ВІДГУК

офіційного опонента на 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

Дисертаційну роботу Мірзоєва І.Г. присвячено експериментальному дослідженню провідності та гальваномагнітних властивостей наносистем на основі вуглецевих нанотрубок та на основі кремнію з вбудованими у нього нанокристалітами дисиліциду хрому, а також пошук квантових ефектів у цих наносистемах.

Актуальність теми дисертації. У фізиці твердого тіла велика увага приділяється вивченню систем зі зниженою розмірністю. Інтерес до таких об'єктів обумовлений тим, що, завдяки квантуванню енергії в напрямку малого розміру, вони мають унікальні властивості, вивчення яких сприяє подальшому розвитку фізики твердого тіла, а також створенню матеріалів, що забезпечують як нові можливості приладів та пристроїв на їх основі, так і мінімізацію розмірів та енергоспоживання нової техніки.

У низькорозмірних системах квантові ефекти грають важливу роль в процесі переносу заряду. Тому можливість практичного застосування таких систем пов'язана в значній мірі саме з їх провідністю.

Вельми перспективними низькорозмірними системами є вуглецеві нанотрубки, які поряд з високими тепло- та електропровідністю, мають високу механічну міцність, малу питому вагу, велику адсорбційну здатність та термічну стабільність.

Великий інтерес представляють також структури, що містять нульвимірні об'єкти. До них відносяться структури на основі матричного кристала кремнію зі вбудованими в його площину нанокристалітами дисиліциду хрому $CrSi_2$. Ці вбудовані нанокристаліти можуть розглядатися як наноточкі.

Вивчення транспортних властивостей зазначених об'єктів є важливим як з фундаментальної точки зору для розуміння процесів квантового транспорту носіїв заряду, так і з практичної точки зору для створення матеріалів із заданими параметрами провідності.

Дослідження, які лягли в основу роботи І.Г. Мірзоєва, виконані в рамках тематичного плану ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна НАН України за темою «Електронний транспорт в нових провідних і надпровідних системах» (ДР № 0112U002637, термін виконання 2012–2016 рр.)

Все викладене вище свідчить про **безперечну актуальність теми дисертації** І.Г. Мірзоєва.

Дисертація присвячена експериментальному дослідженню транспортних властивостей та наявності квантових ефектів у твердих тілах – низьковимірних системах на основі вуглецевих нанотрубок та на основі нанокристалитів, вбудованих у напівпровідникову матрицю, – у зв’язку з їх будовою, тож дисертаційна робота І.Г. Мірзоєва повністю відповідає спеціальності **01.04.07 – фізика твердого тіла**.

Мету роботи – експериментальне визначення транспортних властивостей та наявності квантових ефектів в наносистемах на основі кремнію зі вбудованими в нього нанокристалітами дисиліциду хрому, а також в наносистемах на основі вуглецевих нанотрубок, вплив модифікації вуглецевих нанотрубок на їх провідність – вважаю досягнутою в межах поставлених автором задач.

Обґрунтованість висновків дисертації та їх достовірність забезпечує використання в роботі фізично обґрунтованого, надійного та широко розповсюдженого чотирьохконтактного методу; інтерпретація експериментальних результати в рамках єдиної теоретичної схеми, що дозволило встановити особливості переносу заряду в цих речовинах.

Конструкція установки, вимірювальна апаратура високого класу точності, термометричні датчики та ефективні методики забезпечили **реалізацію експериментальних завдань дисертації** – встановленню

температурних залежностей провідності досліджуваних зразків у широкому інтервалі температур, вплив магнітного поля на провідність, виявленню квантових поправок до провідності та визначенню шляхів впливу на провідність.

Отримані експериментальні результати узгоджуються між собою та з відповідними літературними теоретичними та експериментальними даними інших авторів.

Всі положення та результати, як вони сформульовані автором в пункті «**наукова новизна**», є новими, вперше отриманими та описаними автором.

Найбільш важливими **новими результатами** дисертації є такі:

1. Вперше встановлено, що в двовимірних провідних системах на основі вуглецевих нанотрубок проявляються квантові поправки до провідності: слабка локалізація носіїв заряду та електрон-електронна взаємодія.

2. Визначено вплив модифікації вуглецевих нанотрубок на їх транспортні властивості. Встановлено, що опір вуглецевих нанотрубок після процесу функціоналізації зростає незначно. Допування атомами азоту знижує опір зразків приблизно в 6 разів.

3. Вперше виявлено особливості в провідності квазідвовимірних систем на основі кремнію різного типу провідності з вбудованими нанокристалітами $CrSi_2$ – появу стрибкової провідності, що реалізується в зоні провідності та існування двох каналів транспорту.

4. Виявлено особливості в поведінці магнітоопору квазідвовимірних провідних систем на основі кристала кремнію різного типу провідності з вбудованими в його площину нанокристалітів $CrSi_2$ – при низьких температурах проявляється лінійне магнітоопір, що сягає 600% при 4 Т.

5. Вперше експериментально визначено концентрацію та рухливість носіїв заряду у квазідвовимірних провідних системах на основі кристалу кремнію різного типу провідності з вбудованими в його площину

нанокристалітами дисиліциду хрому $CrSi_2$ – зокрема, рухливість при низьких температурах є дуже великою для таких неоднорідних систем.·

В цілому дисертація містить 136 сторінок, 59 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел складається з 94 найменувань.

Дисертаційна робота І.Г. Мірзоєва складається з Вступу, чотирьох розділів та Висновків.

У Вступі наведені коротка характеристика області досліджень, стан проблеми, обґрунтована актуальність теми роботи, визначена мета дослідження та методи її досягнення, надана інформація про публікації здобувача та апробації роботи.

Перший розділ містить огляд літературних даних про транспортні властивості низькорозмірних систем на основі вуглецевих нанотрубок та на основі нанокристалитів, вбудованих у напівпровідникову матрицю. Розглянуті вплив магнітного поля на провідність, ефект Холла, вплив зменшення розмірів зразків на провідність. Наведені дані про квантові поправки до провідності, пов’язані зі слабкою локалізацією носіїв заряду та їх взаємодією. В кінці розділу наведені висновки, з яких логічно витікає мета досліджень.

У другому розділі докладно описана методика та техніка вимірювання провідності, включаючи опис кріостату для інтервалу температур 1.6-300 К, особливості термометрії, вимірювання гальваномагнітних властивостей. Велика увага приділена отриманню та будові зразків.

У третьому розділі наводяться результати досліджень впливу модифікації нанотрубок на їх транспортні властивості для зразків на основі багатошарових вуглецевих нанотрубок. Зіставлені вплив допування азотом та функціоналізації на опір зразків, знайдені квантові поправки до опору.

В четвертому розділи представлені результати експериментальних досліджень транспортних властивостей квазідвовимірних провідних систем на основі кремнію зі вбудованими великими (20–40 нм) та дрібними (3 нм) нанокристалітами дисиліциду хрому $CrSi_2$. При низьких температурах

знайдений гігантський магнітоопір, запропоновано модель провідності для досліджених матеріалів.

У Висновках сформульовані основні результати роботи.

Матеріали дисертації І.Г. Мірзоєва повністю висвітлено у **5 наукових статтях** у провідних фахових виданнях України та за кордоном, вони доповідались та обговорювались на **4-х міжнародних конференціях**, опубліковані в збірниках тез цих міжнародних наукових конференцій і відомі спеціалістам в галузі фізики твердого тіла.

Дисертація написана логічно та зрозумілою науковою мовою і акуратно оформлена. Текст **автореферату** повністю та вірно викладає зміст дисертації.

Отримані результати можуть бути використані в наукових організаціях, які проводять експериментальні та теоретичні дослідження фізичних властивостей низьковимірних наноматеріалів, а також в установах,що створюють нову техніку, як на території України, так і за кордоном.

Дисертація виконана на високому науковому рівні і свідчить про високий фаховий та кваліфікаційний рівень здобувача.

Але при загальній позитивній оцінці роботи І.Г. Мірзоєва, можна зробити деякі зауваження, пов’язані з оформленням роботи, а саме:

- У Переліку умовних позначень вводиться термін «рухливість носіїв заряду», але в тексті використовується як «рухливість», так і «рухомість» (с. 25, 29, 30, 32, 107).
- На с. 26 при посиланні на рис. 1.1 вказані напівпровідники та діелектрики, але на рис. 1.1 інформації про діелектрики нема.
- Табл. 1.1: 4-й стовпчик зветься «Опір, Ом», а 5-й – «Опір, Ом·мкм$^{-1}$». Зрозуміло, що 5-й стовпчик треба назвати інакше.
- На с. 45 замість посилання на рис. 1.8 має бути посилання на рис 1.7.
- С. 87, у коментарі до рис. 3.10 написано: «максимальне абсолютне значення магнітоопору … досягає 4,7% та стає 3,5% після процесу функціоналізації...». По перше, магнітоопір вимірюється не у відсотках, а по-друге, на рис. 3.10,

попри великий розкид даних, максимальне абсолютне значення відносної зміни магнітоопору для вихідних та функціоналізованих ВНТ складає біля 5%.

- У дисертації не наведені похибки числових значень, тому, наприклад, запис $T^{-1.03}$ (с. 90) викликає здивування.
- С. 114, коментар до рис 4.15: «Від'ємний магнітоопір максимально проявляється при температурі 85 К», але на рис. 4.15 найнижча крива відноситься до 80 К.
- С. 117, «Як видно з рис. 4.18, для зразка В також спостерігається немонотонний хід кривих…» – на рис. 4.18 зображені температурні залежності опору, які є монотонними, немонотонною є зміна енергії активації з температурою.
- В тексті дисертаційної роботи є також друкарські помилки.

Зазначені вище зауваження не мають принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Науковий рівень дисертації є високим, отримані результати не викликають сумнівів щодо їх достовірності, а висновки дисертації є обґрунтованими.

Таким чином, дисертація І.Г. Мірзоєва є **завершеною науковою працею**, в якій отримано нові достовірні результати які у сукупності **вносять вагомий вклад** у розвиток фізики твердого тіла

Наукова значущість дисертації полягає у тому, що експериментально встановлені транспортні характеристики та знайдені квантові ефекти у наносистемах на основі вуглецевих нанотрубок та на основі кремнію з вбудованими у нього нанокристалітами дисиліциду хрому.

Практична значущість роботи полягає у тому, що вказані засоби впливу на провідність цих перспективних низькорозмірних систем.

На основі викладеного вище вважаю, що дисертаційна робота І.Г. Мірзоєва «Транспортні властивості провідних наносистем: прояв квантових ефектів» є оригінальним науковим дослідженням та відповідає всім вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам

9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, І.Г. Мірзоєв, безумовно заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник
кафедри фізики низьких температур
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна,
канд. фіз.-мат. наук, ст. н. сп. **Г.Я. Хаджай**

Підпис пр. наук. сп. Хаджая Г.Я. засвідчую
Вчений секретар Харківського національного
університету імені В.Н.Каразіна **Н.А.Вінникова**