

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. Директора Інституту радіофізики
та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН
України



Юрій ЛОГВІНОВ

2024 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 4 від 04 квітня 2024 р. розширеного засідання фахового наукового семінару відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України.

Були присутні: 25 учасників семінару, в тому числі: **доктори фізико-математичних наук:** Тарапов С.І., Білецький М.М., Ямпольський В.О., Аверков Ю.О., Майзеліс З.О., Кириленко А.О., Філь Д.В. (Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України); **кандидати фізико-математичних наук:** Соболяк О.В., Луценко І.В., Натаров М.П., Шубний О.І., Архипова К.А., Кривенко О.В., Головащенко Р.В., Полевой С.Ю., Кадигроб Д.В., Роєнко О.М., Хуторян Е.М., Сіренко К.Ю., Єгоров В.А., Рохманова Т.М., Желтов В.М.; **доктор філософії:** Герасимова Д.О.

Слухали: доповідь та обговорення дисертаційної роботи аспірантки 4 року навчання, молодшого наукового співробітника відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України Квітки Ніни Михайлівни на тему «Поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках, кероване статичним магнітним полем» на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Тему дисертаційної роботи затверджено на засіданні Вченої ради Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (протокол № 3 від 11 лютого 2021 року). Наказом Інституту №149/ВК від 13.10.2020 р. науковим керівником затверджено доктора фізико-математичних наук, доцента Апостолова С.С. Наказом Інституту № 129/ ВК від 25.09.2023 р. призначено другого наукового керівника доктора фізико-математичних наук, доцента Майзеліса З.О. У зв'язку зі звільненням Апостолова С.С. залишено науковим керівником Майзеліса З.О. (наказ Інституту № 23/ВК від 09.02.2024 р.).

В обговоренні дисертаційної роботи **брали участь (ставили питання і виступили):** Тарапов С.І., Ямпольський В.О., Білецький М.М., Майзеліс З.О., Філь Д.В., Натаров М.П.

Ухвалили: прийняти з даної роботи такий висновок

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації Квітки Н.М.**

Актуальність теми дослідження

Роботу присвячено розв'язанню актуального дослідження впливу статичного магнітного поля на поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках (ШНП). ШНП привертають сьогодні значну увагу завдяки своїм унікальним фізичним властивостям, що пояснюються сильною анізотропією цих структур, яка полягає в тому, що надпровідні шари в цих структурах пов'язані між собою завдяки внутрішньому ефекту Джозефсона. Теоретичні дослідження передбачають різні нелінійні явища в шаруватих надпровідниках, які можуть спостерігатися поблизу джозефсонівської плазмової частоти навіть тоді, коли нема руху джозефсонівських вихорів. Іншою важливою особливістю таких шаруватих структур є терагерцовий (ТГц) діапазон характерних частот, який все ще є недостатньо представленим в наявних електронних і оптичних пристроях, але який має велику кількість можливих практичних застосувань у найрізноманітніших галузях від астрофізики до медицини, що робить ці матеріали ще більш перспективними. Нелінійність цих систем також пояснює чутливість ШНП до зовнішнього постійного магнітного поля, тому використання статичного магнітного поля є перспективним засобом контролю електромагнітних ефектів у таких структурах. Зокрема, такими ефектами можуть бути резонансна прозорість надпровідних пластин і фокусування лазерного пучка. Визначення можливостей такого методу для конкретних задач потребує детального аналітичного дослідження.

В дисертації представлено результати аналітичного дослідження транспорту терагерцових електромагнітних хвиль через пластину шаруватого надпровідника та визначено можливості його налаштування з використанням статичного магнітного поля. Показано, що статичне магнітне поле суттєво впливає на резонансну прозорість шаруватого надпровідника для плоских хвиль і на параметри фокусування лазерного пучка гаусового профілю пластиною шаруватого надпровідника.

Зв'язок роботи з планами наукових робіт

Дисертаційна робота виконувалась у відділі теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України відповідно до планів виконаних НДР або НДР, що виконуються у цей час, державних наукових програм «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» (державний реєстраційний номер 0117U004038, роки виконання 2017-2021) та «Електродинамічні властивості гетероструктур та фотонних кристалів, що включають до себе гіротропні середовища, метаматеріали та шаруваті надпровідники» (державний реєстраційний номер 0120U100233, роки виконання 2020-2021). Робота також пов'язана з виконанням завдань в рамках проєкту, фінансованого національним фондом досліджень України, проєкт №. 2020.02/0149 «Квантові явища у взаємодії електромагнітних хвиль з твердотільними наноструктурами».

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати:

1. Вперше було знайдено закон дисперсії локалізованих хвиль у пластині ШНП скінченної товщини в різних геометріях з урахуванням ефекту порушення електронейтральності шарів надпровідника та з урахуванням наявності зовнішнього статичного магнітного поля. Показано, що в геометрії, коли шари паралельні границі розділу між вакуумом (з обох боків) і пластиною, порушення електронейтральності може викликати появу аномальної дисперсії хвиль в області частот, близьких до джозефсонівської плазмової частоти. Також виявлено інші наслідки цього ефекту, такі як поява додаткової забороненої зони поблизу цієї частоти й те, що для деяких параметрів спостерігається виродження спектра. Показано, що закон дисперсії для локалізованих хвиль у пластині шаруватого надпровідника у випадку, коли шари перпендикулярні поверхням, є чутливим до зовнішнього статичного магнітного поля.

2. Вперше модифіковано трансфер-матричний метод для опису поширення нелінійних електромагнітних хвиль у пластині шаруватого надпровідника, що знаходиться в зовнішньому постійному магнітному полі, та вперше знайдено специфічні матриці, які відповідають за взаємодію джозефсонівських плазмових хвиль із зовнішнім магнітним полем. Розроблений метод застосовано до системи, що складається з пластини ШНП, обмеженої з двох боків діелектричними прошарками.

3. Вперше теоретично досліджено вплив статичного магнітного поля на резонансну прозорість тонкого зразка шаруватого надпровідника для ТГц хвиль, коли зразок знаходиться в діелектричному середовищі та відокремлений від нього тонкими просторовими проміжками вакууму. Показано, що зміна цього поля дозволяє отримати різні типи резонансних залежностей коефіцієнта пропускання від кута падіння, що відрізняються кількістю піків і їхньою шириною. Показано, що статичне поле може використовуватись для налаштування прозорості зразка та потребує на два порядки меншої відносної точності при встановленні, ніж у випадку керування за допомогою зміни частоти.

4. Вперше теоретично досліджено вплив статичного магнітного поля на фокусування лазерного пучка гаусового профілю пластиною шаруватого надпровідника. Отримано вирази для фокусної відстані та мінімального радіуса пучка, що залежать від статичного магнітного поля. Показано, що зміна величини поля дозволяє налаштовувати ці величини в широкому діапазоні значень, а також переводити пластину між режимами фокусування та розфокусування.

Практичне значення результатів дисертації полягає в тому, що вони розширюють наявні фундаментальні теоретичні уявлення про особливості поширення ТГц електромагнітних хвиль у високотемпературних надпровідниках шаруватої структури. На основі цих результатів можливо створити нові прилади, що працюють у характерному для шаруватих високотемпературних надпровідників ТГц діапазоні частот, зокрема фільтри, змішувачі, підсилювачі. Сфера можливих застосувань таких приладів є дуже широкою: від медичної діагностики до астрономічних спостережень. Досліджена можливість використання статичного магнітного поля для налаштування параметрів ШНП дозволяє запропонувати це як ефективний метод керування роботою таких приладів в експериментальних установках.

Обґрунтованість і достовірність отриманих у роботі результатів забезпечено детальною постановкою задачі та використанням добре перевірених і загально прийнятих методів теоретичної фізики, методів числових розрахунків і наближених методів асимптотичного аналізу. Поля у шаруватому

надпровіднику аналізувалися за допомогою розв'язання зв'язаних синусоїдальних рівнянь Гордона. Проходження хвиль через багатошарову систему досліджувалося за допомогою методу трансфер-матриць. Порівняння результатів отриманих аналітичних виразів з числовими розрахунками слугувало додатковою верифікацією застосованих підходів.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 2 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 1 стаття, що входить до Переліку наукових фахових видань України, 1 препринт, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій. Публікації здобувачки повністю відповідають темі дисертації та правильно відображають її зміст і основні результати.

Публікації за темою дисертації:

1. Kvitka N., Apostolov S., Makarov N., Rokhmanova T., Shmat'ko A., Yampol'skii V. Resonant transparency of a layered superconductor: Hyperbolic material in the terahertz range tuned by dc magnetic field. *Physical Review B* . 2021. Vol. 103, No. 10. P. 104512.
2. Rokhmanova T., Apostolov S., Kvitka N., Yampol'skii V. Effect of a dc magnetic field on the anomalous dispersion of localized josephson plasma modes in layered superconductors. *Low Temperature Physics*. 2018. Vol. 44, No. 6. P. 552–560.
3. Kvitka N., Rokhmanova T., Apostolov S. Modification of transfer-matrix method for electromagnetic waves in layered superconductor in presence of dc magnetic field. *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Physics"*. 2019. No. 31. P. 42–47.
4. Kvitka N., Apostolov S., Yampol'skii V. Effect of charge-neutrality breaking on localized terahertz waves in a plate of layered superconductor. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW). IEEE, 2022. P. 392–395.
5. Kvitka N., Apostolov S., Rokhmanova T., Yampol'skii V. Resonant suppression of the thz wave reflection from a plate of layered superconducting metamaterial tunable by dc magnetic field. 2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). IEEE, 2021. P. 214–216.
6. Квітка Н., Апостолов С.С., Рохманова Т. Резонансне пропускання ТГц-хвилі через шаруватий надпровідник, кероване зовнішнім магнітним полем постійного струму. 2020 XX Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини. Інститут фізики конденсованих систем НАН України, 2020. Р. 27.

7. Kvitka N., Ovcharenko H., Maizelis Z., Apostolov S., Yampol'skii V. Laser beam focusing by layered superconductor tuned by dc magnetic field. arXiv, 2024.
8. Rokhmanova T., Apostolov S., N Kvitka N., Yampol'skii V. Description of localized josephson plasma waves: Legendre functions vs wkb approximation. 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). IEEE, 2018. P. 181–184.
9. Rokhmanova T., Apostolov S., N Kvitka N., Yampol'skii V. Dispersion of thz modes localized on layered superconductor controlled by dc magnetic field. 2018 48th European Microwave Conference (EuMC). IEEE, 2018. P. 1509–1512.
10. Rokhmanova T., Apostolov S., N Kvitka N., Yampol'skii V. Controlled surface terahertz plasmonics in layered superconductors. Complex Quantum Systems Out of Equilibrium. Murcia, Spain, 2019. P. 16.
11. N Kvitka N., Rokhmanova T., Apostolov S., Yampol'skii V. Localized josephson plasma waves in a plate of layered superconductor in the presence of a dc magnetic field. X International Conference for Professionals and Young Scientists "LOW TEMPERATURE PHYSICS" in memory of B.Verkin for his 100th birthday anniversary. Kharkiv, Ukraine, 2019. P. 48.
12. Kvitka N., Apostolov S., Rokhmanova T. Resonant thz wave transmission through a slab of a layered superconductor tuned by an external dc magnetic field. International Scientific Conference "Physical Phenomena in Solids". Kharkiv, Ukraine, 2019. P. 26.

Структура дисертації є цілісною, а обсяг публікацій за матеріалами дисертаційної роботи відповідає встановленим вимогам МОН України і є достатнім для подання роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Оформлення дисертації відповідає вимогам.

В дисертаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності.

Апробація результатів дисертації. Результати, представлені у дисертації, доповідалися дисертанткою на таких конференціях: 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW) (November 14 –18, Kharkiv, Ukraine, 2022), 2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) (September 20-23, New York, USA, 2021), 2020 XX Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини (Жовтень 15-16, Львів, Україна), X International Conference for Professionals and Young Scientists "LOW TEMPERATURE PHYSICS" in memory of B.Verkin for his 100th birthday anniversary (June 3 - 7, Харків, Україна), International Scientific Conference

"Physical Phenomena in Solids" (December 3-5, Харків, Україна). Опубліковано один препринт на arxiv.org (2024).

Особистий внесок здобувача. Наукові праці, в яких представлено основні результати дисертації, отримано та опубліковано в співавторстві. Дисертантка зробила значущий внесок в проведення дослідження та написання статей. Дисертантка успішно представляла результати роботи на міжнародних конференціях. У роботі [1] дисертантка отримала та спростила вирази для трансфер-матриць та виразу коефіцієнта пропускання, чисельно побудувала графіки, написала основний текст. У роботі [2] дисертантка розв'язала синусоїдальне рівняння Гордона в класі спеціальних функцій Лежандра та написала відповідну частину тексту. У роботі [3] дисертантка модифікувала метод трансфер-матриць для досліджуваної проблеми проходження хвиль крізь пластину ШНП з урахуванням магнітного поля, написала основний текст. У роботі [4] дисертантка отримала закон дисперсії локалізованих ТГц хвиль з урахуванням ефекту порушення електронейтральності в пластині шаруватого надпровідника скінченної товщини, побудувала графіки, написала основний текст, підготувала презентацію та була доповідачем. У роботі [5] дисертантка отримала формули для коефіцієнта відбиття та провела числові розрахунки для шаруватого метаматеріалу з певними параметрами, дослідила вплив величини зовнішнього магнітного поля на коефіцієнт відбиття, написала основний текст, підготувала презентацію та була доповідачем. У роботі [6] дисертантка отримала формулу для коефіцієнта пропускання з урахуванням магнітного поля, написала тези, підготувала презентацію та була доповідачем. У роботі [7] дисертантка отримала аналітичні вирази для параметрів фокусування лазерного пучка (радіуса променя, фокусної відстані) після проходження пластини, побудувала графіки за аналітичними формулами, написала основний текст. У роботі [8] дисертантка описала джозефсонівські плазмові хвилі в термінах спецфункцій Лежандра. У роботах [9, 10] дисертантка дослідила можливості управління законом дисперсії локалізованих хвиль. У роботі [11] дисертантка дослідила вплив магнітного поля на поверхневі та хвилевідні моди, написала тези, підготувала презентацію та була доповідачем. У роботі [12] дисертантка дослідила вплив магнітного поля на резонансне пропускання, написала тези, підготувала презентацію та була доповідачем.

Рішення. Науковий семінар відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України на підставі доповіді Квітки Н.М. та детального обговорення дисертаційної роботи «Поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках, кероване статичним магнітним полем», що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія, відзначає високий науковий рівень і фундаментальність проведених у ній досліджень. За актуальністю вирішуваних завдань, новизною, науковою обґрунтованістю, та практичною значущістю отриманих результатів, семінар вважає, що дисертаційна робота Квітки Н.М. повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Науковий семінар відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України **рекомендує:**

1) Дисертаційну роботу Квітки Н.М. «Поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках, кероване статичним магнітним полем» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія в разовій спеціалізованій вченій раді Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України.

2) Утворити разову спеціалізовану вчену раду в складі:

Голова:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України Аверков Юрій Олегович.

Члени:

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України Білецький Микола Миколайович;

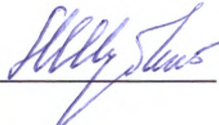
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України Воловічев Ігор Миколайович.

Опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного Інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України Шевченко Сергій Миколайович;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу теорії конденсованого стану речовини Інституту монокристалів НАН України Філь Дмитро Вячеславович.

Головуючий на засіданні
фахового наукового семінару
відділу твердотільної електроніки
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
кандидат фізико-математичних наук

 Олександр ШУБНИЙ