

ВІДГУК  
на дисертаційну роботу Квітки Ніни Михайлівни  
«Поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках, кероване  
статичним магнітним полем»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

**Актуальність теми дисертації**

Дисертаційна робота Квітки Н. М. присвячена теоретичному дослідженню ефектів, які виникають при проходженні терагерцових електромагнітних хвиль крізь пластину шаруватого надпровідника.

Шаруваті надпровідники, до яких належать купратні високотемпературні надпровідники і штучно синтезовані шаруваті структури, є незвичайними, з точки зору їх електромагнітних властивостей, матеріалами. Насамперед, мова йде про терагерцовий діапазон. Такі системи характеризуються сильною анізотропією струму, яка виникає завдяки тому, що надпровідні шари пов'язані між собою через внутрішній ефект Джозефсона.

Шаруваті надпровідники є прикладом так званого гіперболічного матеріалу, в якому діагональні компоненти тензора діелектричної проникності можуть мати різні знаки, що призводить, наприклад, до негативного заломлення електромагнітних хвиль.

В результаті взаємодії джозефсонівських струмів з електромагнітним полем в шаруватих надпровідниках виникають специфічні колективні збудження — джозефсонівські плазмові хвилі. Так як джозефсонівський струм є нелінійним за фазою параметра порядку, поширення джозефсонівських плазмових хвиль в шаруватих надпровідниках також є нелінійним. При розповсюдженні крізь такі матеріали електромагнітних хвиль з частотами, близькими до частоти джозефсонівських плазмових хвиль, можуть виникати сильні нелінійні ефекти, наприклад, нелінійний плазмовий резонанс, що демонструє гістерезисну поведінку, самофокусування, самоіндукована прозорість.

Хоча до початку досліджень, які представлені в дисертації Н.М.Квітки електромагнітні властивості шаруватих надпровідників вивчались достатньо широко, низка важливих питань залишилась поза розглядом.

Відомо, що між надпровідними шарами існує ємнісний зв'язок. Вплив такого зв'язку було раніше досліджено для випадку напівнескінченного зразка, а саме було

показано виникнення додаткової дисперсійної кривої з аномальною дисперсією для поверхневої локалізованої хвилі. Наявність цієї гілки впливає на пропускання та відбиття електромагнітної хвилі. В той же час не було досліджено область частот поблизу джозефсонівської плазмової частоти, в якій спостерігаються сильні нелінійні ефекти. Також не досліджувалось питання щодо впливу ємнісного зв'язку у випадку скінченної товщини зразка, коли є не тільки поверхневі, а й хвильоводні моди.

Важливою особливістю шаруватих надпровідників є те, що електромагнітні хвилі в них взаємодіють зі статичним магнітним полем, що зумовлює необхідність теоретичних досліджень впливу такого поля на поширення хвиль. Раніше цю взаємодію було досліджено для напівнескінченного зразка і було показано, що функції, якими описується поверхнева хвиля, в цьому випадку не є гармонічними. Але випадок скінченного зразка не було досліджено.

Ще однією важливою задачею є вивчення особливостей нелінійного фокусування лазерного пучка, який проходить через шаруватий надпровідник. Раніше було показано, що завдяки нелінійності, параметри фокусування пучка залежать від амплітуди хвилі та можуть також демонструвати гістерезисну поведінку. Представляє інтерес дослідити вплив статичного магнітного поля на фокусування. Це могло б дозволити отримати кращі методи контролю над цим явищем.

Таким чином, залишалось коло невирішених проблем щодо електромагнітних властивостей шаруватих надпровідників. Ці проблеми було вирішено в дисертації Н. М. Квітки, що визначає актуальність теми дослідження даної роботи.

**Наукова новизна отриманих автором результатів**, на мою думку, полягає насамперед в наступному:

1. Отримано закон дисперсії поверхневих і хвильоводних мод в пластині шаруватого надпровідника з врахуванням ємнісного зв'язку шарів надпровідника та при наявності зовнішнього статичного магнітного поля. Показано, що в геометрії, коли шари паралельні границі розділу між вакуумом та пластиною, ємнісний зв'язок може викликати появу аномальної дисперсії таких хвиль в області частот, близьких до джозефсонівської плазмової частоти. Передбачена поява додаткової забороненої зони поблизу цієї частоти. Показано, що закон дисперсії для випадку, коли шари перпендикулярні поверхням, є чутливим до зовнішнього статичного магнітного поля.

2. Розвинуто метод трансфер-матриці для опису поширення нелінійних електромагнітних хвиль в пластині шаруватого надпровідника в зовнішньому постійному магнітному полі.



3. Передбачено суттєвий вплив статичного магнітного поля на резонансну прозорість в терагерцовій області частот тонкого зразка шаруватого надпровідника, що знаходиться в діелектричному середовищі, та відокремлений від нього тонкими просторовими проміжками вакууму. Показано, що при зміні магнітного поля виникають різні типи резонансних залежностей коефіцієнта пропускання від кута падіння, що відрізняються кількістю піків і їх шириною. Показано, що при використанні статичного магнітного поля, для налаштування прозорості зразка потрібна на два порядки менша відносна точність, ніж у випадку керування за допомогою зміни частоти.

4. Передбачена можливість використання статичного магнітного поля для керування фокусуванням лазерного пучка пластиною шаруватого надпровідника. Показано, що зміна величини поля дозволяє в широкому діапазоні налаштовувати фокусну відстань та мінімальний радіус пучка, а також переводити пластину між режимами фокусування та розфокусування.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

Результати, отримані в дисертації, можна використати при розробці нових приладів, що працюють терагерцовому діапазоні частот, зокрема, фільтрів, змішувачів, підсилювачів. Такі прилади мають широку сферу застосувань: від медичної діагностики до астрономічних спостережень. Зокрема, передбачений в дисертації вплив статичного магнітного поля на електромагнітні властивості шакуватих надпровідників дозволяє може бути основою нового метод керування роботою таких приладів в експериментальних установках.

#### **Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються**

Високий рівень обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих в дисертації, базується на використанні добре перевірених і загально прийнятих методів теоретичної фізики, методів чисельних розрахунків і методів асимптотичного аналізу. Порівняння результатів аналітичних і чисельних розрахунків дає додаткову верифікацію отриманих результатів.

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

Дослідження, які проведені в дисертаційній роботі, виконані в рамках проєкту Національного фонду досліджень України "Квантові явища у взаємодії електромагнітних хвиль з твердотільними наноструктурами", конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (2020-2023 рр.), проєкту

"Електродинамічні властивості гетероструктур та фотонних кристалів, що включають до себе гіротропні середовища, метаматеріали та шаруваті надпровідники" бюджетної програми НАН України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (2020-2021 рр.), і проєкту «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» академічної тематики відділення фізики і астрономії НАН України (2017-2021 рр.).

### **Повнота викладу в наукових публікаціях.**

Результати наукових досліджень, отриманих у дисертації, повністю опубліковано у 3 статтях, дві з яких в виданнях, що індексуються в міжнародних наукових базах SCOPUS та Web of Science (в тому числі, 1 стаття в журналі квартиля  $Q_1$ ), одному препринті і 8 тезах доповідей в матеріалах конференцій.

### **Зауваження до роботи:**

1. Мені не дуже подобається термін «ефект порушення електронейтральності». Фактично вона є завжди порушеною, оскільки завжди існує ємнісний зв'язок між шарами, і мова йде про врахування ємнісного зв'язку між шарами, або нехтування таким зв'язком в відповідних рівняннях. Залишається питання, чи є описані в дисертації ефекти пороговими за величиною ємнісного зв'язку, або вони існують при будь-якому малому зв'язку?
2. Було б доцільним обговорити, хоча б якісно, як зміняться результати, якщо статичне магнітне поле буде вище за критичне поле  $H_c$ .
3. В розділі, присвяченому ефекту фокусування лазерного пучка, розглядається випадок слабкої нелінійності. При цьому виникає питання, чому при чисельній симуляції не було розглянуто також випадок сильної нелінійності.

Зазначені зауваження не носять принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

### **Висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам**

Тема дослідження і основні теоретичні положення, що виносяться на захист, свідчать про відповідність дисертаційної роботи Квітки Ніни Михайлівни «Поширення електромагнітних збуджень у шаруватих надпровідниках, кероване статичним магнітним полем» спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка містить нові науково-обґрунтовані результати.



Основні результати дисертації з вичерпною повнотою викладені в 3 опублікованих наукових статтях автора і пройшли апробацію на 5 конференціях.

Дисертація Квітки Н. М., за актуальністю, науковою новизною, об'ємом і глибиною теоретичних досліджень задовольняє вимогам до дисертацій ступеня доктора філософії згідно положень постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а здобувачка, Квітка Ніна Михайлівна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

**Опонент**

провідний науковий співробітник  
відділу теорії конденсованого стану речовин  
Інституту монокристалів НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук



Д. В. Філь

Підпис д. ф.-м. н. Філя Д.В. завірено

Учений секретар Інституту монокристалів НАН України,  
кандидат фіз.-мат. наук



К.М.Кулик