

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Іванова Микити Анатолійовича

“Динамічні закономірності резонансних квантових систем”,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність теми дослідження. Електронний транспорт у наноструктурах є предметом підвищеного інтересу. Розвиток цього напрямку допоможе зробити вклад у побудову майбутньої нанoeлектроніки, яка буде більш мініатюрною, більш швидкою і більш надійною у порівнянні із звичайною сьогоденною електронікою. Тобто, окрім свого фундаментального характеру, такі дослідження також мотивуються і великою зацікавленістю з точки зору розвитку технологій. Властивість дискретності енергетичного спектра електронів та дірок у квантових нанооб'єктах використовується для створення приладів з високою температурною стабільністю. В останні роки проблемі електронного транспорту в тунельно-пов'язаних наноструктурах приділяється значна увага дослідників. Актуальною є проблема керованості параметрів наноструктур і мезоскопічних систем з урахуванням їх нелінійних властивостей. Науковий і практичний інтерес до тунельних процесів обумовлений насамперед надзвичайною чутливістю ймовірності тунелювання до внутрішніх характеристик системи і сигналу – хвильового пакету. Особливий інтерес викликає тунелювання за наявності у системи резонансних рівнів енергії. Саме остання обставина дає додаткову “ступінь вільності” для можливого “конструювання” властивостей таких наноструктур. При цьому істотним виявляється той факт, що в штучних, доступних сучасним нанотехнологіям структурах з квантовими точками або квантовими молекулами можлива наявність нетривіальних квантових ефектів. Актуальність подальшого розвитку досліджень тунелювання у структурах з потенціальною ямою, при використанні квазікласичних або інстантонних підходів, пов'язана з можливістю отримання основних результатів в аналітичній формі, що в інших підходах, при необхідності враховувати принципово важливий вплив системи на процес тунельного переносу, не є можливим. Теорія транспортних явищ у мезоскопічних системах заснована на підході

Ландауера-Бьоттікера. Основа цього підходу полягає в тому, що процес тунелювання розглядається як процес розсіювання на потенціалі.

Таким чином, вивчення квантових ефектів, пов'язаних з тунельною динамікою в системах з квантовими ямами енергетичної діаграми, є актуальною проблемою сучасної теоретичної фізики. Дослідження динамічних характеристик тунелювання, що є метою дисертаційної роботи Іванова М.А., становить вкрай важливу задачу, яка матиме застосування в сучасній мікро- та наноелектроніці. Виявлення залежностей часу затримки від параметрів початкового пакету дає широкі можливості для оптимізації та пришвидшення роботи багатьох електронних приладів та апаратів. Крім того, через зміну форми хвильового пакету під час його розповсюдження виникають складності з фіксацією вихідного пакету.

Новизна основних положень дисертаційної роботи. Розглядаючи процес тунелювання, в початковому стані мають два хвильові пакети, що не перекриваються, центри яких досить віддалені один від одного. Таким чином, при побудові теорії потрібно задавати початковий і кінцевий стан у вигляді хвильових пакетів і стежити за їх рухом у часі. Побудова теорії з використанням хвильових пакетів вважається пов'язаною з великими математичними труднощами. З цих причин вважається, що у загальному вигляді поставлена задача не має аналітичного розв'язку. Її розв'язок пропонувався або в одиничних випадках, для певних систем і для визначеної форми пакетів, або методом комп'ютерної симуляції, який не дозволяє проводити аналіз та детальне дослідження особливостей цього процесу.

Найбільш важливим результатом роботи є створення ряду ефективних прийомів для розв'язання задачі дослідження процесу тунелювання хвильових пакетів крізь квантові системи з резонансними рівнями. Для опису процесу тунелювання використовуються підходи, засновані на теорії квантового переносу, теорії ефективної маси, а також квантової статистики при використанні матриці щільності, функцій Гріна та функцій Вігнера.

У дисертації запропоновано нові модифікації добре відомих математичних методів та фізичних підходів. Одним з таких є метод перевалу, що застосовується для оцінки інтегралів, підінтегральні функції яких мають різкий максимум. У дисертаційній роботі було запропоновано доповнити застосування цього методу умовами визначення точок стаціонарності та використанням безрозмірних змінних. Цілями розробки модифікацій було виділення серед всіх особових точок таких, що визначають лінії найшвидшого спадання, відповідно до яких деформується контур інтегрування; крім того, застосування безрозмірних змінних дало можливість поширити застосовність

розвинутого методу на «вузькі» та «широкі» хвильові пакети, одночасний розгляд яких в рамках єдиного підходу раніш вважався неможливим. Показано, що при невеликих значеннях параметру згасання ρ розв'язок, отриманий за допомогою модифікованого методу перевалу співпадає з точним розв'язком для задачі тунелювання хвильового пакету гаусової форми крізь квантову точку. Однак при великих значеннях ρ спостерігалася втрата малих гармонік на фоні збереження відповідності головного піку. Для встановлення співпадіння результатів застосовується розвинення до другого члена асимптотичного ряду. Запропонована модифікація дозволила відновити загублені при розрахунку малі гармоніки.

Розроблений метод застосовано для дослідження тунелювання хвильового пакету прямокутної форми крізь квантову систему з одним резонансним рівнем у представленні Θ -функцій Хевісайда та суперпозиції трьох гаусових пакетів. Необхідність врахування особливостей як пакету, так і системи одночасно, передбачає складні математичні обрахунки. Внесення виразів, що містять полюси матриці розсіювання, до аргументу експоненти підінтегрального виразу, знімає дане ускладнення. Подальше врахування їх при знаходженні сідлових точок призводить до одночасності врахування особливостей системи і пакету в рамках однієї процедури. Визначення часу затримки пакету в системі, відповідно до визначення Вігнера, пов'язано з аргументом хвильової функції пакету, що виходить з системи та знаходиться диференціюванням аргументу хвильової функції за енергією. Знайдені аналітичні результати інтегрування дають можливість визначити форму і аргумент хвильової функції пакету у будь-який момент часу після виходу з системи.

Для опису процесу тунелювання пакету крізь квантовий діод побудовано відповідну матрицю розсіювання. З цією метою розв'язано рівняння Шрьодінгера для незбуреної частини потенціальної енергії діоду та отримані хвильові функції кожної області енергії. На основі цих рівнянь побудовано пропагатор у вигляді функцій Гріна, що дозволило поширити розв'язок на збурену частину потенціальної енергії. На основі запропонованих розв'язків побудована R-матриця квантової системи, яка містить в собі інформацію про зв'язані стани та низькоенергетичні резонанси. Отже побудована на її основі матриця розсіювання пропонує ефективний спосіб для точної параметризації не тільки резонансів, а також нерезонансної частини низькоенергетичних перетинів з невеликою кількістю параметрів.

Наукові результати дисертаційної роботи є **достовірними та обґрунтованими**, оскільки були отримані на основі вірогідних аналітичних та напівемпіричних моделей за допомогою відомих аналітичних та числових методів. Отримані автором аналітичні формули було перевірено шляхом співставлення з результатами відповідних задач, які мають точні розв'язки. Автором проведено серію розрахункових експериментів, що моделювали процес тунелювання хвильового пакету гаусової форми крізь квантові системи з одним резонансним рівнем, результати яких засвідчили гарний збіг відновлених профілів з точними. Результати дисертаційної роботи неодноразово обговорювались на міжнародних конференціях фізичного та радіофізичного профілю.

Проблема резонансного тунелювання крізь відкриту квантову систему була вирішена у загальному випадку, що відкриває перспективи для широкого застосування в мікроелектроніці. Результати роботи створюють можливість для покращення характеристик швидкодії приладів, побудованих із застосуванням квантових діодів, точок та транзисторів квантового тунелювання. Характеристики можливо поліпшити завдяки використанню аналітичних розрахунків, що дозволяють підібрати оптимальний початковий імпульс хвильового пакету, при якому час тунелювання буде мінімальним.

Ймовірність розпізнавання детекторами сигналу, що виходить з системи, залежить від стабільності форми, і це впливає на ефективність та швидкість роботи приладу. Можливість попереднього аналітичного дослідження форми вихідного пакету дозволяє підвищити достовірність передачі інформації. Крім того, прогнозовану зміну форми хвильових пакетів можна використовувати для шифрування даних у системах зв'язку.

Разом з тим, по змісту дисертації необхідно зробити деякі зауваження.

1. При розгляді модифікованого методу перевалу було з'ясовано, що при тунелюванні сигналу гаусової форми крізь квантову систему з одним резонансним рівнем, мала місце втрата малих гармонік у формі вихідного сигналу. Зазначається, що виявлена похибка корелює із значенням параметром згасання ρ , який залежить від енергетичної ширини резонансного рівня. Було встановлено, що відновлення малих гармонік досягається шляхом врахування більшої кількості членів асимптотичного розкладу. Але автор не вказує границь, при яких достатньо застосування головного члена ряду асимптотичного розкладу або критерії необхідності врахування більшої кількості доданків. Незрозумілою залишається кореляція параметру затухання та кількості членів розкладу.

2. Виконуючи порівняння точного та асимптотичного розв'язків, отриманих за допомогою розвинутих підходів, встановлюється точність отриманих результатів. Однак для повної достовірності представляється необхідним порівняння із результатами, отриманими методом комп'ютерної симуляції.

3. Використана автором модель визначення параметрів вихідного сигналу передбачає відомість ширини енергетичних рівнів системи, в той час як методика відповідних вимірювань в дисертації не приведена.

4. Автор дослідив тунелювання хвильового пакету гаусової форми крізь квантовий діод, при цьому тунелювання хвильового пакету прямокутної форми крізь вибрану структуру досліджено не було.

Разом з тим, вказані зауваження суттєво не впливають на основні результати, отримані в дисертації, та не знижують високої оцінки наукового рівня роботи.

Повнота викладення в наукових працях. Дисертаційна робота відбиває результати завершеного наукового дослідження. Низка результатів, отриманих дисертантом, характеризуються науковою новизною та практичною цінністю, що робить їх гідним вкладом як в теоретичну розробку методів розв'язання задач, пов'язаних із дослідженням процесу квантового тунелювання, так і в розвиток сучасних безконтактних вимірювально-обчислювальних систем прикладного призначення.

Стосовно **загальної оцінки** дисертації М.А. Іванова слід зазначити, що вона є цілісним дослідженням з чіткою структурою і логічним викладанням матеріалу, що свідчить про персональний внесок автора в розробку предмета дослідження. Дисертаційна робота написана з використанням прийнятої в даній науковій області термінології. Результати опубліковані в журналах та збірниках наукових праць, затверджених Міністерством освіти і науки України для даної спеціальності. Аналіз публікацій автора показав, що вони мають усі необхідні елементи, що підкреслюють повноту розкриття розроблюваних питань. Робота має достатню апробацію на міжнародних фахових конференціях. Автореферат повно передає зміст дисертації та вірно відображає структуру та нові результати дисертаційної роботи.

Враховуючи зазначене вище, вважаю, що дисертаційна робота М.А. Іванова "Динамічні закономірності резонансних квантових систем" відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р. та № 1159 від 30.12.2015 р., щодо кандидатських

дисертацій, а її автор, Іванов Микита Анатолійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Провідний науковий співробітник
відділу фізики високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова,
доктор фізико-математичних наук



Д.В. Анчишкін

