відкриту багатошарову РТС у постійних поздовжньому електричному та поперечному магнітному полях з урахуванням взаємодії електронів з електромагнітним полем, а також виконав чисельні розрахунки залежностей спектральних характеристик КСС електронів, динамічної провідності та відносної інтегральної інтенсивності лазерного випромінювання залежно від величини прикладеного магнітного поля.

9. Ткач М. Низькорозмірні наносенсорні резонансно-тунельні структури / М. Ткач, Ю. Сеті, О. Войцехівська, І. Бойко // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології: 4-та Міжнародна науково-технічна конференція, 28 червня - 2 липня 2010 р.: тези доповідей – Одеса, 2010. – С. 129.
10. Сеті Ю. Квазістаціонарні стани електрона у три- та чотирибар'єрних плоских наносистемах / Ю. Сеті, І. Бойко, В. Матієк // Актуальні проблеми фізики напівпровідників: VII Міжнародна школа-конференція, 28 вересня - 1 жовтня 2010 р.: тези доповідей – Дрогобич, 2010. – С. 59.
11. Seti Ju. Permeability coefficient for two-barrier resonance tunnel structure due to the electron-electron interaction / Ju. Seti, I. Boyko, V. Matijek // Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems: VIII International Conference, May 16-21, 2011: conference materials – Ivano-Frankivsk, 2011. – V. 1, P. 283.
12. Seti Ju. Influence of non-linear electrons interaction at their transport through the symmetric two-barrier resonance nano-system / Ju. Seti, M. Tkach and I. Boyko // 12-th International Balkan Workshop on Applied Physics, July 6-8, 2011: abstracts – Constanta, Romania, 2011. – P. 94 - 95.
13. Сеті Ю.О. Провідність електронного потоку крізь двобар'єрну наноструктуру з урахуванням міжелектронної взаємодії / Ю. О. Сеті, І. В. Бойко, О. М. Войцехівська // V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, 9-15 жовтня 2011 р.: тези доповідей – Ужгород, 2011. – С. 283 – 284.
14. Сеті Ю.О. Спектральні параметри та провідність симетричної чотирибар'єрної резонансно-тунельної структури / Ю. О. Сеті, І. В. Бойко, О. М. Войцехівська // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: I-а Всеукраїнська науково-практична конференція, 13-15 жовтня 2011 р.: матеріали конференції – Чернівці, 2011. – С. 183 - 186.
15. Tkach M. Dynamic conductivity of resonance tunnel structures in the models of open cascades in nanolasers / M. Tkach, Ju. Seti, I. Boyko and O. Voitsekhivska // The 8-th General Conference of Balkan Physical Union, July 5-7, 2012: abstracts – 2012, Constanta, Romania. – P. 99 - 100.
16. Матієк В. Властивості динамічної провідності у двох моделях квантового каскадного лазера / В. Матієк, Ю. Сеті, І. Бойко // Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes and materials: Sixth International Workshop, May 25-29, 2012: proceedings – 2012, Lutsk-Shatsk Lakes, Ukraine. – P. 114 - 115.
17. Сеті Ю.О. Динамічна провідність чотирибар'єрної активної зони квантового каскадного лазера / Ю. О. Сеті, І. В. Бойко, В. О. Матієк // Структурна релаксація у твердих тілах: IV Міжнародна науково-практична конференція, 29-31 травня 2012 р.: матеріали конференції – Вінниця, 2012. – С. 102 - 104.

- 3*. Blaser S. Long-wavelength ($\lambda \sim 10,5 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers based on a photon-assisted tunneling transition in strong magnetic field. / S. Blaser, L. Diehl, M. Beck, J. Faist // *Physica E*. – 2000 – V. 7, № 1-2. – P. 33 - 36.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гришук А. М. Потенціал поля поляризації та оптичні фононні моди в багатошаровій квантовій наноплівці / А. М. Гришук, В. В. Гришук, І. В. Бойко // *Фіз. і хім. тверд. тіла*. – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 855 - 858.
2. Ткач М. В. Вплив нелінійної міжелектронної взаємодії на тунелювання електронів крізь несиметричну двобар'єрну резонансно-тунельну структуру / М. В. Ткач, Ю. О. Сеті, І. В. Бойко // *УФЖ*. – 2012. – Т. 57, № 8. – С. 852 – 862.
3. Seti Ju. O. Influence of non-linear electrons interaction at their transport through the symmetric two-barrier resonance nano-system / Ju. O. Seti, M. V. Tkach, I. V. Boyko // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* – 2012. – V. 14, № 3-4. – P.393 - 400.
4. Сеті Ю. О. Спектральні параметри і провідність симетричної чотирибар'єрної резонансно-тунельної структури / Ю. О. Сеті, І. В. Бойко, О. М. Войцехівська // *Наук. вісник Чернівецького університету: Збірник наукових праць. Фізика. Електроніка*. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 9 – 13.
5. Ткач Н. В. Активная проводимость трехбарьерной резонансно-туннельной структуры и оптимизация работы квантового каскадного лазера / Н. В. Ткач, Ю. А. Сети, В. А. Матиек, И. В. Бойко // *ФТП*. – 2012. – Т. 46, № 10. – С. 1327 - 1332.
6. Ткач М. Теорія активної провідності активної зони квантового каскадного лазера у поперечному магнітному полі / М. Ткач, І. Бойко, Ю. Сеті // *Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики: всеукраїнська наукова конференція, 20-22 вересня 2012 р.: матеріали конференції* – Тернопіль, 2012. – С. 119 - 121.
7. Бойко І. В. Відносна інтегральна інтенсивність випромінювання квантового каскадного лазера в поперечному магнітному полі / І. В. Бойко, М. В. Ткач, Ю. О. Сеті // *Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano- and microelectronics: II-th International Scientific-Practical Conference, October 25-27, 2012: proceedings* – 2012, Chernivtsi, Ukraine. – P. 160.
8. Зегря Г. Г. Влияние поперечного магнитного поля на излучение квантового каскадного лазера как резонансно-туннельной структуры / Г. Г. Зегря, Н. В. Ткач, И. В. Бойко, Ю. А. Сети // *Полупроводниковые лазеры: физика и технология: 3-ий Российский симпозиум, 13-16 ноября 2012 г.: тезисы докладов* – Санкт-Петербург, Россия. – 2012. – С. 40.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на семінарах кафедри теоретичної фізики Чернівецького національного університету імені Ю. Федьковича та були представлені й доповідалися на таких наукових конференціях:

4-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (Одеса, Україна, 28 червня - 2 липня 2010 р.); VII Міжнародна школа-конференція “Актуальні проблеми фізики напівпровідників” (Дрогобич, Україна, 28 вересня - 1 жовтня 2010 р.); XIII Міжнародна конференція “Фізика і технологія тонких плівок та наносистем” (Івано-Франківськ, Україна, 16-21 травня 2011 р.); 12-th International Balkan Workshop on Applied Physics (Constanta, Romania, July 6-8, 2011); V Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (Ужгород, Україна, 9-15 жовтня 2011 р.); I-а Всеукраїнська науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, Україна, 13-15 жовтня 2011 р.); The 8-th General Conference of Balkan Physical Union (Constanta, Romania, July 5-7, 2012). Sixth International Workshop “Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes; materials - growth and optical properties” – RNAOPM’2012 (Lutsk-Shatsk Lakes, Ukraine, May 25-29, 2012); IV Міжнародна науково-практична конференція “Структурна релаксація у твердих тілах” (Вінниця, Україна, 29-31 травня 2012 р.); 5-та Міжнародна науково-технічна конференція „Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-5) (Одеса, Україна, 4-8 червня 2012 р.); The 4-th Conference “Statistical Physics: Modern Trends and Applications” (Lviv, Ukraine, July 3-6, 2012); Всеукраїнська наукова конференція “Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики”(АПТЕПФ 2012) (Тернопіль, Україна, 20-22 вересня 2012 р.); II-th International Scientific-Practical Conference “Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano- and microelectronics” (Chernivtsi, Ukraine, October 25-27, 2012); 3-ий Российский симпозиум “Полупроводниковые лазеры: физика и технология ” (Санкт-Петербург, Россия, 13-16 ноября 2012 г.).

Публікації. У дисертації узагальнено наукові результати, опубліковані в 19 роботах, у тому числі 5 робіт у реферованих фахових виданнях [1-5], 14 – и тезах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій та симпозіумів [6-19].

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографічного списку використаних джерел, який нараховує 128 позицій. Загальний обсяг дисертації – 141 сторінка машинописного тексту, основного тексту – 136 сторінок, що містить 26 рисунків та 2 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами й темами досліджень, сформульовані мета і завдання дослідження, вказані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведені дані про апробацію роботи, публікації й особистий внесок дисертанта.

Перший розділ присвячений огляду експериментальних і теоретичних праць за темою дисертаційної роботи.

Розглянено теоретичні і експериментальні праці щодо дослідження тунельних властивостей відкритих РТС. Проаналізовано особливості тунелювання крізь РТС у δ -бар'єрній моделі, а також вплив на процес тунелювання міжелектронної взаємодії та постійного магнітного поля. Установлено необхідність теоретичного з'ясування впливу цих факторів на роботу квантових каскадних лазерів і детекторів.

У **другому розділі** у наближенні ефективних мас і прямокутних потенціальних бар'єрів досліджено коефіцієнт прозорості, спектральні параметри й активну динамічну провідність електронів двобар'єрною РТС з урахуванням електрон-електронної взаємодії.

Для знаходження хвильових функцій та спектральних параметрів КСС електрона у відкритій ДБРТС, розв'язується стаціонарне нелінійне рівняння Шредінгера

$$H(E, z)\Psi(E, z) = E \Psi(E, z), \quad (1)$$

де у гамільтоніані

$$H(E, z) = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{m(z)} \frac{\partial}{\partial z} + U(z) + v |\Psi(E, z)|^2 [\theta(z) - \theta(z - b)] \quad (2)$$

нелінійний доданок враховує електрон-електронну взаємодію, що вважається локальною, v – потенціал міжелектронної взаємодії, b – розмір РТС.

Рівняння (1) розв'язується пертурбативним методом, для чого спочатку шукається розв'язок рівняння Шредінгера без урахування електрон-електронної взаємодії, що дозволяє зобразити функцію $|\Psi_0(E, z)|^2$ у вигляді суми N кусково-неперервних функцій

$$|\Psi_0(E, z)|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{p=0}^N |\Psi_0(E, z_{2p})|^2 [\theta(z - z_{2p-1}) - \theta(z - z_{2p+1})]. \quad (3)$$

Після підстановки (2) у рівняння (1) воно вже лінеаризується, і його розв'язок у першому наближенні шукається у вигляді лінійної комбінації плоских хвиль. Знайдений розв'язок знову зображається у вигляді (3), підставляється у рівняння (1), й у такий спосіб знаходиться функція $\Psi(E, z)$ у довільному S -ому наближенні

3. Уперше побудована теорія спектральних параметрів КСС та активної динамічної провідності електронів плоскою відкритою багатошаровою РТС як окремим каскадом ККД з трибар'єрною активною зоною. Показано, що розвинена теорія дозволяє однозначно встановити такий геометричний дизайн активної зони каскаду, який згідно з експериментом оптимізує функціональні характеристики ККД.

4. Уперше розвинена теорія квазістаціонарних станів і активної динамічної провідності електронів відкритими багатошаровими РТС у постійному поздовжньому електричному полі та без нього з урахуванням взаємодії електронів з високочастотним електромагнітним полем. На прикладі експериментально реалізованого ККЛ з чотирибар'єрною активною зоною окремого каскаду показано, що лише модель повного відкритого каскаду дозволяє надійно оптимізувати геометричний дизайн активної зони.

5. Уперше розвинена квантова теорія електронного транспорту крізь відкрити багатошарову РТС у моделях активної зони та повного каскаду ККЛ у постійних поздовжньому електричному і поперечному магнітному полях з урахуванням взаємодії електронів з електромагнітним полем на основі модифікованого методу Бете. Досліджена залежність від напруженості магнітного поля РЕ та РШ електронних КСС, а також розрахована і проаналізована негативна активна динамічна провідність відкритої багатошарової РТС у моделях активної зони й окремого каскаду ККЛ.

6. Уперше показано, що відповідно до експерименту, збільшення напруженості магнітного поля збільшує частоту випромінювання ККЛ, різко зменшуючи його інтегральну інтенсивність. Установлено, що збільшення напруженості магнітного поля приводить до поступового руйнування узгодженості між робочими квазістаціонарними станами електрона в активній зоні ККЛ і до зменшення парціальної складової активної динамічної провідності в прямому потоці, що й викликає, згідно з експериментом, зупинку функціонування ККЛ при деякій величині напруженості магнітного поля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. Gmachl. G. Recent progress in quantum cascade lasers and applications/ G Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, A. Y. Cho // Rep. Prog. Phys. – 2001. – V. 64, № 11. – P. 1533 - 1601.
- 2*. Ning K. A 10.7 μm InGaAs/InAlAs Quantum Cascade Detector. / K. Ning, Q-U. Liu, L. Lu [et al.] // Chin. Phys. Lett. – 2010. – V. 27, № 12. – P 128503-1 - 128503-3.

поглинанням енергії електромагнітного поля Ω_{21} дуже малі, а величини $\sigma_{21}^{r\pm}$, що формуються у процесах з випромінюванням поля, - сильно залежать від напруженості магнітного поля.

Зі збільшенням напруженості магнітного поля $\mathcal{H}$ початкова значна величина негативної парціальної складової динамічної провідності в прямому напрямку $|\sigma^+(E_2, \Omega_{21}, \mathcal{H})|$ зменшується, а мала провідність $|\sigma^-(E_2, \Omega_{21}, \mathcal{H})|$ у зворотному напрямку - збільшується. Тому зі збільшенням $\mathcal{H}$ приблизно до 16 Тл повна величина провідності $\sigma(E_2, \Omega_{21}, \mathcal{H})$ формується прямим електронним потоком; в інтервалі 16 Тл – 19 Тл - парціальні складові провідності в різні боки РТС співмірні між собою, а при $\mathcal{H} \geq 19$ Тл переважає провідність, що формується потоком у зворотному до початкового напрямі. Отже, при досягненні напруженості магнітного поля порядку 16 Тл відбувається вирівнювання електронних потоків у обидві сторони активної зони кожного каскаду, внаслідок чого робота ККЛ припиняється.

Розрахована залежність частоти лазерного випромінювання від напруженості магнітного поля $\mathcal{H}$ у квантовому переході $2 \rightarrow 1$ і встановлено, що відповідно до експерименту [3*] зі збільшенням $\mathcal{H}$ у межах до 14 Тл, вона зростає. З рис. 4в видно, що відносна інтегральна інтенсивність випромінювання, розрахована за теорією (крива 1), на відміну від розрахованої в роботі [3*] (крива 2), задовільно узгоджується з експериментом (крива 3) у всьому експериментальному інтервалі (0-14 Тл) зміни напруженості магнітного поля.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Уперше побудовано теорію коефіцієнта прозорості, спектральних параметрів (РЕ, РШ) КСС і активної динамічної провідності відкритої ДБРТС відносно пучка електронів, які взаємодіють між собою та з електромагнітним полем у моделі прямокутних потенціалів і різних ефективних мас у ямах і бар'єрах цієї наносистеми. Показано, що збільшення міжелектронної взаємодії деформує форму коефіцієнта прозорості $D(E, \nu)$ від квазілоренцової до клиноподібної, зміщуючи його максимум в область більших електронних енергій. Для адекватної характеристики коефіцієнта прозорості нелоренцової форми уведено поняття узагальнених РЕ $E_n(\nu)$ РШ $\Gamma_n(\nu)$.

2. Установлено, що міжелектронна взаємодія слабо змінює величину активної динамічної провідності і незалежно від її знака зміщує положення максимуму в область більших енергій електромагнітного поля. При значній величині міжелектронної взаємодії, активна динамічна провідність σ , як функція електронної енергії, набуває клиноподібної форми, а як функція енергії електромагнітного поля вона, в основному, залишається квазілоренцовою.

$$\Psi(E, z) = \sum_{p=1}^N (A_p^{(S)}(E) e^{ik_p^{(S)} z} + B_p^{(S)}(E) e^{-ik_p^{(S)} z}) [\theta(z - z_{p-1}) - \theta(z - z_p)] + (A_0^{(S)}(E) e^{ik_0 z} + B_0^{(S)}(E) e^{-ik_0 z}) \theta(-z) + A_{N+1}^{(S)}(E) e^{ik_0 z} \theta(z - z_N), \quad (4)$$

де невідомі коефіцієнти $A_p^{(S)}$, $B_p^{(S)}$, $A_0^{(S)}$, $B_0^{(S)}$, $A_{N+1}^{(S)}$ знаходяться з умов неперервності хвильової функції (4) на всіх межах ДБРТС та з умови її нормування.

Теорія динамічної провідності ДБРТС розвивалася у наближенні слабкого сигналу шляхом розв'язування повного рівняння Шредінгера

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(E, z, t)}{\partial t} = [H(E, z) + H(z, t)] \Psi(E, z, t), \quad (5)$$

де гамільтоніан

$$H(z, t) = -2eC\{z[\theta(z) - \theta(z - b)] + b\theta(z - b)\} \cos \omega t \quad (6)$$

описує взаємодію електрона зі змінним у часі електромагнітним полем частоти ω й амплітудою електричної складової (C).

Розв'язок рівняння (5) шукається в одномодовому наближенні:

$$\Psi(E, z, t) = \Psi(E, z) e^{-i\omega_0 t} + \Psi_{+1}(E, z) e^{-i(\omega_0 + \omega)t} + \Psi_{-1}(E, z) e^{-i(\omega_0 - \omega)t}, \quad (\omega_0 = E/\hbar). \quad (7)$$

Підстановкою (6) у (5) отримується система рівнянь

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{m(z)} \frac{\partial}{\partial z} + U(z) + v |\Psi(E, z)|^2 [\theta(z) - \theta(z - b)] - \hbar(\omega_0 \pm \omega) \right) \Psi_{\pm 1}(E, z) = eC\{z[\theta(z) - \theta(z - b)] + b\theta(z - b)\} \Psi(E, z), \quad (8)$$

розв'язками якої є сума розв'язків однорідного та неоднорідного рівнянь (8), що знаходяться точно й повністю визначають часовозалежну функцію $\Psi(z, t)$. З використанням розв'язків системи рівнянь (8) розраховуються густини електронних потоків, пов'язаних з активною динамічною провідністю. Отримана величина активної динамічної провідності складається з двох складових:

$$\sigma(E, \omega) = \sigma^+(E, \omega) + \sigma^-(E, \omega), \quad (9)$$

які зумовлені електронними потоками, що виходять уперед ($\sigma^+(E, \omega)$) і назад ($\sigma^-(E, \omega)$) по відношенню до початкового напрямку потоку, який падає на ДБРТС.

На основі розвиненої теорії розраховано і досліджено властивості коефіцієнта прозорості, визначених з нього спектральних параметрів і активної динамічної провідності електронів на прикладі, часто експериментально досліджуваної плоскої ДБРТС з $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ - ямою і $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ - бар'єрами та фізичними параметрами, що задовольняють вимоги досліджуваної моделі.

Еволюцію коефіцієнта прозорості $D(E, \nu)$ видно з рис. 1. У всіх КСС він має форму деформованої кривої Лоренца з максимальним значенням $D(E_n, \nu)=1$ при всіх узагальнених резонансних енергіях $E_n(\nu)$ з півширинами $\Gamma_n(\nu)$ у всіх (n) КСС. Зі збільшенням енергії електрон-електронної взаємодії форма коефіцієнта $D(E, \nu)$ в околах перенормованих РЕ ($E_n(\nu)$) усіх КСС спочатку стає квазілоренцовою. З подальшим збільшенням ν функція $D(E, \nu)$ все більше деформується так, що її низькоенергетичне крило в околі максимуму повільно піднімається, набуваючи квазілінійної залежності від E , а високоенергетичне крило різко, майже прямолинійно, опускається. Отже, при досить великих значеннях ν (тим більших, чим більші номери КСС) форма $D(E, \nu)$, як видно з рис. 1, у околах, перенормованих взаємодією РЕ ($E_n(\nu)$), різко відрізняється від лоренцової і стає клиноподібною.

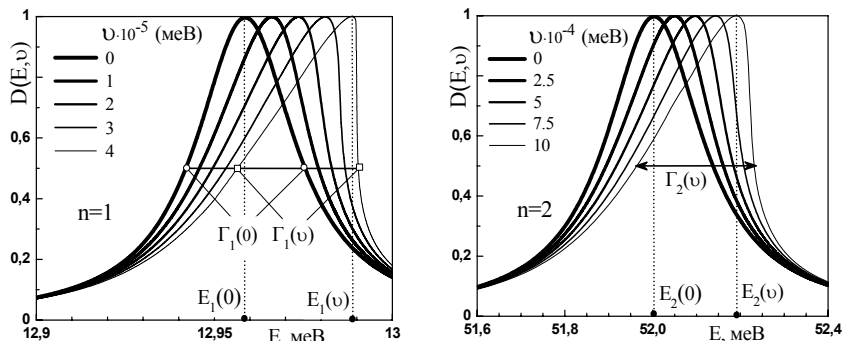


Рис. 1. Залежності коефіцієнта D від енергії E в околах двох перших КСС при різних величинах ν для ДБРТС з параметрами $\Delta=2,4$ нм, $b=21,6$ нм

Оскільки активна динамічна провідність σ ДБРТС через спектральні параметри залежить від геометричних параметрів РТС, то вона суттєво залежить і від енергії E падаючих на систему електронів, і від енергії $\Omega=\hbar\omega$ взаємодіючого з ними поля. Основні властивості σ як функції від E і Ω у квантових переходах з випромінюванням (а) чи поглинанням (б) енергії поля (Ω) видно з рис. 2.а, б.

Установлено, що незалежно від знака σ при фіксованій величині Ω , збільшення міжелектронної взаємодії (ν) деформує її залежність від E від лоренцової до клиноподібною так, що низькоенергетичне крило залежить від E лінійно, а високоенергетичне – круто спадає. При цьому абсолютна величина σ майже не змінюється, а її положення слабо зміщується у високочастотну область електронного спектра.

Це дозволило визначити експериментально вимірювану величину відносної інтегральної інтенсивності (I) випромінювання залежно від напруженості магнітного поля ($\mathcal{H}$).

Розрахунок і аналіз спектральних параметрів електронних КСС, активної динамічної провідності та відносної інтегральної інтенсивності випромінювання виконувався на прикладі відкритої багаточарової РТС на основі квантових ям і бар'єрів, як окремого каскаду ККЛ з $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ – ямами і $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ – бар'єрами, що досліджувався експериментально [3*].

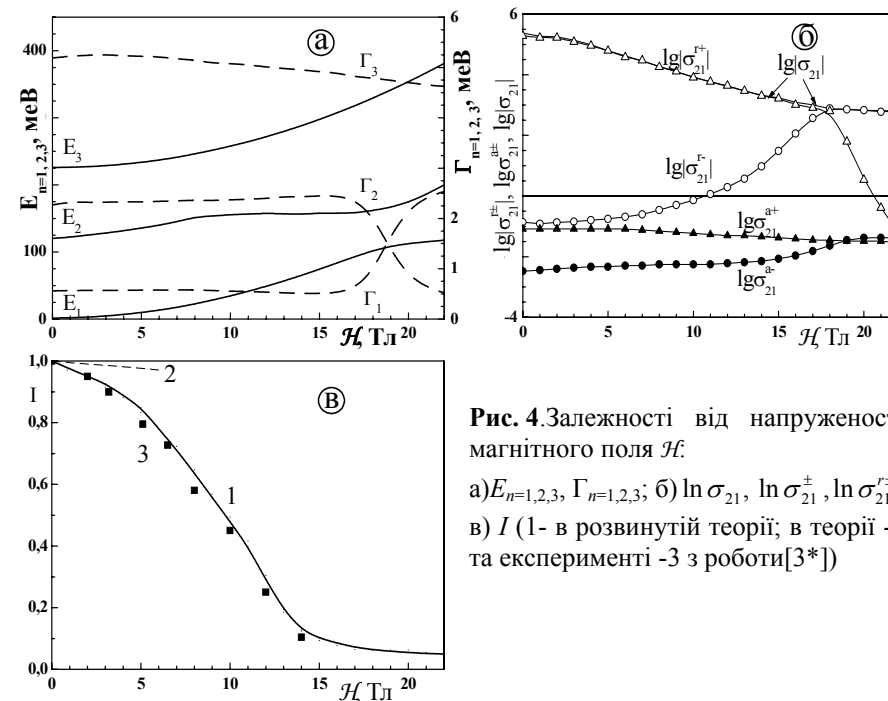


Рис. 4. Залежності від напруженості магнітного поля $\mathcal{H}$.

а) $E_{n=1,2,3}$, $\Gamma_{n=1,2,3}$; б) $\ln \sigma_{21}$, $\ln \sigma_{21}^{\pm}$, $\ln \sigma_{21}^{r\pm}$; в) I (1 - в розвинутій теорії; в теорії -2 та експерименті -3 з роботи [3*])

З рис. 4а видно, що зі збільшенням величини магнітного поля $\mathcal{H}$, величини РЕ всіх трьох КСС зростають. Якщо напруженість магнітного поля наближається до 18 Тл, то польові залежності РЕ $E_1(\mathcal{H})$ і $E_2(\mathcal{H})$ утворюють своєрідний антикросінг, а польові залежності РШ $\Gamma_1(\mathcal{H})$ і $\Gamma_2(\mathcal{H})$ перетинаються, що викликано зміною локалізації електрона в першому КСС, тобто його переміщенням з другої ями активної зони в першу.

З рис. 4 видно, що в усьому інтервалі зміни $\mathcal{H}$ величини динамічних провідностей ($\sigma_{21}^{\pm}$), які формуються в процесах квантових переходів ($2 \rightarrow 1$) з

роботах [1*,2*], виявив узгодження з експериментальними результатами з точністю до кількох відсотків.

У **четвертому розділі** досліджується електронний транспорт крізь плоску відкриту багатошарову РТС як каскад ККЛ, що знаходиться в поздовжньому електричному (F) і поперечному магнітному ($\mathcal{H}$) полях. У моделі окремого відкритого каскаду ККЛ розраховуються й аналізуються спектральні параметри КСС та активна динамічна провідність електронів залежно від напруженості ($\mathcal{H}$) поперечного магнітного поля.

Для цього потрібно розв'язати стаціонарне рівняння Шредінгера з гамільтоніаном $\hat{H}(\vec{r})$, яке через залежність ефективної маси від координати z , точно не розв'язується. Щоб відділити рух електрона у напрямку осі z від руху в перпендикулярній до нього площині, вводиться скорельована ефективна маса $\bar{m}$, яка відіграє роль варіаційного параметра у модифікованому методі Бете.

Згідно з методом Бете, точний гамільтоніан $\hat{H}(\vec{r})$ подається у вигляді суми основного гамільтоніана $\hat{H}_0$ і збурення $\Delta\hat{H}$ ($\hat{H}(\vec{r}) = \hat{H}_0 + \Delta\hat{H}$), де

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{m(z)} \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\hbar^2}{2\bar{m}} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \left(i \frac{\partial}{\partial x} - \frac{e\mathcal{H}}{c\hbar} z \right)^2 \right) + U(z) + U_e(z), \quad (11)$$

$$\Delta\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{1}{m(z)} - \frac{1}{\bar{m}} \right) \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \left(i \frac{\partial}{\partial x} - \frac{e\mathcal{H}}{c\hbar} z \right)^2 \right]. \quad (12)$$

У рівнянні Шредінгера з гамільтоніаном $\hat{H}_0$, що містить постійне електричне поле (F) у складовій $U_e(z)$ та постійне магнітне поле напруженості $\mathcal{H}$, змінні вже відділяються, а оскільки в ККЛ інжектвані електрони потрапляють перпендикулярно до площин РТС, то можна вважати, що поперечні квазіімпульси відсутні ($k_x=k_y=0$) і рух електрона описується одновимірним рівнянням Шредінгера. Його розв'язки в усіх шарах системи знаходяться точно й можуть бути представлені у вигляді лінійних комбінацій функцій параболічного циліндра. З використання умов неперервності хвильової функції на всіх межах РТС і з умови її нормування, вона знаходиться як функція параметра $\bar{m}$. Величина $\bar{m}$ отримується з умови мінімізації функціонала ($\langle \Delta\hat{H} \rangle = 0$), що однозначно визначає хвильову функцію, а отже, і функцію розподілу ймовірності, через яку визначаються необхідні спектральні параметри електронних КСС.

Далі у раніше описаному підході розв'язувалося повне рівняння Шредінгера, що визначає активну динамічну провідність відкритої багатошарової РТС з прикладеними до неї постійними поздовжнім електричним і поперечним магнітним полями.

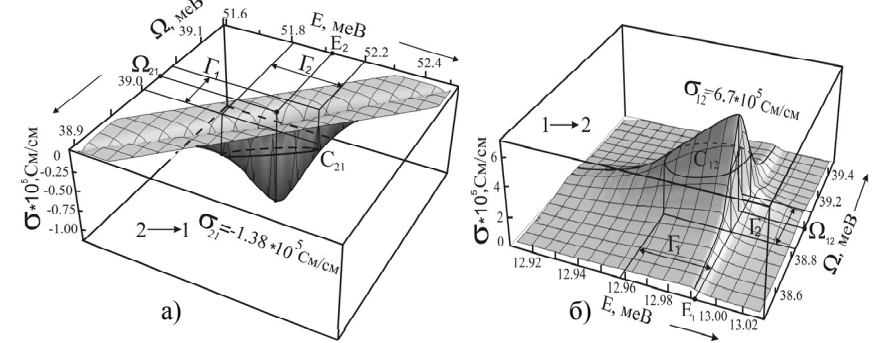


Рис. 2. Залежності σ від енергій електрона (E) та електромагнітного поля (Ω), для ДБРТС з параметрами $b=21,6\text{ нм}$; $\Delta^-=\Delta^+=4,2\text{ нм}$. а) лазерний; б) детекторний квантові переходи

За фіксованої величини E у переходах з поглинанням польової енергії, збільшення ν практично не впливає на форму залежності σ від Ω , і тому не змінює ні максимальну величину σ , ні її положення в шкалі енергій Ω .

У переходах з випромінюванням енергії поля, форма залежності σ від Ω стає клиноподібною так, що високоенергетичне крило залежить від Ω лінійно, а низькоенергетичне – круто спадає. При цьому абсолютна величина максимального значення σ практично не змінюється, а її положення слабо зміщується у низькоенергетичну область польових енергій (Ω).

У **третьому розділі** досліджуються спектральні параметри КСС і динамічна провідність електронів відкритими нано-РТС у постійному електричному полі та без нього у моделях окремих каскадів ККЛ та ККД, з урахуванням взаємодії електронів з електромагнітним полем. Для порівняння досліджується енергетичний спектр і сили осциляторів квантових переходів, розрахованих для аналогічних закритих РТС.

Для дослідження спектральних параметрів КСС електрона у відкритій моделі РТС чи стаціонарного спектра і сил осциляторів у закритих моделях розв'язувалося одновимірне стаціонарне рівняння Шредінгера з гамільтоніанами

$$H(z) = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{m(z)} \frac{\partial}{\partial z} + U(z) + \begin{cases} 0, & \text{ККД} \\ -eF\{z[\theta(z) - \theta(z-b)] - b\theta(z-b)\}, & \text{ККЛ} \end{cases} \quad (10)$$

де $U(z)$ – потенціальна енергія електрона в моделі прямокутних потенціальних бар'єрів відкритої багатошарової РТС розміру b , F – напруженість постійного електричного поля.

Стационарні рівняння Шредінгера з гамільтоніанами (10) розв'язуються точно: у випадку ККД розв'язками є плоскі хвилі, а у випадку ККЛ – лінійні комбінації функцій Ейрі. З використанням умов неперервності хвильових функцій на всіх межах РТС, та умов нормування однозначно визначається хвильова функція, а отже, й функція густини розподілу за енергіями, з якої отримуються резонансні енергії (E_n) і ширини (Γ_n) електронних КСС.

Аналітичний розрахунок активної динамічної провідності відкритих багатошарових РТС, що працюють у лазерному чи детекторному режимах, виконувався у малосигнальному наближенні шляхом розв'язування повного рівняння Шредінгера з гамільтоніанами (10) у раніше розвиненому підході.

Розвинені теорії квазістационарного електронного спектра й активної динамічної провідності відкритими РТС і стационарного спектра та сил осциляторів квантових переходів у відповідних закритих РТС дають змогу виявити ту модель каскаду, яка найбільш адекватно описує транспортні властивості електронів, а тому може слугувати основою для оптимізації роботи ККД і ККЛ шляхом належного вибору геометричного дизайну активної зони окремого каскаду.

З цією метою в моделі закритої РТС виконувався розрахунок стационарного енергетичного спектра (E_n) й сил осциляторів квантових переходів (f_{mn}), а у відкритій моделі – резонансних енергій (E_n), часів життя (τ_n), активної динамічної провідності (σ_{mn}) та її парціальних складових $\sigma_{mn}^{\pm}$, на прикладах експериментально досліджуваних ККЛ і ККД у роботах [1*,2*]. Результати розрахунків указаних величин залежно від ширини (b_1), зображені на рис 3а, б, в (ККД) і 3г, д, е (ККЛ).

Оптимізація вибору геометричної конфігурації активних зон каскадів ККД і ККЛ полягає в тому, щоб зміною ширини (b_1) вхідної ями забезпечити оптимальну роботу обох типів наноприладів. Тобто щоб ККД чи ККЛ працював на заданій частоті при мінімальному струмі збудження і при мінімальному впливі негативних факторів: провідність потрібного квантового переходу повинна значно переважати провідності, що виникають за рахунок квантових переходів у всі інші стани; а провідність, що формується струмом на вихід, повинна значно переважати зворотну провідність каскаду; часи життя у робочих КСС повинні бути значно меншими, ніж часи релаксації за рахунок дисипативних процесів. На відміну від відкритої моделі каскадів, як багатошарових РТС, яка, як видно з рис. 3, дозволяє детально аналізувати вказані параметри залежно від ширини b_1 вхідної ями активної зони і в такий спосіб здійснювати однозначний вибір геометричної конфігурації, закрита модель не дозволяє здійснювати однозначний вибір конфігурації, оскільки в ній можна здійснити лише оцінку відношення сил осциляторів у потрібному квантовому переході до конкуруючих.

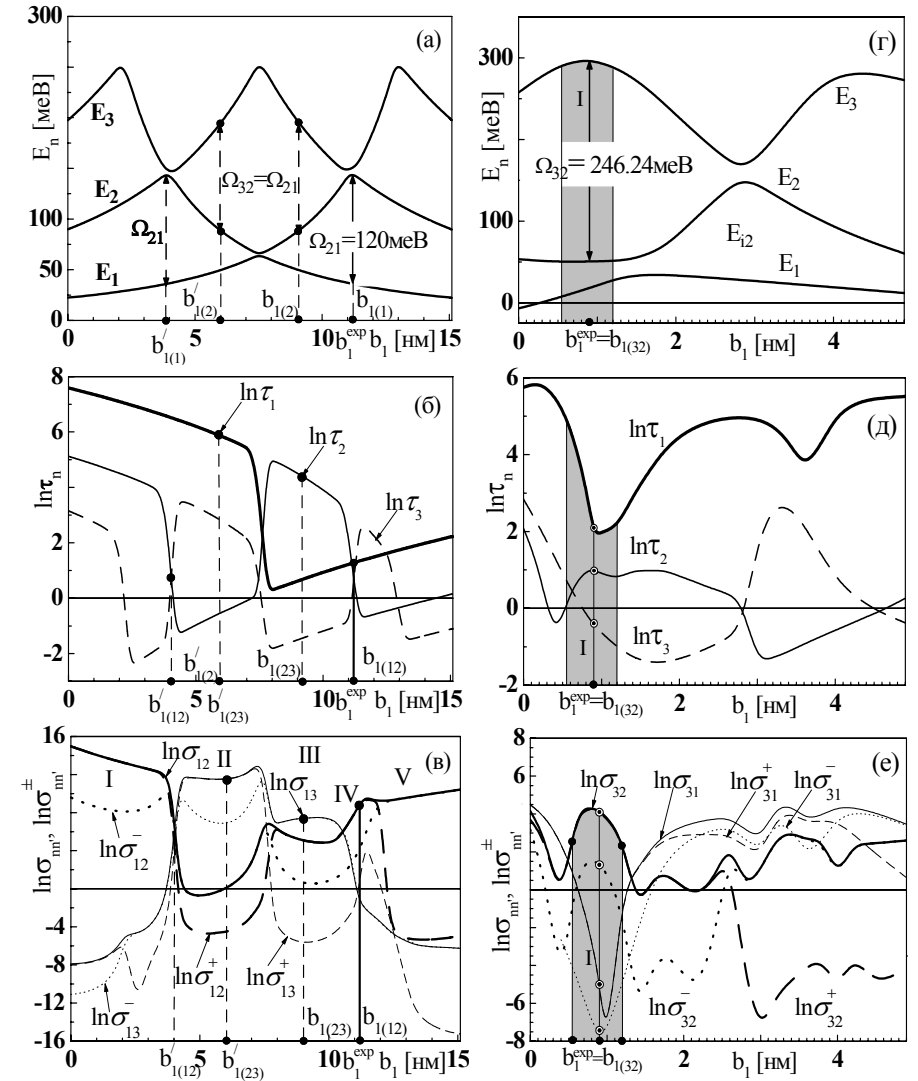


Рис. 3. Еволюція E_n , $\ln(\tau_n)$ в одиницях $\tau_0=1$ пс та $\ln\sigma$, $\ln\sigma^{\pm}$ в одиницях $\sigma_0=1$ См/см залежно від ширини (b_1) вхідної ями активних зон каскадів ККД [1*] та ККЛ [2*]

Як видно з рис. 3, виконаний розрахунок геометричних конфігурацій активних зон ККД і ККЛ з параметрами, наведеними в експериментальних