

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0823U101888

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 19-12-2023

**Статус:** Наказ про видачу диплома

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:** Наказ ХНУ імені В. Н. Каразіна № 0302-Зк/211 від 12.02.2024 р.



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Мироненко Ірина Вікторівна

2. Iryna Myronenko

**Кваліфікація:**

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-0165-4498

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Аспірантура/Докторантура:** так

**Шифр наукової спеціальності:** 104

**Назва наукової спеціальності:** Фізика та астрономія

**Галузь / галузі знань:** природничі науки

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Фізика та астрономія

**Дата захисту:** 25-01-2024

**Спеціальність за освітою:** Фізика

**Місце роботи здобувача:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ID 3706

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 29.19.09.07, 29.19.37, 29.19.39, 29.39.01

**Тема дисертації:**

1. Кінетика процесів перенесення фононів і магнонів в гетерогенних наноструктурах
2. Kinetics of phonon and magnon transfer processes in heterogeneous nanostructures

**Реферат:**

1. Дисертація присвячена кінетичному аналізу поперечного перенесення тепла в різних гетерогенних наноструктурах. Науковий аспект проблеми теплопровідності багат шарових систем полягає в тому, що закон Фур'є  $Q = -k \nabla T$ , який пов'язує потік тепла з градієнтом температури, не може бути застосований для аналізу теплоперенесення в шаруватих наноструктурах, де довжина вільного пробігу фононів більша або порівнянна з товщинами шарів і де вплив на теплоперенесення надають умови на межі суміжних матеріалів. Таким чином, для опису потоків тепла в наноструктурах потрібен мікроскопічний підхід. Дисертаційна робота має п'ять розділів. 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. Розгляд задач проведено з використанням кінетичних рівнянь для фононної та електронної функцій розподілу. Розглянуто результати робіт, в яких теоретично досліджено нелінійну релаксацію між магнонами та

фононами в ізоляційному феромагнетикі. Нелінійний тепловий потік від магнів до фононів розраховано мікроскопічно в термінах черенковського випромінювання фононів магніонами. У другому розділі дисертації описується об'єкт та методи дослідження переносу тепла в гетерогенних наноструктурах.

Наноматеріали—це не просто ще один крок у мініатюризації матеріалів або частинок. Нанорозмірний теплообмін був і є популярною темою впродовж останніх двох десятиліть. Фононне рівняння переносу тепла Больцмана—це метод, здатний моделювати перенесення фононів від балістичного до дифузійного режимів, велика кількість досліджень була зроблена для розробки чисельних розрахунків для цього рівняння. Третій розділ. Представлено 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 аналізований на кінетичному рівнянні Больцмана для фононної функції розподілу з граничними умовами, що враховують відбиття та заломлення акустичних хвиль при їх проходженні через міжшарові інтерфейси. Обчислено ефективну поперечну теплопровідність даної шаруватої системи при довільному значенні товщини металевого шару. Знайдено товщини, при яких у теплопровідності проявляється розмірний ефект та його залежність від температури, що потрібно враховувати при створенні електронних пристроїв, елементи яких мають субмікронні розміри. У четвертому розділі розглянуто кінетичний підхід переносу тепла фононами та магніонами через шар феромагнітного ізолятора, розташованого між двома масивними ізоляторами при низьких температурах, коли магніони в шарі феромагнітного ізолятора термалізовані внаслідок магніон-магніонних зіткнень і мають температуру магнів. Розраховано ефективну поперечну теплопровідність даної шаруватої системи з довільною товщиною шару феромагнітного ізолятора, де тепловий потік переносять як магніони, так і фонони, та знайдено товщину, при якій розмірний ефект проявляється в теплопровідності. П'ятий розділ. Розглянуто перенесення тепла в системі металевих шарів, розділених діелектричними прошарками при низьких температурах, коли електрони в металі термалізовані, а фонони – ні. Отримано аналітичний вираз для ефективної теплопровідності структур з довільною кількістю шарів, а також для надграток. Проаналізовано розмірний ефект теплопровідності і показано, що фононна механіка теплопровідності суттєво відрізняється для випадків товстих і тонких металевих шарів. 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. Результати отримані у роботі.

1. Отримано рівняння для поперечного перенесення потоку тепла через металевий шар, розташований між двома масивними діелектриками.
2. Обчислено ефективну поперечну теплопровідність шаруватої системи діелектрик-метал-діелектрик при довільному значенні товщини металевого шару.
3. Знайдено товщини, металевого шару, при яких в теплопровідності проявляється розмірний ефект.
4. Мікроскопічну теорію переносу енергії в багатшарових наноструктурах поширено на структури, що містять шар феромагнітного ізолятора.
5. Розраховано ефективну теплопровідність перпендикулярну до шарів, тобто через магніонну та фононну температури.
6. Знайдено товщину, феромагнітного ізолятора, при якій розмірний ефект проявляється в теплопровідності.
7. Розглянуто перенесення тепла в системі металевих шарів, розділених діелектричним прошарком при низьких температурах.
8. Обчислено ефективну поперечну теплопровідність з довільною кількістю шарів, проаналізовано розмірний ефект теплопровідності для випадків тонких і товстих шарів металу.

2. The dissertation is devoted to the kinetic analysis of transverse heat transfer in various heterogeneous nanostructures. The scientific aspect of the problem of thermal conductivity of multilayer systems is that the Fourier law  $Q = -k \nabla T$ , which relates the heat flow to the temperature gradient, cannot be applied to the analysis of heat transfer in layered nanostructures. Thus, a microscopic approach is needed to describe heat flows in nanostructures. The 1-st chapter. Within the framework of the theory of acoustic incoherence between solids, the role of conduction electrons in the formation of effective acoustic transparency of the interface between narrow metal films and dielectric substrates with high thermal conductivity is discussed. The emission of phonons from metal films heated by current at low temperatures is considered. The results of works in which the nonlinear relaxation between magnons and phonons in an insulating ferromagnet are theoretically investigated are

considered. The nonlinear heat flow from magnons to phonons is calculated microscopically in terms of Cherenkov radiation of phonons by magnons. The 2-nd chapter describes the object and methods of heat transfer research in heterogeneous nanostructures. Nanomaterials are not just another step in the miniaturization of materials or particles. Nanoscale heat transfer has been and is a hot topic for the past two decades. The Boltzmann phonon heat transfer equation is a method capable of modeling phonon transfer from ballistic to diffusive regimes, and a large amount of research has been done to develop numerical calculations for this equation. The 3-rd section. A kinetic approach is presented, which considers transverse heat transfer through a metal layer located between two massive dielectrics at low temperatures, when the electrons in the metal layer are thermalized. This approach is analyzed on the Boltzmann kinetic equation for the phonon distribution function with boundary conditions that take into account the reflection and refraction of acoustic waves when they pass through interlayer interfaces. The effective transverse thermal conductivity of this layered system was calculated at an arbitrary value of the thickness of the metal layer. Thicknesses were found at which the thermal conductivity exhibits a size effect and its dependence on temperature, which must be taken into account when creating electronic devices whose elements have submicron dimensions. The 4-th chapter deals with the kinetic approach of heat transfer by phonons and magnons through a layer of a ferromagnetic insulator located between two massive insulators at low temperatures, when magnons in the ferromagnetic insulator layer are thermalized. The effective transverse thermal conductivity of this layered system with an arbitrary thickness of the ferromagnetic insulator layer, where the heat flow is carried by both magnons and phonons, was calculated, and the thickness at which the dimensional effect manifests itself in thermal conductivity was found. The 5-th chapter considers heat transfer in a system of metal layers separated by dielectric layers, when electrons in the metal are thermalized, but phonons are not. An analytical expression was obtained for the effective thermal conductivity of structures with an arbitrary number of layers, as well as for superlattices. The dimensional effect of thermal conductivity was analyzed and it was shown that the phonon mechanics of thermal conductivity differs significantly for the cases of thick and thin metal layers. The results obtained in the work provide an explanation of the features of heat transfer in nanostructures and are important for the development of nanostructured materials for applications in the field of thermoelectricity, spin caloritronics, and plasmonics. The results are obtained in the work. 1. The equation for the transverse transfer of heat flow through a metal layer located between two massive dielectrics is obtained. 2. The effective transverse thermal conductivity of the layered dielectric-metal-dielectric system at an arbitrary value of the thickness of the metal layer was calculated. 3. The thickness of the metal layer was found, at which the dimensional effect is manifested in thermal conductivity. 4. The microscopic theory of energy transfer in multilayer nanostructures is extended to structures containing a layer of a ferromagnetic insulator. 5. The effective thermal conductivity perpendicular to the layers, i.e. due to the magnon and phonon temperatures, was calculated. 6. The thickness of the ferromagnetic insulator was found, at which the size effect manifests itself in thermal conductivity. 7. Heat transfer in a system of metal layers separated by a dielectric layer at low temperatures is considered. 8. Calculated effective transverse thermal conductivity with an arbitrary number of layers, analyzed the dimensional effect of thermal conductivity for cases of thin and thick layers of metal.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

**Публікації:**

- A. I. Bezuglyj, V. A. Shklovskij, R. V. Vovk, and I. V. Mironenko, Microscopic analysis of heat transfer in I1/N/I2 heterogeneous nanostructures at low temperatures. Low Temperature Physics 45, 537 (2019). DOI.org/10.1063/1.5097364, (Scopus, Q3)
- V.A. Shklovskij, A.I. Bezuglyj, I.V. Mironenko, Heat transport in I1/FI/I2 heterogeneous nanostructures at low temperatures / Phys. Rev. B 103, 024440 – Published 25 January 2021. DOI.org/10.1103/PhysRevB.103.024440 (Scopus, Q1).

**Наукова (науково-технічна) продукція:** технології

**Соціально-економічна спрямованість:** економія матеріалів; зменшення зносу обладнання

**Охоронні документи на ОПІВ:**

**Впровадження результатів дисертації:** Планується до впровадження

**Зв'язок з науковими темами:** 0118U002037; 644348 Horizon 2020

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Шкловський Валерій Олександрович
2. Valerii Shklovskiy

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.22

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-9235-9309

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

**Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Ковалевський Михайло Юрійович
2. Mykhailo Kovalevskiy

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-9224-5288

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" Національної академії наук України

**Код за ЄДРПОУ:** 14312223

**Місцезнаходження:** вул. Академічна, буд. 1, Харків, Харківський р-н., 61108, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Ковальов Олександр Семенович

2. Oleksandr Kovalov

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0009-0006-2714-230X

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України

**Код за ЄДРПОУ:** 03534601

**Місцезнаходження:** проспект Науки, буд. 47, Харків, Харківський р-н., 61103, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

**Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Рашба Георгій Ілліч

2. Heorhii Rashba

**Кваліфікація:** к.ф.-м.н., доц., 01.04.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-0535-330X

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Єзерська Олена Володимирівна

2. Olena Yezerska

**Кваліфікація:** к.ф.-м.н., доц., 01.04.11

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-6896-9550

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Код за ЄДРПОУ:** 02071205

**Місцезнаходження:** майдан Свободи, буд. 4, Харків, Харківський р-н., 61022, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Бойко Юрій Іванович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Бойко Юрій Іванович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Шевченко Андрій Олександрович

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна