

Відгук
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Ільїнської Ольги Олександровни
«Квантові електромеханічні та термоелектричні ефекти
у наносистемах зі спін-поляризованими електронами»,
яка представлена на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота О.О. Ільїнської присвячена теоретичному дослідженням квантових електромеханічних та термоелектричних ефектів у наносистемах зі спін-поляризованими електронами. Наносистеми, які розглядаються в даній роботі, – це квантові точки, тунельно зв'язані з електродами – витоком і стоком електронів. В залежності від постановки задачі квантова точка може бути рухомою або нерухомою, електрони в електродах – повністю або частково поляризованими за спіном, а електроди можуть підтримуватися або при різних хімічних потенціалах, або при різних температурах, або як при різних хіміческих потенціалах, так і при різних температурах. Теоретичне дослідження електронного транспорту в таких системах на сьогодні вбачається актуальною задачею в фізиці конденсованого стану. По-перше, дослідження вищезгаданих наносистем зі спін-поляризованими електронами є важливим з фундаментальної точки зору, тому що в цьому випадку з'являються нові ефекти, які були відсутні в системах з неполяризованими електронами. По-друге, в тунельних системах з рухомою квантовою точкою перенос електронів між електродами може здійснюватися чолночним чином – завдяки періодичному механічному руху гранули. Такий перенос заряду за певних умов на порядки підвищує тунельний струм, а також подібні системи можуть бути використані в якості сенсорів і перемикачів з низькими енерговитратами і високою швидкістю дії. По-третє, багато уваги в сучасній фізиці термоелектриків приділяється саме наносистемам, котрі, як було передбачено, а потім підтверджено в експерименті, мають вищу ефективність у порівнянні з тривимірними аналогами. До того ж, зараз активно розвивається спінtronіка, тобто електроніка на основі спін-поляризованих електронів.

Актуальність обраної теми дисертації підтверджується також тим, що робота була виконана в рамках тематичного плану Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України за відомчими тематиками «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.).

Дисертація О.О. Ільїнської складається з чотирьох розділів, перший з яких містить огляд літератури, а інші – оригінальні результати.

У **першому розділі** введені основні поняття, що використовуються в подальшому: термоелектричні коефіцієнти, термоелектрична добродійність;

шатлівський, або чолночний, транспорт електронів, шатлівська нестійкість – експоненціальне зростання амплітуди коливань квантової точки. Детально описано модель магнітної наноелектромеханічної системи на основі квантової точки, яка тунельно зв'язана з повністю поляризованими за спіном електродами та знаходиться в зовнішньому магнітному полі. Різні варіації цієї моделі використані в усіх розділах даної роботи.

У другому розділі досліджується шатлівська нестійкість електричного і магнітного шатлів з неповною поляризацією за спіном електронів в електродах. При повній поляризації електродів у протилежних напрямках для зняття спінової блокади електричного струму потрібне зовнішнє магнітне поле, не колінеарне намагніченості електродів. У випадку часткової поляризації струм тече і за відсутності зовнішнього магнітного поля, завдяки появлі каналу транспорту без перевороту спіну. У даному розділі виявлено, чим відрізняється область шатлівської нестійкості для випадку часткової поляризації від випадку повної поляризації. Встановлено, що в електричному шатлі в режимі кулонівської блокади є критичне значення ступеня поляризації (блізько 64%), нижче якого не можна, змінюючи магнітне поле, здійснювати перехід між вібронною та шатлівською областями електронного транспорту. Для магнітного шатлу передбачено існування нижнього критичного магнітного поля, яке відокремлює вібронну область від шатлівської. У наявності нижнього поля полягає якісна відміна випадку частково поляризованих електронів від випадку повної спінової поляризації. У роботі дається фізичне пояснення виникнення нижнього критичного поля.

У третьому розділі передбачене існування термоіндуктованого одноелектронного шатлу. Вперше розглянута шатлівська система з обмінними силами між квантовою точкою і електродами та **тепловим, а не електричним**, джерелом енергії. Як і в попередньому розділі, механічний рух квантової точки вважається класичним, а спінова динаміка електрона на точці враховується точно. Тому для знаходження області шатлівської нестійкості дисертант використала метод матриці густини. Розглянуто випадок нульової температури в стоковому електроді, і встановлено, що область нестійкості в змінних «температура – магнітне поле» обмежена верхнім і нижнім критичними магнітними полями. Природа верхнього поля відома з літератури, а природа нижнього поля встановлена в даній дисертаційній роботі і полягає у наявності в наноелектромеханічній системі внутрішнього тертя, яке виникає, завдяки силам притягання між квантовою точкою і витоком-термостатом. Показано, що коефіцієнт внутрішнього тертя немонотонно залежить від температури, а саме, прямує до нуля в граници високих та низьких температур.

У четвертому розділі досліджуються термоелектричні ефекти в спінtronних транзисторах у наближенні лінійного відгуку. У підрозділі 4.1 розглянуто спінtronний термоелектричний пристрій на основі квантової точки. У даній системі електроди повністю поляризовані за спіном у протилежних напрямках, і ключовим параметром є не колінеарне їх намагніченостям зовнішнє магнітне поле, яке викликає перевороти спіну електрона на квантовій точці, завдяки чому тече електричний струм. Оптимізовано потужність даного

термоелектрика за магнітним полем, середньою температурою і параметром відхилення від резонансу. Основний результат даного підрозділу полягає в тому, що в режимі максимальної потужності термоелектрична добротність ZT спінтронного пристрою в декілька разів перевищує термоелектричну добротність пристрою з неполяризованими електронами. У підрозділі 4.2 досліджено термоелектричні властивості транзистора на основі пружно деформованої металічної вуглецевої нанотрубки. У літературі було показано, що наявність потенціалу деформації призводить до «гострих рис», зокрема до глибокого «провалу», у залежності коефіцієнту проходження від енергії. У даній роботі досягнуті високі значення термоелектричної добротності за допомогою підбору положення хімічного потенціалу по відношенню до «стінок» вищезгаданого «провалу».

Результати дисертаційної роботи О.О. Ільїнської є **обґрунтованими і достовірними**, зокрема тому, що вони отримані з використанням добре апробованих методів теоретичної фізики. Це метод матриці густини, теорія збурень, підхід Ландауера—Бюттікера. Розглянуті в роботі електромеханічні і термоелектричні ефекти мають **фундаментальне значення** для розуміння особливостей транспорту електронів, поляризованих за спіном. Якщо експериментальна техніка дозволить створювати одноелектронні тунельні пристрої, одержані в дисертації результати стимулюватимуть проведення експериментів у наносистемах зі спін-поляризованими електронами. Наприклад, термоіндуктований шатл можна використати для зняття небажаних температурних градієнтів у нанопристроях. Це говорить про **практичне значення** результатів дисертації.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи О.О. Ільїнської фахівців Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інституту магнетизму МОН України та НАН України (м. Київ), Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ), Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна НАН України (м. Київ), Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” (м. Харків), Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України (м. Харків), Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна МОН України, Науково-технічного комплексу «Інститут монокристалів» НАН України (м. Харків).

До змісту дисертації є такі зауваження.

1. У розділах 2 і 3 дисертації механічна підсистема описується в класичному наближенні, на відміну від спінової динаміки електрона на квантовій точці. Послідовний аналіз повинен описувати механічну підсистему в квантовомеханічному наближенні. У роботі не обговорюється справедливість опису механічної підсистеми в класичному наближенні, і виникає питання, чи слід очікувати квантовомеханічних поправок до критерію шатлівської нестійкості.
2. У третьому розділі дисертації розглянутий випадок кулонівської блокади електронного транспорту, але не обговорюється ситуація у випадку

довільних енергій кулонівського відштовхування. Це зауваження слід розглядати як побажання на майбутнє.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації О.О. Ільїнської.

Основні результати дисертації опубліковані в 6 статтях та 8 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних наукових конференцій. Зміст автореферату правильно відбуває основні положення дисертації.

Дисертація О.О. Ільїнської є завершеною науковою працею, в якій отримані нові результати, що вирішують важливу задачу теоретичної фізики, а саме: теоретично описано квантові ефекти в транспорті спін-поляризованих електронів у наноелектромеханічних системах, які побудовані на базі молекулярних транзисторів. За своїм обсягом, актуальністю тематики, обґрунтованістю і достовірністю висновків, новизною одержаних результатів та їх науковим і практичним значенням дисертація О.О. Ільїнської безумовно задовільняє вимогам, які ставляться до кандидатських дисертацій МОН України, зокрема пунктам 9, 11, 12 Порядку присудження наукових ступенів, а її автор, без сумніву, заслуговує на присудження її наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент –
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
директор Інституту електрофізики і
радіаційних технологій НАН України  Клепіков В.Ф.

Підпис члена-кореспондента НАН України,
доктора фізико-математичних наук,
професора Клепікова В.Ф. **засвідчую.**

Вчений секретар Інституту електрофізики і
радіаційних технологій НАН України,
кандидат фізико-математичних наук

А.В. Бабіч

