

Відгук

**офіційного опонента про дисертаційну роботу
МІРЗОЄВА Ільгара Гахіровича «Транспортні властивості провідних
наносистем: прояв квантових ефектів», яка подана на здобуття
наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.07– фізика твердого тіла**

Актуальність теми дисертації.

Інтенсивний розвиток нанофізики та нанотехнологій на сучасному етапі розвитку науки і техніки визначає все зростаючий інтерес до наноструктур і стимулює проведення досліджень по виявленню специфіки властивостей нанооб'єктів в порівнянні з макрооб'єктами та можливостей їх практичного застосування. Це стимулює дослідження квантових ефектів, які проявляються у наноструктурах і які потрібно приймати до уваги при прогнозуванні фізичних параметрів наноструктур та нанопристроїв і розробці методів їх найбільш ефективного використання.

В якості об'єктів досліджень в дисертаційній роботі Мірзоева І.Г. обрали добре відомі наноматеріали, які вже знайшли на сьогоднішній день практичне застосування. Це вуглецеві нанотрубки та кристали кремнію з вбудованими в його площину нанокристалітами дисиліциду хрому. В цих двох низькорозмірних системах можна чекати прояву квантових ефектів, які можуть суттєво змінити транспортні властивості і які треба детально досліджувати.

Вуглецеві нанотрубки – добре відомий клас вуглецевих матеріалів, які володіють унікальними механічними, електрофізичними, магнітними та іншими властивостями, що визначає можливість їх різноманітних застосувань. Дуже привабливими здаються напрями, які пов'язані з розробками у різних областях сучасної електроніки. Такі властивості нанотрубок як їх малі розміри, що змінюються в широких межах в залежності від умов синтезу, електропровідність, механічна міцність та хімічна стабільність дозволяють розглядати нанотрубки як основу майбутніх елементів мікроелектроніки. Тому електрофізичні властивості вуглецевих нанотрубок перебувають у стадії найбільш пильного вивчення вченими всього світу. При цьому введення дефектів різного типу, в тому числі легування нанотрубок, може привести до радикальної зміни властивостей і це розширює можливості практичного застосування. Проте відчувається явний дефіцит у дослідженні транспортних властивостей нанотрубок, мікроскопічних процесів, які лежать в їх основі, особливостей механізмів провідності, які пов'язані з особливостями структури.

Між тим рішення цих питань, розуміння фізики процесів перенесення заряду важливо не тільки з фундаментальної, але і з практичної точок зору.

Кристали кремнію з вбудованими в його площину нанокристалітами дисиліциду хрому – ще один приклад системи, в якій можуть проявлятися квантові ефекти в провідності і яка уявляє інтерес з практичної точки зору, бо виробництво мікроелектроніки на основі таких систем добре сумісне з традиційною кремнієвою технологією. Транспортні властивості таких систем вивчені недостатньо.

Саме тому тема дисертації, яка присвячена встановленню механізму транспорту носіїв заряду та виявленню квантових ефектів у вуглецевих нанотрубках та наносистемах на основі кремнію з нанокристалітами дисиліциду кремнію, безумовно, **актуальна як з наукової, так і з практичної точок зору.** Актуальність дисертаційної роботи Мірзоева І.Г. підтверджується і тим, що ця робота виконувалася згідно з планами науково-дослідних робіт Фізико-технічного Інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України відповідно до відомчої теми: «Електронний транспорт в нових провідних і надпровідних системах» (номер державної реєстрації 0112U002637, термін виконання 2012-2016).

Структура і зміст дисертації.

Дисертація Мірзоева І.Г складається з вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації складає 136 сторінок, дисертація містить 59 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел з 94 найменувань на 6 сторінках.

У **вступі** викладено актуальність теми, визначено мету дисертаційної роботи, представлено методи, об'єкт та предмет досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів та їхнє практичне значення, наведено дані щодо апробації результатів роботи.

Перший розділ «Транспортні властивості систем зі зниженою розмірністю» (літературний огляд) містить літературний огляд за тематикою дисертації на момент початку роботи. Наведена загальна інформація про електропровідність твердих тіл з різною розмірністю, вплив магнітного поля та розмірів зразка на характер провідності, про квантові розмірні ефекти у низькорозмірних наносистемах. Наведено відомості про інтерференційні квантові ефекти - слабку локалізацію та електрон-електронну взаємодію, про квантові поправки до електропровідності і особливості поведінки у магнітному полі внаслідок наявності цих ефектів. Розглянуто механізми стрибкової провідності в результаті сильної локалізації носіїв заряду у слабковпорядкованих сис-

темах і показано, що такий тип провідності може реалізуватися у системах квантових точок в площині напівпровідникового кристала. Описано об'єкти дисертаційної роботи – вуглецеві нанотрубки та структури на основі кристалу кремнію з вбудованими в його площину нанокристалітами дисиліциду хрому. Доводиться, що бракує даних про вплив легування та функціоналізації на транспортні властивості вуглецевих нанотрубок, а також про кінетичні властивості структур на базі кремнію з квантовими точками. На основі аналізу літературних джерел дисертант приходить до висновку, що на момент початку робіт над дисертацією практично відсутні дані про особливості транспортних властивостей у цих об'єктах і формулює основну мету дисертації – виявлення квантових ефектів у провідності об'єктів роботи та вплив на їх прояв різних факторів.

У другому розділі «Об'єкти та методи експериментальних досліджень» описано технологію виготовлення дослідних зразків, наведено їх структурні та геометричні параметри, детально описано методику вимірювання електропровідності та гальваномагнітних властивостей при низьких температурах.

У третьому розділі «Транспортні властивості систем на основі вуглецевих нанотрубок: квантові поправки до провідності» наведено результати дослідження транспортних властивостей зразків на основі чистих та легованих азотом багатостінних вуглецевих нанотрубок (підрозділ 1) та вуглецевих нанотрубок після функціоналізації (підрозділ 2). Для чистих, легованих азотом та функціоналізованих вуглецевих нанотрубок на основі температурних і магнітопольових вимірювань автором виявлено квантові поправки до провідності, які пов'язані зі слабкою локалізацією носіїв заряду та електрон-електронною взаємодією, встановлено двовимірний характер транспорту носіїв заряду та визначені температурні залежності часу фазової релаксації (часу збою фази хвильової функції електрону). Встановлено, що після функціоналізації опір вуглецевих нанотрубок тільки незначно підвищується, а після легування зменшується майже у 6 разів.

У четвертому розділі «Транспортні властивості квазідвовимірних провідних систем на основі кремнію з вбудованими нанокристалітами CrSi_2 », що складається з трьох підрозділів, наведено експериментальні дані по дослідженню кінетичних властивостей систем на основі кристалів кремнію з p - і n – типами провідності з вбудованими в їх площину нанокристалітами CrSi_2 та проведено аналіз експериментальних результатів. Вперше визначені особливості в провідності цих систем: прояв провідності, що

здійснюється по квантовим ямам на дні зони провідності, та наявність при високих температурах двох каналів транспорту, пов'язаних з шаром нанокристалітів та матричним кремнієм.

Наукова новизна роботи.

В дисертаційній роботі на сучасному науковому рівні вперше проведено експериментальне дослідження транспортних властивостей в залежності від температури і величини магнітного поля провідних наносистем на основі багатостінних вуглецевих нанотрубок та кристалів кремнію з вбудованими нанокристалітами дисиліциду хрома з метою виявлення квантових ефектів у провідності та дана теоретична інтерпретація одержаних результатів.

Хочу відзначити **основні найважливіші результати роботи:**

1. В провідних системах на основі багатостінних як чистих, так і легованих азотом вуглецевих нанотрубок, а також вуглецевих нанотрубок після функціоналізації виявлено квантові інтерференційні поправки до провідності, які пов'язуються автором із слабкою локалізацією носіїв заряду та електрон-електронною взаємодією. Підтвердженням цього припущення є наявність логарифмічної залежності квантових поправок до провідності від температури в визначеному інтервалі температур, від'ємний характер магнітоопору та результати дослідження магнітопольових залежностей в області низьких температур.

2. Досліджено вплив легування азотом та функціоналізації вуглецевих нанотрубок на їх транспортні властивості. Встановлено, що введення атомів азоту призводить до значного зниження опору (майже у 6 разів), в той час як функціоналізація практично не змінює опір.

3. Експериментальне дослідження транспортних властивостей кристалів кремнію p і n -типів з вбудованими нанокристалітами CrSi_2 показало, що при низьких температурах спостерігаються дуже великі значення рухливості, лінійний гігантський за величиною магнітоопір, які при підвищенні температури різко зменшуються, а магнітоопір стає від'ємним до 85 К. При подальшому підвищенні температури магнітоопір знову стає додатним. Для інтерпретації експериментальних даних запропонована модель, згідно з якою у дні зони провідності або стелі валентної зони (в залежності від заряду нанокристалітів) утворюються квантові ями, у яких носії заряду займають квантово-розмірні стани і між якими здійснюється провідність.

4. Досліджено вплив кремнієвої матриці на транспортні властивості кристалів кремнію p - і n -типів з нанокристалітами CrSi_2 . Показано, що в області високих температур існують два канали провідності, пов'язаних з 1) шаром

нанокристалітів (між локалізованими поблизу нанокристалітів CrSi_2 станами) і 2) матричним кристалом кремнію (у дозволеній енергетичній зоні).

Достовірність наукових результатів, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій базується на використанні сучасного обладнання й сучасних методів дослідження для досягнення основних цілей роботи, на всебічному аналізі експериментальних результатів, на узгодженні між собою даних, одержаних в роботі різними методами, а також на відповідності теоретичних і експериментальних даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що проведені в роботі дослідження сприяють розумінню механізмів провідності у наносистемах - вуглецевих нанотрубках та кристалах кремнію p і n - типів з вбудованими нанокристалітами дисиліциду хрома, та визначають вплив квантових ефектів на процеси перенесення заряду і формування транспортних властивостей. Це, у свою чергу, дає вихідні дані для визначення можливості найбільш ефективного використання одержаних даних в конкретних задачах нанофізики і нанотехнологій. Безумовно, практичний інтерес має спостереження дуже високих значень рухливості носіїв заряду при низьких температурах в кристалах кремнію p - і n - типів з нанокристалітами дисиліциду хрома, а також одержані результати по впливу легування азотом та функціоналізації на транспортні властивості вуглецевих нанотрубок.

Зауваження щодо дисертаційної роботи. Природно, що дисертаційна робота не позбавлена деяких недоліків. До них можна віднести такі:

1. Відомо, що в залежності від параметрів нанотрубки (наприклад, способу згортання) провідність може бути металічного типу або напівпровідникового. Із дисертаційної роботи не зрозуміло, до якої категорії відносяться вуглецеві нанотрубки – вихідні матеріали для дослідження у дисертаційній роботі, а також ці матеріали після легування азотом – до металів чи напівпровідників. Якщо це напівпровідники, то який тип провідності вони мають.
2. Аналізуючи експериментальні температурні та магнітопольові залежності транспортних властивостей вуглецевих нанотрубок, автор висловлює припущення, що одержані їм дані можна інтерпретувати на основі ефектів слабкої локалізації та електрон-електронної взаємодії. Було би бажано, якщо можливо, розділити внесок кожного з цих ефектів.
3. На цей час відомо, що результати легування вуглецевих нанотрубок азотом в значній мірі залежать від концентрації атомів азоту. Але в роботі дані по концентрації азоту відсутні.

4. Вимірювання температурних та магнітопольових залежностей вуглецевих нанотрубок проводилося на зразках, виготовлених методом холодного пресування. Тому потребує пояснення, в якій мірі зберігаються особливості транспортних властивостей вуглецевих нанотрубок при такому методі їх виготовлення.

5. Коли дисертант на стор. 26-27 дисертації говорить про розподіл твердих тіл на діелектрики, напівпровідники та метали, то в якості однієї з ознак він називає температурну залежність електропровідності. Але це не точно, бо характер температурної залежності у металів і вироджених напівпровідників однаковий: електропровідність падає із зростанням температури.

6. На цей час відомо, що транспортні властивості гетеро структур з квантовими точками суттєво залежать від просторового розподілу квантових точок, а також від розподілу їх за розмірами. Ці параметри системи важливі для практичних застосувань. Звичайно прагнуть до рівномірних розподілів в обох випадках. Як видно із дисертації, в гетероструктурах на основі кремнію були присутні кристаліти дисиліциду хрому двох розмірів і цей факт використовується автором для пояснення деяких особливостей транспортних властивостей. Було би бажано, щоб цей факт був прокоментований дисертантом більш детально.

7. На стор. 29 формула 1.10. записана для металів або сильно вироджених напівпровідників. В загальному випадку в чисельник треба додати фактор Холла r , величина якого визначається зонною структурою кристала.

8. Іноді зустрічаються деякі термінологічні і стилістичні помилки та описки, наприклад, на стор. 26 у формулі 1.6 не дається розшифровка значень τ та m , які зустрічаються вперше; на стор. 29 на рис. 1.2 не позначена товщина зразка d , про яку говориться у тексті; на стор. 30 треба писати не «ось», а «вісь», та деякі інші.

Однак відзначені недоліки не знижують актуальності, достовірності й оригінальності одержаних в дисертаційній роботі результатів, їхнього практичного значення, не ставлять під сумнів достовірність і обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист.

Повнота опублікованих результатів дисертації. Основні положення дисертації висвітлено у 9 наукових працях, в число яких входять 5 статей у провідних спеціалізованих фахових виданнях та 4 тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій.

