

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Мироненко Ірини Вікторівни

«Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах»

яка подається на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірантка Мироненко Ірина Вікторівна виконала у повному обсязі Індивідуальний план Освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Вона успішно склала сім заліків та один екзамен з наступних дисциплін:

Заліки:

- 1) «Філософські засади та методологія наукових досліджень» – 99 балів;
- 2) «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» – 100 балів;
- 3) «Планування, організація і проведення наукових досліджень та навчальних занять» – 96 бали;
- 4) «Історія та методологія фізики та астрономії» – 96 балів;
- 5) «Методологія застосування сучасних інформаційних технологій для автоматизації наукових та навчальних експериментів» – 92 балів;
- 6) «Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур» – 95 балів;
- 7) «Вибрані розділи сучасної теоретичної фізики» – 92 бал.

Екзамен:

- 8) Іноземна мова для аспірантів (англійська мова) – 80 бали.

Всі заплановані види робіт було виконано своєчасно. Здобувачка плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Останні роки характеризуються зростанням уваги до особливостей фізичних процесів у системах, які мають субмікронні розміри, що насамперед пов'язано з потребою зменшувати розміри електронних приладів та пристроїв. Теплопередача на нанорозмірах може істотно відрізнитися від теплообміну на макро- та мікромасштабах. Коли характерні масштаби довжини пристрою або структури стають порівнянними з середнім вільним пробігом і довжиною хвилі теплоносіїв (електронів, фотонів, фононів і молекул) або час, що має той самий порядок, що й час релаксації теплоносія, класичні закони більше не діють, і важливими стають розмірні ефекти.

З проблемою тепловідводу стикаються в наноелектроніці, де металеві або напівпровідникові шари використовують як елементи польових транзисторів. Генеруючі спінові струми, які впливають на теплопереніс у шаруватих наноструктурах, що містять шар феромагнітного діелектрика, відіграють важливу роль в області спин-калоритроніки,

що активно розвивається в останні роки. Загальновідомими прикладами є неспроможність закону Фур'є $Q = -k\nabla T$, який зв'язує потік тепла з градієнтом температури, передбачити теплопровідність композитних наноструктур, де довжина вільного пробігу фононів більше або дорівнює порядку товщин шарів і відбиття фононів від границь контактуючих матеріалів, що істотно впливає на теплопереніс. Хоча останнім часом у цій галузі було багато зроблено, все ще існує нагальна потреба у глибшому вивченні теплових явищ у наноструктурах. Зазвичай існує два типи проблем. Одним з них є управління теплом, що виділяється в нанорозмірних пристроях, для підтримки функціональності та надійності цих пристроїв. Прикладами є проблеми з нагріванням інтегральних схем і напівпровідникових лазерів. Інший полягає у використанні наноструктур для управління потоком тепла та перетворення енергії. Приклади включають наноструктури для термоелектричного та термоелектронного перетворення енергії, для зберігання даних і для нанодіагностики. Як наслідок, для опису потоків тепла в наноструктурах потрібен мікроскопічний підхід.

Стан розробки тематики та пропозиції щодо подальших досліджень.

Раніше теоретичний опис поперечної теплопровідності шаруватих структур проводився в основному в термінах фононої інтенсивності, тобто потоку енергії фононів у заданому напрямку. Такий опис звичайно супроводжувався неконтрольованим припущенням, що всі фононні моди мають один той самий час релаксації. Слід, однак, зауважити, що саме для тонких шарів наближення часу релаксації (τ -наближення) із залежною від температури рівноважною функцією розподілу не є обґрунтованим, тому що фононну температуру шару не можна коректно ввести, якщо товщина шару менше або порядку довжини вільного пробігу фононів.

Таким чином, для аналізу процесів переносу тепла в наноструктурах потрібен послідовний кінетичний підхід, що не спирається на концепцію фононої температури й на τ -наближення. У рамках такого підходу може бути розглянутий тепловідвід від металевих плівок, що лежать на діелектричних підкладках і поперечний переніс тепла через металеві (напівпровідникові) шари, розташовані між діелектриками. Аналіз поперечної теплопровідності шаруватої гетероструктури може бути заснований на кінетичному рівнянні Больцмана для фононої функції розподілу в припущенні, що електрони в плівці термалізовані внаслідок електрон-електронних зіткнень. Оскільки переніс тепла через границю "метал-діелектрик" здійснюється фононами, в аналізі важливу роль відіграють граничні умови для функції розподілу фононів. Ці умови повинні враховувати як відбиття фононів від границь шару, так і обмін фононами між металом і діелектриком. Температура середовища вважається досить низькою, щоб, по-перше, електрони можна було розглядати як термалізовані, по-друге, знехтувати зіткненнями фононів з дефектами решітки і з іншими фононами і, по-третє, знехтувати процесами перекидання при електрон-фононних зіткненнях. В стаціонарному режимі такий підхід до опису процесів переносу тепла був розвинений в статтях при аналізі енергетичної релаксації в $I_1/N/I_2$ структурах. У цих статтях, не враховано градієнт електронної температури і не знайдено ефективний коефіцієнт поперечної теплопровідності. Такий коефіцієнт можна обчислити у рамках послідовного кінетичного підходу, що не спирається на уявлення про фононну температуру і на τ -наближення. Для цього треба розглянути поперечний переніс тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками, що мають температури T_H і T_B , причому $T_H > T_B$. Разом з тим, оскільки пристрої наноелектроніки працюють насамперед

у нестационарних режимах, необхідно поширити кінетичну теорію на випадок нестационарних зовнішніх умов.

Протягом останніх років велику увагу привернула спінова калоритроніка, яка вивчає взаємодію між спіновими та тепловими струмами в магнітних матеріалах. Нещодавні відкриття, пов'язані з термічною спіною інжекцією за допомогою спінового ефекту Зеебека, який може створювати густини спінового струму, які на два порядки більші, ніж ті, що створюються за допомогою електронних або резонансних підходів збудження. Наприклад, у контексті додатків перетворення енергії термічний спіновий транспорт забезпечує концептуально нові механізми для твердотільного перетворення теплової енергії на електричну, яка може бути використана для рекуперації відпрацьованого тепла та контролю температури. Крім того, виникла галузь магноної спінтроники, що займається структурами, пристроями та схемами, які використовують спінові струми, що переносяться магнонами, кванти спінових хвиль. Подібно до звичайних електричних струмів, струми на основі магنونів можуть використовуватися для перенесення, транспортування і обробки інформації як альтернатива спінтронним пристроям, керованим зарядовим струмом. Нещодавно для реалізації ефективних логічних пристроїв було запропоновано чисті магноні спінові струми в ізоляційних феромагнетиках, що відрізняються відсутністю джоулевого нагрівання та зменшеним затуханням спінової хвилі. У той же час спінові хвилі можуть переносити тепло так само, як збудження ґратки (фонони) переносять тепло через збурення положень атомів. Перенесення тепла магнонами та їх релаксація на фононах стає особливо важливим у таких ізоляційних магнітних матеріалах, як, наприклад, $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), на відміну від металевих феромагнетиків, у теплопровідності яких переважають електрони провідності.

Метою дисертації є дослідження мікроскопічної теорії процесів поперечного переносу фононів і магنونів у шаруватих гетерогенних наноструктурах і застосування отриманих в дисертації результатів для аналізу експериментальних досліджень кінетики багат шарових систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

- 1) Розглянути на основі мікроскопічної теорії поперечне перенесення потоку тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками за низьких температур, коли електрони в металевому шарі термалізовані.
- 2) Обчислити ефективну поперечну теплопровідність у шаруватій гетероструктурі діелектрик-метал-діелектрик при довільному значенні товщини металевого шару.
- 3) Знайти товщини, при яких у теплопровідності шаруватих наноструктур проявляється розмірний ефект.
- 4) Розрахувати поперечну ефективну теплопровідність в рамках феноменологічної двотемпературної (2TM) моделі, тобто в термінах електронної та фононої температур та порівняти її з отриманими на основі мікроскопічної моделі.
- 5) Мікроскопічну теорію переносу енергії в багат шарових наноструктурах поширити на структури, що містять шар феромагнітного ізолятора при низьких температурах, коли магнони в шарі феромагнітного ізолятора термалізовані внаслідок магнон-магнонних зіткнень і мають температуру магنونів.
- 6) Розрахувати ефективну поперечну теплопровідність шаруватої системи ізолятор-феромагнітний ізолятор з довільною товщиною шару феромагнітного ізолятора.

- 7) Знайти товщину, при якій розмірний ефект проявляється в теплопровідності, порівняти отримані у роботі результати ефективної поперечної теплопровідності двотемпературного наближення з мікроскопічною моделлю.
- 8) Розглянути перенесення тепла в системі металевих шарів, розділених діелектричними прошарками при низьких температурах та умові термалізації електронної підсистеми в металевих шарах.
- 9) Отримати аналітичний вираз для ефективної теплопровідності структур з довільною кількістю шарів, а також для надграток.
- 10) Проаналізували розмірний ефект теплопровідності для випадків тонких і товстих шарів металу в системі металевих шарів, розділених діелектричними прошарками.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є наноматеріали та гетерогенні наноструктури.

Предметом дослідження є фізичні процеси перенесення тепла через гетерогенні наноструктури.

Методи дослідження. У дисертації для теоретичного розрахунку ефективної теплопровідності у наноструктурах використовується кінетичне рівняння Больцмана, а також числові методи комп'ютерної математики та методи фізичного моделювання.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною НДР та гранту:

- 1) «Теоретичні та експериментальні дослідження роботи квантових лічильників окремих рентгенівських фотонів на базі високотемпературних надпровідників», № державної реєстрації 0118U002037, 29.03.2018 – 31.12.2020.
- 2) «Магнітика, взаємодії та комплексність: багатofункціональні аспекти спіньхвильової динаміки» (MagIC – Magnonics, Interactions and Complexity: a multifunctional aspects of spin wave dynamics), № 644348 гранту програма Європейського Союзу Horizon 2020 (дослідницька та інноваційна програма Марії Склодовської-Кюрі), 2017 –2019.

4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.

Особистий внесок дисертантки в отриманні наукових результатів та їх новизна полягає в наступному:

Вперше:

- 1) Отримано рівняння для фононного поперечного теплового потоку в шаруватих структурах з урахуванням відбиття та заломлення акустичних хвиль на міжшарових межах.
- 2) На мікроскопічному рівні розраховано ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктур «діелектрик-метал-діелектрик», важливу для плазмоніки, яка слідує тенденції мініатюризації оптичних пристроїв і знаходить застосування в датчиках, мікроскопії, оптичному зв'язку та біофотоніці.

- 3) Проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих нанострукту для випадків тонких і товстих шарів металу.
- 4) На мікроскопічному рівні розраховано ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «ізолятор-феромагнітний ізолятор-ізолятор». Отримані результати теплопередачі відіграють важливу роль в галузі спінової калоритроніки.
- 5) Проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих нанострукту для випадків тонких і товстих шарів феромагнітного ізолятора.
- 6) Обчислено ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «метал-діелектрик-метал» з довільною кількістю шарів.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації Мироненко І.В. забезпечена коректним застосуванням методів кінетичного аналізу процесів перенесення фононів і магнонів у гетерогенних наноструктурах, а також ретельним співставленням одержаних результатів із першоджерел наукової літератури. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в науковому журналі індексованому наукометричною базою Scopus (Q1, Q3) та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Результати проведеного здобувачкою аналітичного аналізу поперечного перенесення тепла в гетерогенних наноструктурах, а саме знаходження ефективної теплопровідності шаруватих структур, особливо важливі для розв'язання проблеми тепловідводу у наноелектроніці. Залежність поперечної теплопровідності шаруватих структур від товщини шару значно зростає із зниженням температури, тому при аналізі експериментальних результатів для низьких температур необхідно враховувати розмірний ефект. Отримані результати є актуальними для аналізу гібридних наноструктур та розробки спінових калоритронних пристроїв на основі магнонів.

Результати досліджень Мироненко І.В. можуть бути впроваджені в освітні навчальні програми дисципліни «Введення в основи спінтроніки» на кафедрі фізики низьких температур фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Результати дисертації опубліковані у 3 наукових працях, серед яких 2 статті в закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та 1 теза доповіді на міжнародній науковій конференції.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Список публікацій здобувача за темою дисертації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus:

- 1) A. I. Bezuglyj, V. A. Shkovskij, R. V. Vovk, and **I. V. Mironenko**, Microscopic analysis of heat transfer in $I_1/N/I_2$ heterogeneous nanostructures at low temperatures. *Low Temperature Physics* 45, 537 (2019). DOI.org/10.1063/1.5097364, (**Scopus, Q3**)
(*Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, а також її розв'язання, технічне оформлення тексту роботи*)
- 2) V.A. Shklovskij, A.I. Bezuglyj, **I.V. Mironenko**, Heat transport in $I_1/FI/I_2$ heterogeneous nanostructures at low temperatures / *Phys. Rev. B* 103, 024440 – Published 25 January 2021. DOI.org/10.1103/PhysRevB.103.024440 (**Scopus, Q1**).
(*Особистий внесок здобувача: участь у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проведенні теоретичних розрахунків, технічне оформлення тексту роботи*)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

- 3) I.В.Мироненко, В.О.Шкловський, О.І.Безуглий, Р.В.Вовк, Мікроскопічний аналіз перенесення тепла в $I_1/N/I_2$ гетерогенних наноструктурах при низьких температурах, *Фізичні явища в твердих тілах* : матеріали XIV міжнародної наукової конференції (3-5 груд. 2019 р. Харків). Харків : ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2019. С. 23.
(*Особистий внесок здобувача: участь у постановці та обговоренні задачі, а також її розв'язання, підготовлення матеріалів для конференції*)

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

8. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати досліджень були представлені, обговорені і опубліковані в тезах доповіді в міжнародній науковій конференції: *Фізичні явища в твердих тілах*: XIV міжнародна наукова конференція (3-5 груд. 2019 р. Харків).

9. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувачки, наукових праць здобувачки та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет системі StrikePlagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10. Оцінка мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступний для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету

Міністрів України від 21.03.2022 року № 341), Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 року № 759).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магنونів в гетерогенних наноструктурах» відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія. Здобувачкою повністю виконана освітня та наукова складові освітньо-наукового рівня вищої освіти.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувачка представила основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри фізики низьких температур Фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 1 від 24 жовтня 2023 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення.

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове і практичне значення, на розширеному засіданні кафедри було одностайно ухвалене рішення про рекомендацію дисертації Мироненко І.В. «Кінетика процесів перенесення фононів і магنونів в гетерогенних наноструктурах» до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія з галузі знань 10 – Природничі науки.

В.о. завідувача кафедри
фізики низьких температур
фізичного факультету
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна,
доктор фізико-математичних наук, професор



Валерій ШКЛОВСЬКИЙ