

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Апостолова Станіслава Сергійовича

"Електромагнітний та електронний транспорт у надпровідних структурах",

яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за

спеціальністю **01.04.02 - «теоретична фізика»**

Дисертаційна робота Апостолова С. С. присвячена дослідженню електромагнітних властивостей складних надпровідних структур, а саме, шаруватих систем, де надпровідні шари чергуються з тонкими діелектричними шарами і де між надпровідними шарами виникає джозефсонівський зв'язок. До таких структур можна віднести також високотемпературні купратні надпровідники, які мають шарувату кристалічну структуру і надпровідні характеристики яких є сильно анізотропними. Крім того, в роботі досліджено транспортні властивості надпровідних структур з слабкими зв'язками, до складу яких входять залізовмісні високотемпературні надпровідники з незвичайною симетрією куперівського спаровування.

Актуальність дисертації зумовлена тим, що в ній досліджуються властивості нових надпровідних матеріалів з високою критичною температурою і розробляються нові підходи щодо характеристики таких матеріалів. Також значна частина дисертації присвячена вивченню джозефсонівських плазмових хвиль, що виникають в шаруватих надпровідниках, і ефектів, пов'язаних з такими хвилями. Частоти джозефсонівських плазмових хвиль належать до терагерцового діапазону, який в нинішній час активно освоюється. При цьому нелінійність та анізотропія джозефсонівської плазми, що виникає у шаруватих надпровідниках, призводить до низки ефектів, таких як самоіндукована прозорість, нелінійна крос-поляризація, аномальна дисперсія саме в терагерцовому діапазоні.

Актуальність досліджень, які проведено в дисертаційній роботі Апостолова С. С., підтверджується також тим, що вони є складовою частиною проектів, які виконувались в рамках академічної тематики Відділення фізики і астрономії НАН України («Дослідження лінійних і нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених частинок», термін виконання 2007–2011 рр., «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами», термін виконання 2012–2016 рр., «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами», виконується з 2017р.), в рамках цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України

«Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій», проект «Теоретичні та і експериментальні дослідження властивостей періодичних і стохастичних модульованих наноструктур в оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному діапазонах спектру», термін виконання 2010–2014 рр., а також в рамках конкурсу спільних українсько-японських проектів Державного фонду фундаментальних досліджень, проект «Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів», термін виконання 2013 р.

Метою дисертаційної роботи є виявлення специфічних високочастотних електромагнітних властивостей систем на основі шаруватих надпровідників і опису різноманітних лінійних та нелінійних ефектів в таких системах, а також виявлення особливостей електронного транспорту у джозефсонівських системах на основі залізовмісних високотемпературних надпровідників.

Для вирішення поставлених у дисертації задач були використані метод аналітичного рішення нелінійних диференціальних рівнянь, квазікласичний метод ВКБ (Вентцеля – Крамерса – Бріллюена), метод трансфер-матриць, метод обчислення функцій Гріна у надпровіднику за допомогою рівнянь Узаделя, метод обчислення коефіцієнтів андреевського та нормального відбиття за допомогою рівнянь Боголюбова – де Жена, метод інтегралу зіткнень у квантово-кінетичному рівнянні Больцмана.

Дисертація С. С. Апостолова повністю відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота складається з семи розділів. Перший розділ присвячено огляду літератури, в якому стисло обговорено основні ефекти, що виникають у надпровідних системах, описано особливості куперовського спаровування в високотемпературних надпровідниках, викладено основні положення теорії джозефсонівських плазмових хвиль в необмеженому в просторі середовищі. В другому розділі досліджено електронний транспорт у надпровідних структурах, які містять звичайні надпровідники, залізовмісні надпровідники та двовимірні топологічні ізолятори. В третьому та четвертому розділах досліджено нелінійні ефекти, що виникають при проходженні електромагнітних хвиль через зразок шаруватого надпровідника. В п'ятому розділі в лінійному і нелінійному випадках вивчено дисперсію джозефсонівських плазмових хвиль в пластині шаруватого надпровідника. Шостий розділ дисертації присвячений дослідженню резонансних явищ, які виникають при збудженні джозефсонівських плазмових хвиль у шаруватих надпровідниках, таких як резонансна прозорість і резонансне поглинання. Також розглянуто подібні явища у фотонному кристалі з дефектом у вигляді пластини шаруватого надпровідника. В сьомому розділі досліджено високочастотні електромагнітні властивості шаруватого надпровідника, який поміщено у незмінне у часі магнітне поле.

Наукову новизну дослідження визначають наступні результати.

1. Отримано співвідношення між струмом та різницею фаз параметрів порядку берегів в ланцюгах, які включають звичайний надпровідник і залізовмісний надпровідник з s^{+-} або s^{++} -спаруванням, з'єднаних нормальним або феромагнітним дротом, і показано, що струм змінює знак, коли різниця фаз досягає деякого значення між 0 і π (0 - π перемикання). Для випадку феромагнітного дроту передбачено подвійне 0 - π перемикання.

2. Описано електронний транспорт між двома надпровідниками, з'єднаними за допомогою двовимірного топологічного ізолятора зі спин-орбітальною взаємодією з урахуванням багатократних андреєвських та нормальних відбиттів і електрон-домішкового розсіяння. Знайдено функції розподілу електронів за енергіями в топологічному ізоляторі в умовах такого транспорту.

3. Передбачено ефект самоіндукованої прозорості шаруватого ВТНП, який виникає внаслідок нелінійного зв'язку джозефсонівського струму та калібрувально-інваріантної різниці фаз параметра порядку. Теоретично показано, що прозорість шаруватого надпровідника може змінюватися у широких межах від майже непрозорості до повної прозорості при варіюванні амплітуди падаючої хвилі.

4. Сформульовано і обґрунтовано аналог принципу суперпозиції для нелінійних електромагнітних хвиль, що розповсюджуються через шаруваті надпровідники. З використанням цього принципу в нелінійному режимі описано явище крос-поляризації хвиль, що відбиваються від межі "шаруватий надпровідник – вакуум." Встановлено, що ступінь крос-поляризації залежить не тільки від кута падіння та частоти хвилі, а також від її амплітуди.

5. Показано, що джозефсонівські плазмові хвилі в пластині шаруватого надпровідника, надпровідні шари якого перпендикулярні поверхні пластини, мають аномальну дисперсію. Передбачено, що завдяки аномальній дисперсії у нелінійному режимі має місце явище, аналогічне явищу «зупинки світла» у нелінійній оптиці.

6. Передбачено ефект резонансної прозорості шаруватого надпровідника, який супроводжується збудженням джозефсонівських плазмових хвиль. Показано, що завдяки аномальній дисперсії коефіцієнт прозорості як функція кута падіння має два максимуми, в яких досягається повна прозорість.

7. Знайдено коефіцієнт прозорості фотонного кристалу, що містить дефект у вигляді пластини шаруватого надпровідника. Отримано дисперсійні співвідношення для електромагнітних мод, локалізованих на такому дефекті. Показано, що прозорість у забороненій зоні фотонного кристала істотно посилена за рахунок резонансного збудження локалізованих мод.

8. Теоретично показано, що за допомогою незмінного в часі магнітного поля можна

контролювати ступінь прозорості шаруватого надпровідника, керувати ефектом крос-поляризації та змінювати дисперсійні характеристики джозефсонівських плазмових хвиль, що розповсюджуються в пластині шаруватого надпровідника.

Результати, що представлені у дисертації, і її висновки є **обґрунтованими та достовірними**, оскільки вони отримані із застосуванням сучасних та добре апробованих методів теоретичної фізики, аналітичні результати підтверджено чисельними розрахунками, а також надано прозору фізичну інтерпретацію передбачених ефектів.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що розглянуті у дисертації надпровідні структури мають потенційне застосування при розробці складних схем із елементами, що базуються на ефекті Джозефсона, таких як інтерферометри, болометри, генератори когерентного випромінювання, фазоінвертори, елементи квантового комп'ютера. До того ж шаруваті надпровідники є потенційно цікавими для електроніки терагерцового діапазону, при розробці детекторів та фільтрів для терагерцових хвиль. Також нові методи, розроблені здобувачем, можуть бути застосовані для подальшого дослідження транспортних і високочастотних властивостей надпровідних структур.

Дисертація добре структурована і характеризується якісним науковим стилем викладу. Наукові результати належним чином опубліковані у **22 статтях** у фахових міжнародних і вітчизняних періодичних виданнях, в тому числі, у 8 статтях в журналі Physical Review B (імпаکت-фактор 3.81), а також пройшли переконливу апробацію на 17 вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Автореферат повністю відображає зміст і основи положення дисертаційної роботи.

До змісту дисертації і автореферату є такі зауваження:

1. В дисертації модель джозефсонівського плазмового середовища сформульована на прикладі штучної структури, яка складається з надпровідних і діелектричних шарів, що чергуються. Відповідно, параметри моделі, наприклад, джозефсонівська частота, наведено для такої структури. Потрібно було б також навести вирази цих параметрів для випадку, коли в якості шаруватих надпровідних структур розглядаються високотемпературні купратні надпровідники.

2. Вплив нормальної провідності вздовж і поперек надпровідних шарів на високочастотні характеристики шаруватих надпровідників має зростати, коли частота джозефсонівської плазмової хвилі є близькою до джозефсонівської плазмової частоти. Такий частотний діапазон розглянуто, наприклад, в розділі 5 при аналізі впливу нелінійності на дисперсію хвиль (різниця частот на рівні 0.1%). При цьому нормальну провідність не враховано. Потрібно було б вказати умови, при яких нормальною провідністю можна нехтувати.

3. При аналізі впливу незмінного в часі магнітного поля на дисперсійні характеристики джоуфсонівських плазмових хвиль розглянуто лише діапазон полів менших за критичне (поле, при перевищенні якого джоуфсонівські вихори проникають у шаруватий надпровідник). Було доцільним хоча б на якісному рівні проаналізувати зміну дисперсійних характеристик, якщо зовнішнє магнітне поле перевищить критичне.

4. В авторефераті в частині, де описано результати розділу 2 дисертації, не вказано, що означають використані параметри γ , γ_1 , і γ_2 .

Зазначені зауваження не впливають на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи.

Дисертація Апостолова С. С. є завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива проблема теоретичної фізики, а саме, побудовано теорію електромагнітного хвильового транспорту в структурах, що містять шаруваті надпровідники, зокрема, високотемпературні надпровідні купрати, а також теорію електронного транспорту в джоуфсонівських структурах на основі залізовмісних високотемпературних надпровідників.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, новизною та науковим значенням отриманих результатів, достовірністю і обґрунтованістю висновків дисертація "Електромагнітний та електронний транспорт у надпровідних структурах" задовольняє всім вимогам, які ставляться МОН України до докторських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 10 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів", а її автор, Апостолов Станіслав Сергійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник відділу
теорії конденсованого стану речовини
Інституту монокристалів НАН України



Філь Дмитро Вячеславович

Підпис д.ф.-м.н. Д.В.Філя засвідчую,
учений секретар
Інституту монокристалів НАН України
кандидат фіз.-мат. наук



Кулик Костянтин Миколайович