

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шкоп Анастасії Дмитрівни

«Ефекти електрон-електронної та електрон-вібронної взаємодії в транспорті заряду та спіну в тунельних наноструктурах»,
яка подана на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота Шкоп А.Д. присвячена теоретичному опису тунельного транспорту в наносистемах при врахуванні електрон-електронної та електрон-вібронної взаємодії. Розглядаються багатокомпонентні мезоскопічні системи, зокрема, електростатичний розсіювач у вуглецевій нанотрубці, транзистор з поміщеною між електродами молекулою або майоранівським квантовим нанодротом. Вплив взаємодії електронів на транспортні характеристики мезоскопічних систем є **актуальною** тематикою сучасної фізики конденсованого стану, що зумовлено зменшенням просторових розмірів електронних пристроїв. В роботі досліджуються вольт-амперні характеристики транзисторів, коефіцієнт проходження бар'єру та параметри човникового транспорту заряду, розгляд ведеться за наявності ефектів взаємодії електронів. Такий розгляд робить теоретичні моделі наближеними до реальних систем. Результати можуть мати практичне застосування при інтерпретації експериментальних даних, в спектроскопії молекул або задля виявлення човникового транспорту заряду.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи Шкоп А.Д. підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наступних проектів, які виконувались у відділі теоретичної фізики Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України:

- «Теоретичні дослідження нелінійних та квантових явищ в наноструктурах і нових матеріалах» (номер державної реєстрації 0112U002642, термін виконання 2012 – 2016 рр.),

- «Теоретичні дослідження колективних явищ у квантових конденсованих структурах та наноматеріалах» (номер державної реєстрації 0117U002292, термін виконання 2017 – 2021 рр.).

Дисертаційна робота складається з п'яти розділів.

Перший розділ містить огляд наукової літератури з розглянутої в дисертації тематики та введення уживаних в дисертації понять.

У **другому розділі** надано теоретичний опис процесів тунелювання електронів через майоранівський квантовий дріт, поміщений між масивними електродами, та виявлено особливості протікання струму у майоранівській системі, зумовлені сильною асиметрією тунельних контактів. Пристрій розглянуто в двох конфігураціях – при заземленні майоранівського нанодроту та без заземлення.

У **третьому розділі** розрахований спектр електронів в металевій одношаровій вуглецевій нанотрубці при врахуванні електрон-фононної взаємодії та знайдено коефіцієнт проходження електростатичного бар'єру в такій системі.

Показано, що в спектрі електронів виникає щілина, і це зумовлює зменшення коефіцієнту проходження бар'єру. При тому щілина, що виникає за рахунок електрон-електронних кореляцій, спричинених електрон-фононою взаємодією, залежить від кута хіральності нанотрубки. Ця залежність має місце і для коефіцієнту проходження, що приводить до хірального тунелювання в системі.

У **четвертому розділі** розглядається молекулярний транзистор зі спінополяризованими електродами у зовнішньому магнітному полі. Знайдено струм та кондуктанс системи з урахуванням взаємодії електронів з вібронними збудженнями молекули. Розділ включає два підрозділи, в першому з яких задачу розв'язано при нехтуванні кулонівськими кореляціями, а в другому з використанням матриці густини вивчено вплив електрон-електронної взаємодії на кондуктанс та взаємодію вібронних та кулонівських ефектів. Використовується наближення послідовного тунелювання електронів в умовах слабкого зв'язку. Чисельними та аналітичними методами проводиться аналіз отриманих результатів, з якого випливає, що вольт-амперні характеристики молекулярного транзистора суттєво модифікуються через зєсманівське розщеплення рівня на молекулі та скінченне значення кулонівської енергії. Виявлено немонотонну температурну залежність кондуктансу системи в широкому діапазоні зовнішніх магнітних полів та при довільній кулонівській енергії.

У **п'ятому розділі** теоретично описано молекулярний транзистор зі спіновою поляризацією електродів, поміщений в зовнішнє магнітне поле, причому в системі покладаються суттєвими обмінні (магнітні) сили. В такому пристрої можуть розвиватися механічні коливання молекули, що приводять до появи човникового транспорту заряду та спіну між електродами – магнітного шатлу. Отримано рівняння руху молекули, чисельними і аналітичними методами проаналізовано критерії розвитку режиму шатлювання в системі. Досліджено умови появи магнітного шатлу для випадків двох різних джерел енергії електронів: при тунелюванні під дією тягнучої напруги та при термоіндукованому транспорті. Показано, що термоіндуковане магнітне шатлювання – це порогове явище за параметрами різниці температур електродів, величини кулонівської взаємодії та зовнішнього магнітного поля.

Таким чином, в дисертаційній роботі шляхом аналітичного та чисельного розв'язання тунельних задач здобуто низку **нових** результатів. Зокрема, показано, що в системі контактів з майоранівським нанодротом, сильно асиметричним за тунельними зв'язками, кондуктанс досягає максимуму при нульовій напрузі. Виявлено, що в металевій одношаровій вуглецевій нанотрубці електрон-електронна взаємодія індукує енергетичну щілину, що приводить до залежності коефіцієнту проходження бар'єру в нанотрубці від кута хіральності. Встановлено, що вольт-амперні характеристики молекулярного транзистора зі спінополяризованими електродами мають подвоєну кількість сходинок струму, а також області без сходинок. Знайдені області існування термоіндукованого магнітнокерованого човникового транспорту у молекулярному транзисторі.

Обґрунтованість та достовірність здобутих у дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів

теоретичної фізики конденсованого стану, а також підтверджується ретельно зробленими викладками, наведеними у тексті. В рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються та підтверджуються чисельними розрахунками.

Практичне значення одержаних результатів пов'язане з використанням знайденого максимуму кондуктансу при нульовій напрузі для майоранівського контакту при сильній асиметрії системи для аналізу експериментів з виявлення майоранівських станів. Передбачений ефект зменшення коефіцієнту проходження потенціального бар'єру в нанотрубці може бути практично використаний в експериментах. Особливості вольт-амперних характеристик молекулярного транзистора можуть допомогти інтерпретувати експериментальні дані реальних систем, мати застосування в спектроскопії молекул.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Шкоп А.Д. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН як Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України (м. Харків), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут фізики НАН України (м. Київ), Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України (м. Київ).

По змісту дисертації можна зробити такі **зауваження**

1) У п'ятому розділі розглядається перехід від загасаючих коливань квантової точки до режиму човникового транспорту у молекулярному транзисторі. Доречно було б навести пояснення щодо різниці між вібронним режимом, розглянутим у попередньому розділі, та режимом, коли коливання загасають і не має місця розвиток човникового транспорту.

2) При описі діаграм, наведених у розділі п'ять, зокрема, тих, що зображують еволюцію коливань квантової точки і залежність критичних магнітних полів від кулонівської енергії, надано фіксовані значення багатьох суттєвих параметрів системи. Варто було б додати пояснення щодо того, чи є діапазон значень цих параметрів, де має місце шатлювання, достатньо широким, чи ефект спостерігається лише в малій околиці цих значень.

Зазначені зауваження не впливають на цінність здобутих автором результатів та на загальну високу оцінку роботи. Дисертація прекрасно структурована і написана гарною науковою мовою. Основні результати опубліковано в 5 статтях в фахових наукових журналах. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи і автореферат повністю відображають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача.

Дисертація Шкоп А.Д. є закінченою науковою працею, в ній вирішено важливу наукову задачу, яка має істотне значення для теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: теоретично описаний вплив електрон-електронної та електрон-вібронної взаємодії на тунельний транспорт заряду та спіну в

вуглецевих нанотрубках та молекулярних транзисторах. Враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність та обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація задовольняє вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 11 та 12 Порядку присудження наукових ступенів, а автор дисертації, Шкоп Анастасія Дмитрівна, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент –
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
головний науковий співробітник відділу теоретичної фізики
Інституту радіофізики та електроніки
імені О.Я. Усикова НАН України

В.О. Ямпольський

Підпис головного наукового співробітника ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України Ямпольського В.О. засвідчую.

Вчений секретар ІРЕ ім. О.Я. Усикова
НАН України, кандидат фіз.-мат. наук



І.Є. Почаніна