

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Юрію Бойко  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## Відгук

офіційного опонента, провідного наукового співробітника Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ), доктора фізико-математичних наук, професора Ковалевського Михайла Юрійовича на дисертаційну роботу Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки)

### Актуальність теми дослідження

Перенесення тепла через шаруваті гетероструктури - це важливий динамічний процес у багаточасткових системах. Наше розуміння особливостей цих процесів, розвиток уявлень та методів їх фізичного опису є актуальними у фізиці конденсованих станів та суттєво впливає на темпи розвитку таких галузей промисловості, як електроніка, енергетика та відіграє ключову роль у праці різних пристроїв і технологій. В електронних пристроях, таких як транзистори і інтегральні схеми, тепло може передаватися електронами через границі між шарами гетероструктури. Це може призвести до перегріву, який веде до втрати продуктивності і зниженні довговічності пристроїв. Тому контроль цього процесу є дуже важливим.

Дисертація присвячена кінетичному аналізу поперечного перенесення тепла в різних гетерогенних наноструктурах. В дисертації автором зазначено, що закон Фур'є, який встановлює відношення між потоком тепла та градієнтом температури, не може бути безпосередньо застосований для аналізу теплоперенесення в багатошарових наноструктурах. Це пов'язано з тим, що в наноструктурах довжина вільного пробігу фононів може бути порівнянна або навіть більша за товщину шарів, що складають структуру. Крім того, умови на межах між різними матеріалами можуть суттєво впливати на процес теплоперенесення. Тому для опису потоків тепла в наноструктурах потрібен більш детальний, мікроскопічний підхід, який би враховував ці особливості. Такий підхід дозволить краще зрозуміти, як впливають міжшарові межі на теплопровідність багатошарової гетероструктури і, як результат, допоможе оптимізувати процеси теплоперенесення в таких системах. Фононна функція розподілу в рівнянні Больцмана допомагає описати, як фонони (квазічастинки, що переносять теплову енергію) розподіляються в гетероструктурі. Це важливо, оскільки фонони відіграють ключову роль у процесі теплоперенесення в багатошарових гетероструктурах. Однак, використання рівняння Больцмана для аналізу теплопровідності в багатошарових наноструктурах може бути складним через вплив міжшарових меж на теплопровідність. Тому для аналізу таких систем може бути потрібен більш детальний, мікроскопічний підхід.

## Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики низьких температур фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань та одного Додатку. У вступі наведено обґрунтування вибору теми дослідження, означено мету та поставлено завдання для її досягнення, об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача при виконанні дослідження, наведено перелік наукових публікацій за темою дослідження та дані щодо апробації матеріалів дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами тощо.

У першому розділі розглянуто випромінювання фононів з металевих плівок, що нагріваються струмом за низьких температур. Теоретичний розгляд цих задач проведено з використанням кінетичних рівнянь для фононної та електронної функцій розподілу. У більшості випадків розглянуто зв'язок між теоретичними результатами та існуючою експериментальною ситуацією. Виконано також огляд результатів робіт, де теоретично досліджено нелінійну релаксацію між магнонами та фононами в ізоляційному феромагнетикі. Магнони і фонони описувалися рівноважними розподілами Бозе-Ейнштейна з різними температурами. Підкреслено, що нелінійний тепловий потік від магнонів до фононів розраховано мікроскопічно в термінах черенковського випромінювання фононів магнонами.

У другому розділі дисертації здобувачка описує об'єкти та методи дослідження переносу тепла в гетерогенних наноструктурах. Розглянуто класифікація наноструктур, особливості перенесення тепла в наноструктурах. Представлені деякі з основних методів та підходів до дослідження теплопередачі в наноматеріалах. Також представлено рівняння теплопровідності Больцмана та його використання Пайерлсом у 1929 році для опису фононів у твердих тілах.

У третьому розділі здобувачкою представлені результати дослідження наногетероструктури яка складається з металевого шару, розташованого між двома масивними діелектриками за низьких температур. Для даної структури представлено обчислення ефективної поперечної теплопровідності при довільному значенні товщини металевого шару. Здобувачкою розраховано товщини, при яких у теплопровідності проявляється розмірний ефект. При порівнянні отриманих результатів показано, що відносно просте двотемпературне наближення коректно описує кінетику теплоперенесення в багатошаровій системі тільки у разі товстих металевих шарів, коли товщина шару значно більша за фонон-електронну довжину вільного пробігу. Для більш тонких металевих шарів двотемпературне наближення дає невірний вираз для ефективної поперечної теплопровідності шаруватої структури.

У четвертому розділі розглядається поперечний теплообмін у гетероструктурах, що містять шар феромагнітного ізолятора. У мікроскопічному підході, використаному даному розділі здобувачкою, розрахунок фононного внеску в поперечну теплопровідність системи що вивчається вимагав розв'язання кінетичного рівняння. Для спрощення розрахунків теплопровідності, використовувався більш простий феноменологічний підхід тобто двотемпературне наближення, в якому фонони і магнони мають різні температури. Показано що, 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.

У п'ятому розділі мікроскопічний підхід до аналізу поперечного теплообміну в системі з двома металевими шарами. Отримано аналітичний вираз ефективної теплопровідності структур з довільною кількістю шарів, а також для надграток. Показано

що, при низьких температурах шарувата природа системи може призвести до значного зниження теплопровідності між площинами. У теплопровідності проаналізовано розмірний ефект і показано, що фононна механіка теплопровідності суттєво відрізняється для випадків товстих і тонких металевих шарів.

Висновки результати роботи дають пояснення особливостей перенесення тепла в наноструктурах і є важливою для розробки наноструктурованих матеріалів для застосувань в області термоелектрики, спінової калоритроніки, плазмоніки та інших галузях. Отримані результати підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Дисертація є завершеною науковою роботою, а її оформлення відповідає вимогам МОН.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та є складовою частиною наступних держбюджетних наукових проєкту Міністерства освіти і науки України № держреєстрації - «Теоретичні та експериментальні дослідження роботи квантових лічильників окремих рентгенівських фотонів на базі високотемпературних надпровідників.» № держреєстрації 0118U002037.

Також робота виконана за підтримки програми Європейського Союзу Horizon 2020 у рамках гранту № 644348 (дослідницька та інноваційна програма Марії Склодовської-Кюрі) До найвагоміших результатів, що містяться в дисертації, слід віднести наступні:

1. Вперше отримано рівняння для фононого поперечного теплового потоку в шаруватих структурах з урахуванням відбиття та заломлення акустичних хвиль на міжшарових межах.
2. Вперше 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. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів металу.
4. Вперше на мікроскопічному рівні розраховано ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «ізолятор-феромагнітний ізолятор- ізолятор». Отримані результати теплопередачі відіграють важливу роль в галузі спінової калоритроніки.
5. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів феромагнітного ізолятора.
6. Вперше обчислено ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «метал-діелектрик-метал» з довільною кількістю шарів.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Мироненко І. В. Під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних і загально відомих підходів та методів обчислювальної й математичної фізики. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

Апробація та публікації

Результати дисертації опубліковані у 3 наукових працях, серед яких 2 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та 1 теза доповідей на міжнародній науковій конференції.

Оформлення дисертації

Оформлення дисертації повністю відповідає вимогам, що висуваються до такого виду робіт і наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі з чіткою подачею графічного матеріалу.

### Практичне значення отриманих результатів дисертації

Результати, які отримані в роботі, мають великий потенціал як для теоретичних, так і для експериментальних досліджень. Теоретична частина може слугувати основою для подальших досліджень, допомагаючи розширити наше розуміння процесів теплоперенесення в багатошарових гетероструктурах. Це може привести до розробки нових моделей або методів, які можуть бути використані для оптимізації цих процесів. З іншого боку, експериментальне підтвердження цих результатів є важливим кроком, який дозволяє перевірити достовірність теоретичних моделей та їхню придатність для реальних систем. Це також може допомогти виявити нові феномени або властивості, які можуть бути використані для покращення ефективності та надійності електронних пристроїв.

### Дотримання академічної доброчесності

Під час аналізу дисертаційної роботи, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагиатній інтернет-системі [Strikeplagiarism.com](http://Strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

### Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Дисертація оформлена відповідно наказу №40 МОН України від 12.01.2017 року. Мета наукової роботи досягнута. Завдання виконані у повному обсязі. Принципових і суттєвих зауважень до роботи не виникло, всі розділи оцінені позитивно.

Слідуючи стопами класиків (Р.Фейнман) хочу відзначити, що хороша робота викликає низку нових питань, які формують подальший розвиток цієї галузі науки. Мені здається, що наведені нижче питання та побажання можуть послужити подальшим напрямкам досліджень. У межах наукової дискусії хотілось б поставити наступні запитання:

1. Обчислення ефективного коефіцієнта теплопровідності показало його залежність від розмірного параметра фізичної системи (товщини шару) та використало декартову систему координат. Чи проводились Вами аналогічні обчислення в іншій (сферичній чи циліндричній) системі координат? Це було б цікаво під час аналізу аналогічних явищ теплопередачі для квантових точок чи дроту.

2. В аналізі процесів теплопередачі ключову роль відіграють фонони і магнони, які не мають галілеєво-інваріантного гамільтоніану. Який вплив на отримані результати матиме облік довільного закону дисперсії цих квазічастинок?

### Загальні висновки щодо дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Мироненко Ірини Вік параметра фізической системы торівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» є завершеним науковим дослідженням, є актуальною та має наукову новизну і практичну значущість. Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 104 – «Фізика та астрономія» галузі знань 10 – Природничі науки», вимогам згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. № 44). Враховуючи актуальність, обґрунтованість наукових положень і висновків, наукову новизну та практичну значущість дисертаційної роботи, а також дотримання академічної доброчесності, що підтверджено відповідними документами, вважаю, що Мироненко Ірина Вікторівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Доктор фізико-математичних наук,  
професор, провідний науковий співробітник  
Інституту теоретичної фізики імені О.І.Ахієзера  
Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут»

Михайло КОВАЛЕВСЬКИЙ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 12:27:18 04.01.2024

Назва файлу з підписом: Голові разової-1з.підписом.pdf  
Розмір файлу з підписом: 138.8 КБ

Назва файлу без підпису: Голові разової-1з.підписом.pdf  
Розмір файлу без підпису: 120.7 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Ковалевський Михайло Юрійович

П.І.Б.: Ковалевський Михайло Юрійович

Країна: Україна

РНОКПП: 1889200879

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 12:08:08  
04.01.2024

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Серійний номер: 382367105294AF9704000000705BE200985ED001

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Серійний номер носія особистого ключа: Не визначено

Алгоритм підпису: ДСТУ-4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Голові разової спеціалізованої  
вченої ради Харківського  
національного університету  
імені В. Н. Каразіна  
професору Юрію Бойку  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

### Відгук

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, провідного наукового співробітника відділу теоретичної фізики ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України, професора Ковальова Олександра Семеновича на дисертаційну роботу Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів та магнонів в гетерогенних наноструктурах», на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 «Природничі науки».

**Обґрунтування теми дослідження.** Дисертаційна робота І.В.Мироненко присвячена теоретичному дослідженню процесів теплоперенесення у складних гетерогенних системах, що включають елементи діелектриків, металів та магнетиків, як підсистеми. Такими системами традиційно є композитні матеріали (в тому числі шаруваті), які широко використовуються в сучасних технологіях. Останнім часом новим об'єктом теоретичних та експериментальних досліджень, а також технологічних застосувань у мікроелектроніці стали складні наносистеми спинтроніки, магноніки та фононіки, які використовуються у обчислювальній техніці та системах інформатики. У зв'язку з мініатюризацією цих пристроїв важливими проблемами стають енергоспоживання, теплоізоляція, відведення та поширення тепла в них. Таким чином, **тема дисертаційної роботи І.В.Мироненко є, безперечно, актуальною.** Питання про теплопровідність діелектриків, металів та магнетиків є традиційним для фізичної кінетики та досить добре вивчено для просторово необмежених середовищ. Додаткові проблеми виникають при врахуванні поширення тепла через межі середовищ, пов'язані з так званим температурним стрибком Капіци. Проекція цих задач на дослідження наноструктур, в яких області, що контактують, можуть мати нанорозміри, представляється важливим, цікавим і актуальним напрямом нових теоретичних досліджень. Особливістю таких гетероструктур є те, що в них довжини вільних пробігів частинок і квазічастинок, відповідальних за

теплоперенесення, можуть бути порівнянними з розмірами однорідних областей, і температура рівноваги між окремими складовими може не виникати.

Дисертація представляє єдине ціле та поставлені в дисертації завдання об'єднані загальною тематикою – перенесенням тепла носіями, що взаємодіють, через вузькі шари, обмежені ідеальними інтерфейсами, і зальною моделлю теоретичного розглядання проблеми. Як переносники тепла виступають електрони, магнони та фонони. Розмаїтість завдань пов'язана з тим, що розглянуті переносники тепла мають різні спектри: звуковий у фононів і квадратичний у електронів і ферромагнітних магنونів. Крім того, в той час як кількість електронів зберігається, число фононів і магنونів не зберігається. Ці обставини призводять до специфіки результатів в різних випадках.

Перші два розділи дисертації є вступними, але корисними під час читання роботи. Основні результати містяться у розділах 3,4 та 5.

**Дисертантом отримані такі нові результати:** Найважливішим мені видається розділ 3, в якому проблема сформульована для проходження тепла через плоский шар металу між напівпросторами діелектрика. Використаний аналіз, заснований на кінетичному рівнянні Больцмана для фононів та ряду припущень: встановлення рівності температур електронів та фононів на відстанях порядку довжини пробігу фононів  $l_{ep}$  поблизу меж розподілу середовищ, низьких температурах порівняно з Дебаєвською. Кінцеві аналітичні результати отримані за певних співвідношеннях товщин плівок і цієї довжини пробігу. Основним результатом є знаходження залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності шара від його товщини  $d$ , теплопровідностей електронної та фононної підсистем і теплової прозорості меж розподілу у випадках  $d \ll l_{ep}$  і  $d \gg l_{ep}$ . Важливим виявилось те, що ефективний коефіцієнт теплопровідності зводиться до суми теплопровідностей електронів і фононів  $k_{eff} \approx k_e + k_{ph}$  і не залежить від товщини тільки для товстих шарів з  $d \gg L$ , де  $L$ -характерна довжина, що залежить від характеристик середовища прошарку і границь, а також температури. При малих товщинах шару ефективний коефіцієнт теплопровідності залежить лише від прозорості кордону та лінійно від товщини. Отримані результати порівняні з даними у двотемпературними підході та вказано на подібність і відмінність у двох підходах.

Всі обчислення розділу 4, в якому досліджено теплопередачу через шар ферродіелектрика схожі з розрахунками розділу 3, проте дослідження цієї проблеми важливе з точки зору можливості застосування результатів щодо елементів спінтроніки: магнітопроводів, магнітних перемикачів, спінових транзисторів. Це ще раз підкреслює, що отримані в дисертації результати та розвинуті методи мають практичне значення. Хоча спектр магنونів (без урахування магнітної анізотропії) квадратичний по імпульсах, як і спектр вільних електронів, але специфікою розглянутої задачі є те, що на відміну від металів із збереженням числа електронів у магнетіку число квазічастинок (магنونів) не фіксовано, як і число фононів. Це призводить до того, що довжина пробігу між магنون-фононними зіткненнями стає



залежною від температури та координати у шарі магнетика. Хоча обчислення дещо ускладнюються, але кінцеві результати цього дослідження зберігаються з точністю до заміни коефіцієнта електронної теплопровідності на коефіцієнт теплопровідності магніонів. Зазначимо, що в деяких випадках магніонна теплопровідність може суттєво перебільшувати фононну.

Матеріал розділу 5 безпосередньо пов'язаний з проблемами, розглянутими в розділі 3. Дослідження теплопровідності через металевий шар узагальнюється на випадок багатошарника, що містить періодичну структуру металевих та діелектричних шарів. Таку систему можна розглядати як шар композитного матеріалу з різними тепловими властивостями окремих компонентів. Незвичайним і дуже цікавим результатом виявилось те, що ефективний коефіцієнт теплопровідності зовсім не зв'язаний до середньої теплопровідності окремих елементів при врахуванні їх концентрації, що стало наслідком істотного впливу внутрішніх кордонів між різними середовищами. Для тонких металевих прошарків результат визначається лише прозорістю кордонів та практично збігається з отриманим для ізольованого шару. У цьому випадку результат визначає ефективну константу у формулі Літтла при розгляданні багатошаровика як одного ефективного шару. При товстих металевих прошарках прозорість кордонів знижує ефективний коефіцієнт теплопровідності  $k_{eff} \approx (k_e + k_{ph})/c_m$ , де  $c_m$  – концентрація металевої складової.

Таким чином, в дисертації отримана низка результатів, важливих не тільки для експериментів в галузі теплофізики і прикладань в сучасних нанотехнологіях, але і маючих фундаментальне теоретичне значення. **Наукова обґрунтованість отриманих результатів** і їхня достовірність забезпечується використанням відомих добре апробованих методів та моделей теоретичної фізики і порівнянням даних різних підходів к проблемі в різних моделях. Робота виконана на високому теоретичному рівні.

**Практичне значення результатів дослідження** пов'язана з можливістю їх використання при експериментальних дослідженнях процесів теплопереносу в наносистемах зі складною структурою і в гетеросполуках. Можливо їх використання і при розробці нових елементів сучасної мікроелектроніки.

Робота виконана в Харківському національному університеті ім. В.Н.Каразіна і її результати доцільно довести до науковців в галузі теоретичної фізики в ХФТІ НАН України, ФТІНТ НАН України, ІРЕ НАН України та інших. **Матеріали дисертації повністю опубліковані** у провідних фізичних журналах та відповідають текстам опублікованих статей.

Правильність використаних моделей та методів розрахунків, а також отриманих результатів не викликає сумнівів. Також здебільшого автор наводить фізичну інтерпретацію цих результатів. Тим не менш, я маю деякі **зауваження до матеріалу дисертації**. Вони здебільшого стосуються повноти дослідження та обговорення отриманих остаточних результатів.

У розділі 3 отримані громіздкі формули обговорюються в межах товстих та тонких металевих плівок. При цьому граничні випадки описуються нерівностями  $d \gg l_{ep}$  та  $d \ll l_{ep}$ . Разом з тим з формул для ефективної теплопровідності шару випливає, що отримана залежність від товщини плівки істотно змінюється при товщинах  $d \sim L \sim kR$ , де  $k$  – коефіцієнт сумарної теплопровідності середовища, а  $R$  – «прозорість» межі, пов'язана зі стрибком Капиці. Видно, що дві характеристики ( $L$  і  $l_{ep}$ ) різні: одна пов'язані з межами розділу, а друга – ні. Яка з двох характеристик є критичною для зміни режиму теплопровідності? Це у дисертації не обговорюється. Немає ні порівняння цих характеристик, ні самого виду  $L$ . (На мою думку,  $L \sim l_i(E_e/T)(E_{ph}/T)(m/M)/\langle\alpha\rangle$ , де  $E_e$  і  $E_{ph}$  – характерні енергії електронів і фононів). Хоча результат (3.29) наведено для великих товщин  $d$ , але його асимптотику при малих  $d$  цікаво порівняти з результатами при малих товщинах (3.33). Вони відрізняються лише чисельним коефіцієнтом, що залежить від ймовірності проходження.

Крім цього, не повністю досліджена теплопровідність тонких плівок. Відповідно до (3.33) вона зменшується до нуля при  $d \rightarrow 0$ . Однак очевидно, що при цьому ми приходимо до контакту двох діелектриків і маємо отримувати формулу Літтла. У роботі не наведено порівняння цих результатів, з яких можна знайти ефективну товщину шару між діелектриками у результаті Літтла. Крім того, виникає питання про оцінку справедливості формули (3.33) при зменшенні товщини: на яких розмірах знизу вона втрачає сенс. Це атомний розмір чи ефективна величина  $L_0 \sim l_{ep}$ ?

Дослідження, проведені в розділі 4 багато в чому повторюють розрахунки для теплопровідності металевої плівки при заміні її шаром феродіелектрика. При цьому остаточні формули або не змінюються для тонких плівок або змінюються для товстих шарів тільки із заміною електронної теплопровідності на теплопровідність магнонів. Але при цьому, на відміну від розділу 3, вираз для магнонної теплопровідності взагалі не наводиться, хоча вона добре відома (див. «Спинові хвилі» АБП) і в деяких випадках може суттєво перевищувати фононну. Порівняння цих вкладів у загальну теплопровідність не наведено.

Крім того, автор підкреслює, що на відміну від електронів, щільність магнонів не фіксована і тому довжина пробігу фононів при зіткненні з магнонами залежить від координати по товщині плівки. Це ускладнює формули, що видно з розрахунків. Проте остаточний результат цього факт не відбиває. Очевидно, має бути якась слабка додаткова залежність від товщини  $d$  остаточної формулі. Оскільки її немає, то треба було пояснити цей факт або малою величиною ефекту із зазначенням малого параметра або відсутності самого впливу зазначеної залежності.

У розділі 5 основний, мій погляд, результат полягає у отриманні формули (5.39), але вона теж не повно досліджена, попри свою простоту. Як я вказував, результати дисертації можуть бути використані не тільки для опису теплопровідності у пристроях наноелектроніки, але й при дослідженні теплопередачі в композитних (зокрема, гранульованих) середовищах, що моделюються багат шаровими в роботі.

При цьому ефективний коефіцієнт теплопровідності має виражатися у термінах концентрацій компонентів. Легко бачити, що результат автора має

вигляд  $k_{eff} = k_T / (C_m + k_T R / h)$ , де  $h$  – розмір комірки та  $C_m$  – концентрація металевої «фази». Ця формула зі зменшенням теплопровідності з концентрацією металу зовсім відрізняється від «наївної» формули, яка не враховує меж і не залежить від  $h$  та зростає з концентрацією металу  $k_{eff}(C_m)$ . Цей аспект результатів не обговорюється.

Перелічені зауваження не впливають істотно на отримані результати, не знижують високий рівень дисертації і високу оцінку мною роботи. Основна частина дисертації добре структурована і викладена відповідною науковою мовою. Матеріали надрукованих автором робіт добре узгоджені і скомпановані в тексті дисертації. У висновках чітко означений **особовий внесок здобувача** в розв'язанні проблеми, що полягає в аналізі теоретичних і експериментальних результатів, опублікованих раніше, проведенні теоретичних розрахунків, участі в обговоренні сенсу отриманих результатів, а також у підготовці публікацій за темою дисертації. Дисертація І.В.Мироненко є закінченою науковою роботою, в якій отримана низка нових науково-обґрунтованих результатів в теорії теплопровідності твердих тіл.

Актуальність дослідженої теми, новизна та наукова значимість результатів, достовірність і обґрунтованість висновків дозволяють стверджувати, що дисертаційна робота «Кінетика процесів перенесення фононів та магнонів в гетерогенних наноструктурах» повністю задовольняє вимогам, що ставляться до дисертацій доктора філософії МОН України, а її автор, Мироненко Ірини Вікторівни, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

**Оформлення дисертації** повністю відповідає вимогам, що висуваються до таких робіт і наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі.

**Загальні висновки.** Дисертаційна робота Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів та магнонів в гетерогенних наноструктурах» є завершеним науковим дослідженням в галузі теоретичної фізики твердого тіла, актуальним за розглянутими науковими проблемами, має наукову новизну і важлива для практичних прикладань. Тема і матеріал дисертації повністю відповідають спеціальності 104 «Фізика та астрономія» галузі знань 10 «Природничі науки» та вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. No 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «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 12.01.2022 р. No 44). Враховуючи все це, вважаю, що Мироненко Ірини

Вікторівни, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,

провідний науковий співробітник

відділу теоретичної фізики

Фізико-технічного інституту

низьких температур

ім. Б.І.Веркінв НАН України,

професор

О.С.Ковальов

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:29:27 08.01.2024

Назва файлу з підписом: vidguk\_Kovalev\_Myronenko.pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 4.7 МБ

Перевірені файли:  
Назва файлу без підпису: vidguk\_Kovalev\_Myronenko.pdf  
Розмір файлу без підпису: 5.2 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: КОВАЛЬОВ ОЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ  
П.І.Б.: КОВАЛЬОВ ОЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ  
Країна: Україна  
РНОКПП: 1657400356  
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА  
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:29:26 08.01.2024  
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000056B13D01704BB404  
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145  
Тип підпису: Удосконалений  
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)  
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)  
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Юрію Бойко  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## Рецензія

офіційного рецензента, доцента кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Єзерської Олени Володимирівни на дисертаційну роботу Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки).

### 1. Обґрунтування вибору теми дослідження

Головною метою дисертаційної роботи Мироненко І.В. є теоретичний опис поперечної теплопровідності шаруватих наноструктур при використанні послідовного кінетичного підходу. Раніше теоретичний опис поперечної теплопровідності шаруватих структур проводився в основному в термінах фононної інтенсивності, тобто потоку енергії фононів у заданому напрямку. Такий опис звичайно супроводжувався неконтрольованим припущенням, що всі фононні моди мають один той самий час релаксації. Аналіз поперечної теплопровідності шаруватої гетероструктури може бути заснований на кінетичному рівнянні Больцмана для фононної функції розподілу, яке власне, й використовує здобувачка. Оскільки перенесення тепла через границю "метал-діелектрик" здійснюється фононами, в аналізі важливу роль відіграють граничні умови для функції розподілу фононів, які було встановлено в роботі. В стаціонарному режимі такий підхід до опису процесів переносу тепла був розвинений ще раніше при аналізі енергетичної релаксації в структурах ізолятор-метал-ізолятор. Градієнт електронної температури не враховувався, ефективний коефіцієнт поперечної теплопровідності не знаходився. В своїй роботі здобувачка, обчислила ефективний коефіцієнт поперечної теплопровідності при розгляді поперечного переносу тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками, що мають температури  $T_H$  і  $T_V$ , причому  $T_H > T_V$ .

### 2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг роботи складає 128 сторінок (5.2 авторських 27 аркушів), з них текст основної частини становить 101 сторінок (4.2 авторських аркушів). Робота містить 4 рисунки. Список використаних джерел містить 137 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету і основні задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, описано математичні моделі та методи, які були використані у дослідженнях і особистий внесок здобувачки.

**У першому розділі** представлено огляд літературних джерел, використаних в дослідженні, розглянуто випромінювання фононів з металевих плівок, що нагріваються струмом, за низьких температур. Досліджено зв'язок між теоретичними результатами та існуючою експериментальною ситуацією.

**У другому розділі** дисертації здобувачка описує об'єкти та методи дослідження переносу тепла в гетерогенних наноструктурах. Завдяки нещодавньому прогресу в синтезі наноматеріалів і виготовленні наноструктур, нанорозмірний теплообмін залишиться актуальним і в майбутньому, відіграючи важливу роль в інформаційних технологіях, технологіях перетворення енергії та біомедичній інженерії. Фононне рівняння переносу тепла Больцмана – це метод, здатний моделювати перенесення фононів від балістичного до дифузійного режимів, і велика кількість досліджень була зроблена для розробки чисельних методів розв'язань цього рівняння.

**У третьому розділі** здобувачка представила кінетичний підхід, в рамках якого розглянуто поперечне перенесення тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками за низьких температур, коли електрони в металевому шарі термалізовані. Обчислено ефективну поперечну теплопровідність даної шаруватої системи при довільному значенні товщини металевого шару. Знайдено товщини, при яких у теплопровідності проявляється розмірний ефект. Досліджена залежність цього ефекту від температури, що потрібно враховувати при створенні електронних пристроїв, елементи яких мають субмікронні розміри. Здобувачкою було показано, що відносно просте двотемпературне наближення адекватно описує кінетику теплоперенесення в багат шаровій системі тільки у разі товстих металевих шарів, коли товщина шару значно більша за фонон-електронну довжину вільного пробігу.

**У четвертому розділі** здобувачкою розглянуто кінетичний підхід переносу тепла фононами та магнонами через шар феромагнітного ізолятора, розташованого між двома масивними ізоляторами при низьких температурах, коли магнони в шарі феромагнітного ізолятора термалізовані внаслідок магнон-магнонних зіткнень і мають температуру магнонів. Авторка розрахувала ефективну поперечну теплопровідність даної шаруватої системи з довільною товщиною шару феромагнітного ізолятора, де тепловий потік переносять як магнони, так і фонони. Знайдено товщину, при якій розмірний ефект проявляється в теплопровідності. Авторка зауважила, що при зростанні значень довжини вільного пробігу та товщини зі зниженням температури термостата, роль розмірного ефекту в поперечній теплопровідності шаруватих структур зростає зі зниженням температури.

**У п'ятому розділі** дисертанткою на основі мікроскопічної моделі було розглянуто при низьких температурах перенесення тепла в системі металевих шарів, розділених діелектричними прошраками, коли електрони в металі термалізовані, а фонони – ні. Авторкою було отримано аналітичний вираз для ефективної теплопровідності структур з довільною кількістю шарів, а також для надграток. Отримані в роботі результати дають пояснення особливостей перенесення тепла в наноструктурах і є важливими для розробки наноструктурованих матеріалів для застосувань в області термоелектрики, спінової калоритроніки, плазмоніки та інших галузях.

**Висновки** за результатами виконання дисертаційної роботи зрозуміло та коректно підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів наукових досліджень Дисертація є завершеною науковою роботою, а її оформлення відповідає вимогам МОН.

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

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних держбюджетних наукових проєктів Міністерства освіти і науки України № держреєстрації 0118U002037 (Теоретичні та експериментальні дослідження роботи квантових лічильників окремих рентгенівських фотонів на базі високотемпературних надпровідників.) Також робота виконана за підтримки програми Європейського Союзу Horizon 2020 у рамках гранту № 644348 (дослідницьката інноваційна програма Марії Склодовської-Кюрі)

### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Мироненко І. В. під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних і загально відомих підходів та методів обчислювальної й математичної фізики. Основні результати дисертації опубліковані в 3 статтях в індексованих наукових журналах та доповідалися на 1 міжнародній науковій конференції. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

### **5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна**

У роботі отримано низку нових теоретичних результатів, серед яких, на мою думку, варто відзначити такі:

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше отримано рівняння для фононного поперечного теплового потоку в шаруватих структурах з урахуванням відбиття та заломлення акустичних хвиль на міжшарових межах.

2. Вперше 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. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів металу.

4. Вперше на мікроскопічному рівні розраховано ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «ізолятор-ферромагнітний ізолятор-ізолятор». Отримані результати теплопередачі відіграють важливу роль в галузі спінової калоритроніки.

5. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів ферромагнітного ізолятора.

6. Вперше обчислено ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «метал-діелектрик-метал» з довільною кількістю шарів.



## **6. Практичне значення одержаних результатів**

Одержані результати мають значний теоретичний й експериментальний потенціал, оскільки одна частина з них може стати основою для подальших теоретичних досліджень, а інша потребує експериментального підтвердження.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Отримані результати можуть ефективно використовуватись для розв'язання важливої проблеми тепловідводу у наноелектроніці, де металеві або напівпровідникові шари використовуються як елементи тонкоплівкових польових транзисторів.

2. Отримані результати при розгляді гетероструктури діелектрик-метал-діелектрик дуже корисні в плазмоніці, де тепло в плазмонному контурі може перевищувати або не перевищувати тепло, що виділяється складними електронними схемами. В плазмоніці зазвичай використовуються поверхневі плазмон-поляритони, які являють собою когерентні електронні коливання, що рухаються разом з електромагнітною хвилею вздовж межі розділу між діелектриком і металом.

3. Результати отримані при розгляді гетероструктури ізоляторферромагнітний ізолятор-ізолятор є актуальними для аналізу гібридних наноструктур та розробки спінових калоритронних пристроїв на основі магнітних.

4. Результати моделювання поперечного переносу тепла у гетероструктурі «метал-ізолятор-метал» можуть бути корисними у фізиці та техніці низьких температур, зокрема, для проектування та аналізу режимів роботи низькотемпературних електронних пристроїв із шаруватою структурою.

## **7. Дотримання академічної доброчесності**

Під час аналізу дисертаційної роботи, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагиатній інтернет-системі [Strikeplagiarism.com](http://Strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

Дисертація оформлена відповідно наказу №40 МОН України від 12.01.2017 року. Мета наукової роботи досягнута. Завдання виконані у повному обсязі. Принципових і суттєвих зауважень до роботи не виникло, всі розділи були оцінені позитивно. У межах наукової дискусії хотілось б поставити наступні запитання:

1. В тексті дисертації міститься певна кількість граматичних помилок, що не впливають на сприйняття змісту роботи.

2. Результати теоретичних розрахунків потребують експериментального підтвердження. Бажано привести результати досліджень, які містять такі дані.

3. Список умовних скорочень треба розширити, оскільки в роботі багато формул та введених в них параметрів.

4. На рис. 1.2 варто було б позначити, які саме криві відповідають різним значенням акустичної прозорості  $\alpha$ .

Зазначені дискусійні зауваження не впливають на якість результатів дисертаційної роботи і обґрунтованість наведених здобувачем висновків.

## **9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи**

За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «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 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Мироненко Ірина Вікторівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»

Кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри теоретичної фізики  
імені академіка І.М. Ліфшиця  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна

Олена ЄЗЕРСЬКА

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 23:41:55 05.01.2024

Назва файлу з підписом: Рецензія Єзерська О.В.\_2.pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 416.7 КБ

Перевірені файли:  
Назва файлу без підпису: Рецензія Єзерська О.В.\_2.pdf  
Розмір файлу без підпису: 427.9 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЄЗЕРСЬКА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА  
П.І.Б.: ЄЗЕРСЬКА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА  
Країна: Україна  
РНОКПП: 2094401446  
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА  
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 23:41:53 05.01.2024  
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000FACF2201629C9904  
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145  
Тип підпису: Удосконалений  
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)  
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)  
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Юрію Бойко  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## Рецензія

офіційного рецензента, завідувача кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Рашби Георгія Ілліча на дисертаційну роботу Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки).

### 1. Обґрунтування вибору теми дослідження

Головною метою дисертаційної роботи Мироненко І.В. є здійснення теоретичного опису у рамках кінетичного підходу процесу поперечного перенесення тепла в різних гетерогенних наноструктурах. Традиційний феноменологічний підхід для вивчення теплопровідності у рамках відомого закону Фур'є не може бути безпосередньо застосований для аналізу теплоперенесення в шаруватих наноструктурах. Це обумовлено тим, що довжина вільного пробігу фононів більша або порівнянна з товщинами шарів. Таким чином фізичні умови на межі суміжних матеріалів шаруватої гетероструктури суттєво впливають на переніс тепла. Ці міркування призвели здобувачку до висновку, що для опису потоків тепла в наноструктурах потрібно використовувати мікроскопічний підхід, який, зокрема, дозволяє врахувати вплив міжшарових меж на теплопровідність багат шарової гетероструктури. Цілком природно, що у рамках запропонованого нею підходу, здобувачка теоретично досліджує поперечну теплопровідність шаруватої гетероструктури використовуючи кінетичне рівняння Больцмана для фононної функції розподілу. Шаруваті гетероструктури, які розглядаються в дисертації, є об'єктом сучасних досліджень в галузі теорії наносистем. Пошук нових підходів для реалізації перенесення, транспортування і обробки інформації як альтернатива спітронним пристроям, керованим зарядовим струмом стимулює також інтерес до вивчення структур та пристроїв, які використовують спінові струми, що переносяться магнонами і квантовими спіновими хвилями. Зокрема, струми на основі магнонів можуть використовуватися для перенесення, транспортування і обробки інформації як альтернатива спітронним пристроям, керованим зарядовим струмом. Унікальність таких систем полягає в тому, що з'являється можливість реалізації ефективних логічних пристроїв на базі використання чистих магнонних спінових струмів в ізоляційних феромагнетиках, що відрізняються відсутністю джоулевого нагрівання та зменшеним затуханням спінової хвилі. Добре відомо, що в електронних пристроях, таких як транзистори і інтегральні схеми, тепло може передаватися електронами через границі між шарами гетероструктури. Важливо контролювати цей процес, оскільки перегрів може призвести до втрати продуктивності і зниження довговічності пристроїв.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Мироненко І.В. є, безумовно, **актуальною.**

## 2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг роботи складає 128 сторінок (5.2 авторських 27 аркушів), з них текст основної частини становить 101 сторінок (4.2 авторських аркушів). Вона містить 4 рисунки. Список використаних джерел містить 137 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету і основні задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, описано математичні моделі та методи, які були використані у дослідженнях і особистий внесок здобувачки.

У **першому** розділі в рамках теорії акустичної неузгодженості між твердими тілами обговорюється роль електронів провідності в формуванні ефективної акустичної прозорості інтерфейсу між вузькими металевими плівками і діелектричними підкладками з високою теплопровідністю. Розглянуто випромінювання фононів з металевих плівок, що нагріваються струмом за низьких температур. Теоретичний розгляд цих задач проведено з використанням кінетичних рівнянь для фононної та електронної функцій розподілу. У більшості випадків обговорено зв'язок між теоретичними результатами та існуючою експериментальною ситуацією.

У **другому** розділі дисертації дисертації описується об'єкт та методи дослідження переносу тепла в гетерогенних наноструктурах. Обговорюючи літературні джерела здобувачка дійшла до висновку, що завдяки прогресу в синтезі наноматеріалів і виготовленні наноструктур, нанорозмірний теплообмін залишиться актуальним і в майбутньому, відіграючи важливу роль в інформаційних технологіях та технологіях перетворення енергії та у біомедичній інженерії. Також у цьому розділі наголошується на важливості фононного рівняння переносу тепла Больцмана (BTE) як адекватного метода для теоретичного опису перенесення фононів від балістичного до дифузійного режимів.

У **третьому розділі** здобувачка представила кінетичний підхід, в рамках якого розглянуто поперечне перенесення тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками за низьких температур, коли електрони в металевому шарі термалізовані. Даний підхід базується на розв'язанні кінетичного рівняння Больцмана для фононної функції розподілу з граничними умовами, що враховують відбиття та заломлення акустичних хвиль при їх проходженні через міжшарові інтерфейси. Аналітичним шляхом було обчислено ефективну поперечну теплопровідність даної шаруватої системи при довільному значенні товщини металевого шару. Цікавим результатом роботи було зроблене тут здобувачкою порівняння отриманих результатів, яке показало, що відносно просте двотемпературне наближення коректно описує кінетику теплоперенесення в багатошаровій системі тільки у випадку товстих металевих шарів, коли товщина шару значно більша за фонон-електронну довжину вільного пробігу.

У **четвертому розділі** кінетичний підхід використаний для теоретичного опису переносу тепла фононами та магнонами через шар феромагнітного ізолятора, розташованого між двома масивними ізоляторами при низьких температурах. В цьому випадку магнони в шарі феромагнітного ізолятора термалізовані внаслідок магнон-магнонних зіткнень. Також надані розрахунки ефективної поперечної теплопровідності даної шаруватої системи з довільною товщиною шару феромагнітного ізолятора, де

тепловий потік переносять як магнони, так і фонони. Знайдена товщина, при якій розмірний ефект суттєво впливає на теплопровідність. Здобувачка, резюмуючи результати розділу, зробила важливе зауваження яке полягає в тому, що при зростанні довжини вільного пробігу та товщини зі зниженням температури термостата, роль розмірного ефекту в поперечній теплопровідності шаруватих структур зростає.

**У п'ятому розділі** здобувачка розвинула мікроскопічну модель для теоретичного опису перенесення тепла в системі металевих шарів, розділених діелектричними прошарками при низьких температурах, коли електрони в металі термалізовані, а фонони – ні. Вона отримала аналітичний вираз для ефективної теплопровідності структур з довільною кількістю шарів, а також для надграток.

В цілому дисертаційна робота Мироненко І.В. виконана на високому науковому рівні. Вона є завершеним теоретичним дослідженням, в якому отримані нові результати, що мають важливе наукове і практичне значення.

**Висновки** за результатами виконання дисертаційної роботи зрозуміло та коректно підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів наукових досліджень. Дисертація є завершеною науковою роботою, а її оформлення відповідає вимогам МОН.

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

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних держбюджетних наукових проекту Міністерства освіти і науки України № держреєстрації 0118U002037 (Теоретичні та експериментальні дослідження роботи квантових лічильників окремих рентгенівських фотонів на базі високотемпературних надпровідників.) Також робота виконана за підтримки програми Європейського Союзу Horizon 2020 у рамках гранту № 644348 (дослідницька та інноваційна програма Марії Склодовської-Кюрі)

### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Мироненко І. В. під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних і загально відомих підходів та методів обчислювальної й математичної фізики, а саме: кінетичне рівняння Больцмана з побудовою відповідних інтегралів зіткнень, а також числові методи комп'ютерної математики та методи фізичного моделювання. Основні результати дисертації опубліковані в 3 статтях в індексованих наукових журналах та доповідалися на 1 міжнародній науковій конференції. А саме, Мироненко І. В. зробила доповідь на Міжнародній конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (м. Харків, Україна) у 2019 р. Організаційний комітет вищезгаданої конференції, до складу якого я входив, зазначив, що доповідь Мироненко І. В. зробила вагомий внесок у роботу конференції, і від імені Оргкомітету я висловлюю свою щирю подяку їй за це.

### **5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна**

У роботі отримано низку нових теоретичних результатів, серед яких, на мою думку, варто відзначити такі:

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше отримано рівняння для фононого поперечного теплового потоку в шаруватих структурах з урахуванням відбиття та заломлення акустичних хвиль на міжшарових межах.

2. Вперше 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. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів металу.

4. Вперше на мікроскопічному рівні розраховано ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «ізолятор-ферромагнітний ізолятор- ізолятор». Отримані результати теплопередачі відіграють важливу роль в галузі спінової калоритроніки.

5. Вперше проаналізовано розмірний ефект теплопровідності шаруватих наноструктур для випадків тонких і товстих шарів ферромагнітного ізолятора.

6. Вперше обчислено ефективну поперечну теплопровідність для гетероструктури «метал-діелектрик-метал» з довільною кількістю шарів.

### **6. Практичне значення одержаних результатів**

Одержані результати мають значний теоретичний й експериментальний потенціал, оскільки одна частина з них може стати основою для подальших теоретичних досліджень, а інша потребує експериментального підтвердження.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Отримані результати можуть ефективно використовуватись для розв'язання важливої проблеми тепловідводу у наноелектроніці, де металеві або напівпровідникові шари використовуються як елементи тонкоплівкових польових транзисторів.

2. Отримані результати при розгляді гетероструктури діелектрик-метал-діелектрик дуже корисні в плазмоніці, де тепло в плазмонному контурі може перевищувати або не перевищувати тепло, що виділяється складними електронними схемами. В плазмоніці зазвичай використовуються поверхневі плазмон-поляритони, які являють собою когерентні електронні коливання, що рухаються разом з електромагнітною хвилею вздовж межі розділу між діелектриком і металом.

3. Результати отримані при розгляді гетероструктури ізолятор ферромагнітний ізолятор-ізолятор є актуальними для аналізу гібридних наноструктур та розробки спінових калоритронних пристроїв на основі магнітонів.

4. Результати моделювання поперечного переносу тепла у гетероструктурі «метал-ізолятор-метал» можуть бути корисними у фізиці та техніці низьких температур, зокрема, для проектування та аналізу режимів роботи низькотемпературних електронних пристроїв із шаруватою структурою.

## **7. Дотримання академічної доброчесності**

Під час аналізу дисертаційної роботи, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі [Strikeplagiarism.com](http://Strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

Дисертація оформлена відповідно наказу №40 МОН України від 12.01.2017 року. Мета наукової роботи досягнута. Завдання виконані у повному обсязі. Принципових і суттєвих зауважень до роботи не виникло, всі розділи були оцінені позитивно. У межах наукової дискусії хотілось б поставити наступні запитання:

1. В тексті дисертації міститься певна кількість граматичних помилок, які не впливають на сприйняття змісту роботи.

2. З метою експериментального підтвердження отриманих здобувачкою результатів бажано було б виконати чисельні оцінки величин теоретично передбачених ефектів для шаруватих наносистем, з якими мають справу експериментатори.

3. Зміст дисертації містить велику кількість аналітичних виразів та громіздких формул. З метою кращого сприйняття читачами матеріалу дисертації бажано було б основні результати здобувачки проілюструвати чисельними розрахунками.

Ці зауваження скоріше мають характер побажань наукової діяльності на майбутнє і не впливають на загальну безсумнівно позитивну оцінку дисертації.

## **9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи**

За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Мироненко Ірини Вікторівни «Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «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 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Мироненко Ірина Вікторівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»



Кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
завідувач кафедри теоретичної фізики імені  
академіка І.М. Ліфшиця Харківського  
національного університету імені В. Н.  
Каразіна

Георгій РАШБА

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 16:47:31 08.01.2024

Назва файлу з підписом: Рецензія Рашба Г.І..pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 248.0 КБ

Перевірені файли:  
Назва файлу без підпису: Рецензія Рашба Г.І..pdf  
Розмір файлу без підпису: 250.9 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ  
П.І.Б.: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ  
Країна: Україна  
РНОКПП: 2592413194  
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА  
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 16:47:27 08.01.2024  
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000851F250112107804  
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145  
Тип підпису: Удосконалений  
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)  
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)  
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00