

## ВІДГУК

офіційного опонента Чабаненко В. В. на дисертаційну роботу ДОБРОВОЛЬСЬКОГО Олександра В'ячеславовича «*Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами*», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.22 – надпровідність

Сучасний стан світової експериментальної техніки дозволяє конструювати наноструктурні матеріали та пристрої, прецизійно маніпулювати їх елементами і проводити дослідження властивостей наноконструкцій. Такі можливості дозволили сформулювати по суті новий науковий напрямок пов'язаний з фізикою нанооб'єктів. Прикладом елементу наноконструкцій може служити графен, що володіє унікальною механічною міцністю, хорошою теплопровідністю і оптичною прозорістю, високочастотною провідністю практично без втрат енергії. Ці властивості роблять його перспективним для транзисторів, високошвидкісних підсилювачів наступного покоління, для мобільних телефонів і супутникового зв'язку, для ультра-чутливих біологічних датчиків, в екранах мобільних телефонів. Магнетизм нанопристроїв має перспективу застосувань в спінтроніці.

Дисертаційна робота Добровольського О. В. присвячена експериментальному і теоретичному дослідженню властивостей надпровідних плівок ніобію, з анізотропними пінінг-наноструктурами. Таке дослідження в новому науковому напрямку є *актуальним і своєчасним*, оскільки наноструктури створюють періодичний потенціал пінінгу і дозволяють ефективно впливати на резистивний відгук макроскопічного об'єкту - плівки. З *прикладної* точки зору це пов'язано з перспективами застосування наноструктурованих надпровідників в якості елементів обчислювальної та високочастотної техніки з високими струмонесучими параметрами і швидкодією.

Науковий інтерес до *фундаментальної проблеми* - динаміки вихорів у наноструктурованих надпровідниках, обумовлений великою кількістю динамічних режимів, які зазнає вихоровий ансамбль при нелінійному кросовері від запінінгованого стану до режиму вільної течії. Це пов'язано з тим, що зміна кожного із вхідних параметрів експерименту (величини постійного струму, амплітуди і частоти змінного струму) і температури по-своєму позначається на відгуці системи, у якій до того ж присутні анізотропія і, часто, асиметрія, яка спричинює так званий

ретчет-відгук, два типи якого досліджуються у дисертації. Саме тому зрозуміла недоступність дотепер точного теоретичного опису резистивного відгуку надпровідних плівок з двовимірними пінінг-структурами довільної форми і намагання з'ясувати особливості руху вихорів у простіших системах, які дозволяли би не тільки контролювати, а і керувати відгуком вихорів через фундаментальне розуміння впливу кожного з вхідних параметрів і температури на їх динаміку.

**Новизна дисертаційної роботи** полягає у тому, що в ній досліджуються спеціально приготовані модельні двовимірні пінінг-наноструктури типу пральної дошки, головною відмінністю яких від наноструктур, які використовуються у роботах інших авторів, є можливість теоретичного опису динаміки вихорів на основі рівняння Ланжевена для поодинокого вихора для вхідних параметрів довільної величини. Подальшою унікальною рисою даної дисертації є застосування дисертантом безмаскових технологій обробки поверхонь плівок фрезуванням канавок фокусованим пучком іонів і осадженням на поверхню плівок наносмужок кобальту під дією фокусованого пучка електронів. Це суттєво відрізняє асиметричні наноструктури, які застосовуються у дисертації, від тих, що створюються за допомогою літографії у роботах інших авторів і які не підходять для створення ретчет-структур типу пральної дошки.

**Актуальність** досліджень дисертанта також підтверджується тим, що вони виконані в рамках державних програм фундаментальних досліджень України “Дисипативний транспорт і впорядкування вихрової матерії у надпровідниках в умовах сильного сталого і змінного струмів”, номер держреєстрації 0109U001441, термін виконання 2009–2011 рр., “Транспортні властивості сильно корельованих анізотропних систем”, номер держреєстрації 0111U010546, термін виконання 2012–2014 рр. і “Фазові перетворення, явища переносу і електромагнітні процеси в гетерогенних конденсованих середовищах”, номер держреєстрації 0111U009545, термін виконання 2011–2015 рр.

У дисертацію Добровольського О.В. увійшли огляд літератури про сучасний стан знань стосовно динаміки вихорів у наноструктурованих надпровідниках та вісім розділів результатів власних оригінальних досліджень. У **другому** та **третьому розділах** досліджується теоретично вплив змінного струму довільної амплітуди і частоти на ретчет-відгук і поглинання потужності у надпровідній плівці з

косинусоїдальним і, відповідно, асиметричним потенціалом пінінгу типу пральної дошки при скінченних температурах. Виявлено, що асиметрія потенціалу пінінгу, яку привносить постійний струм, призводить до ретчет-ефекту. Встановлено, що конкуренція внутрішньої і привнесеної струмом асиметрії потенціалу пінінгу призводить до інверсії ретчет-ефекту. У **четвертому розділі** виявлено можливі застосування передбачених теоретично ефектів у надпровідних приладах, зокрема генераторі імпульсів, фільтрі, перетворювачі частоти і стохастичному підсилювачі, та встановлено вимоги до їх робочих параметрів. У **п'ятому розділі** аргументовано вибір експериментальної системи та встановлено придатність безмаскових нанотехнологій, а саме фрезування поверхні плівки фокусованим пучком іонів та осадження кобальту під дією фокусованого пучка електронів, до створення симетричних та асиметричних пінінг-наноструктур з формою пральної дошки. У **шостому розділі** досліджується направлений рух вихорів (гайдінг вихорів) з регульованою інтенсивністю, що досягається шляхом припасування положень вихорів відносно каналів ландшафту пінінгу завдяки залежності відстані між вихорами від величини магнітного поля. У **сьомому розділі** проаналізовано характеристики устаткування для комбінованих вимірювань електричної напруги і поглинання потужності високочастотного струму у тонких плівках при низьких температурах за нерезонансним методом широкосмугової спектроскопії. Встановлено залежність постійного струму депінінгу від амплітуди і частоти високочастотного струму. У **восьмому розділі** виявлено особливості у поглинанні потужності у плівках ніобію з симетричними та асиметричними наноканавками. Встановлено залежність частоти депінінгу від величини постійного струму та створено високочастотний фільтр, який можна переналаштовувати зміною як величини, так і полярності постійного струму. Нарешті, у **дев'ятому розділі** досліджується динаміка вихорів у плівках ніобію, декорованих наносмужками кобальту і ефекти просторової близькості у нанорозмірних гетеросистемах надпровідник-ферромагнетик.

*Достовірність* отриманих результатів та їх *обґрунтованість* не викликають сумнівів. Отримані автором аналітичні результати ретельно проаналізовані на основі механістичного уявлення про рух вихора у схиленому періодичному потенціалі. Присутність передбачених нових рис у ретчет-відгуці (поява випрямленої напруги та

фазо-синхронних торочок) підтверджуються наближеними розв'язками рівняння руху вихора при нульовій температурі у граничних випадках низьких і високих частот (розділи 2.3.1, 2.3.2 і 3.3.1). Вражає широкий спектр експериментальних методів і технологій, які були застосовані дисертантом в експериментальній частині роботи, що підкреслює комплексність і повноту проведеного дослідження. Усюди, де це можливо, автор порівнює власні дані з результатами інших авторів, а якщо таке порівняння неможливе, то проводить ретельний аналіз нових ефектів з наголосом на механізмах, які лежать у основі того чи іншого ефекту.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у тому, що контрольовані пінінг, гайдінг вихорів, ретчет-ефект і його інверсія являють собою основні механізми керування динамікою вихорів у надпровідних флуксонних приладах, а саме: високочастотних фільтрах, генераторах імпульсів, перетворювачах частоти і стохастичних підсилювачах, принцип дії яких запропоновано у дисертації. У дисертації були створені високочастотні фільтри, частоту зрізу яких можна переналаштовувати зміною як величини, так і полярності постійного струму. Створено флуксонний метаматеріал з певними рівнями поглинання потужності, який може знайти застосування у надпровідних трансмісійних лініях і високочастотних приладах.

Наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі Добровольського О.В. є дуже важливими та корисними для наукової спільноти взагалі та для співробітників інститутів НАН України і університетів МОН України за цим науковим напрямком досліджень, таких як Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна МОН України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Інститут магнетизму НАН України та МОН України (м. Київ), Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ), Інститут радіоелектроніки НАН України (Харків), Національний університет «Львівська політехніка» МОН України.

Мені хотілось би відзначити ще такі два важливі моменти. Дисертант побудував складне високочастотне криогенне устаткування для комбінованих вимірювань електричної напруги і поглинання потужності у надпровідних плівках за методом

широкосмугової спектроскопії. Саме це надало змогу дисертанту поєднати у своїх дослідженнях два експериментальних напрямки, які до останнього часу розвивалися майже незалежно один від одного. Так, дослідження динаміки вихорів у надпровідниках до останнього часу не проводилися для наноструктурованих надпровідників. Водночас, динаміка вихорів у наноструктурованих надпровідниках майже ніколи не досліджувалася в одночасній присутності постійного і змінного струму. Іншим вирішальним моментом у дисертації є застосування епітаксіальних плівок ніобію і високоякісних, квазі-тривимірних періодичних пінінг-наноструктур, що, по-перше, призвело до домінування анізотропного пінінгу над ізотропним і, по-друге, дозволило використати геометричний збіг періодичної решітки Абрикосова з періодичною наноструктурою для приведення динаміки вихорів у когерентний режим, так що рух повного ансамблю вихорів стало можливо описувати у термінах руху поодинокого вихора.

Серед значної кількості нових ефектів, які обговорюються у дисертації, хотілося виділити своєю оригінальністю надпровідний ефект близькості далекої дії у феромагнітному кобальті. Вважаю, що дослідження динаміки вихорів у надпровідно-феромагнітних гетеросистемах мають великий потенціал для таких нових областей досліджень, як надпровідна спінтроніка, у якій бездисипативний стан надпровідника можна було би комбінувати з магнітним станом феромагнетика.

Вважаю, що дисертаційна робота Добровольського О.В. є *цілісною й завершеною науково-дослідницькою роботою* як за змістом, так і з обсягом.

Дисертація написана хорошою науковою мовою і оформлена відповідно до вимог ДАК МОН України до дисертацій.

Автореферат відображає основний зміст і структуру дисертації.

Положення і результати, які виносилися до захисту кандидатської дисертації, не виносяться до захисту докторської дисертації.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні *зауваження*:

1. При огляді літератури в першому розділі зазначається, що направлений рух вихорів досліджувався у високотемпературних надпровідниках з односпрямованими дефектами. Вважаю, що у розділі 5 при обґрунтуванні вибору експериментальної системи було би доцільно зауважити, чому саме такі системи не розглядалися у якості експериментальних зразків. Якщо би не вдалося забезпечити умову

домінування анізотропного пінінгу над ізотропним у ніобії, до яких надпровідників як альтернативи можна було би звернутися?

2. У розділі 3 стверджується, що конкуренція внутрішньої асиметрії потенціалу пінінгу і його зовнішньої асиметрії, яка привноситься постійним струмом, призводить до інверсії ретчет-ефекту. У висновках до розділу 3 стверджується, що такий сценарій може якісно пояснити інверсію ретчет-ефекту у роботі В. Jin *et al.*, Phys. Rev. B. **81**, 174505 (2010), тоді як кількісне порівняння не можливе завдяки різним формам потенціалу пінінгу. Проте, вважаю, що дисертант міг би навести результати для зразка з асиметричною пінінг-наноструктурою у розділі 8 при низьких частотах, щоб показати, як відбувається зміна знаку ретчет-напруги у плівках ніобію з асиметричними пінінг-наноструктурами типу пральної дошки. Якщо таких даних нема, то це зауваження є побажанням для подальшої роботи.

3. У розділах 7 і 8 головні експериментальні результати доповідаються для величини магнітного поля, яке відповідає конфігурації фундаментального збігу положень вихорів з каналами потенціалу пінінгу. Вважаю, що можна було би навести хоча б один графік для ситуації, коли вихори рухаються некогерентно, щоб показати, як швидко ефекти зникають при відхиленні від фундаментальної конфігурації.

4. В роботі подекуди спостерігаються друкарські помилки, пов'язані з непереходом в мовах при друкуванні на клавіатурі (наприклад, стор 37, 40).

5. Окремі посилання в кінці дисертації починаються з прізвищ перших авторів, а інші з назв робіт.

6. Перекладати прізвища іноземних авторів в тексті роботи на мою думку не варто, оскільки переклад часто буває неоднозначним.

## **ВИСНОВОК**

Зауваження до роботи, що зазначені вище, не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертації Добровольського О. В. «Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами». Те, що дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, не викликає сумніву. А саме: у дисертації вирішено важливу проблему фізики надпровідників, яка полягає у встановленні закономірностей у динаміці вихорів і надпровідних плівок з анізотропним пінінгом, тобто головну мету дисертаційного дослідження досягнуто і

отримано низку нових і обґрунтованих результатів. Результати і положення дисертації повністю опубліковані в 25 статтях в фахових журналах. Крім того, отримані у дисертації результати апробовані та обговорені на міжнародних наукових конференціях (23 тез доповідей). У авторефераті послідовно і повністю викладено основні положення дисертації.

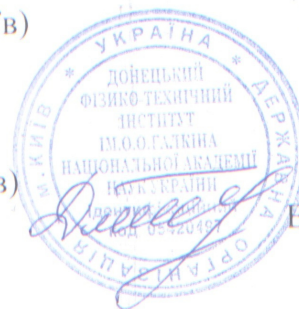
Вважаю, що з врахуванням актуальності теми дослідження, кількості опублікованих за темою дисертації наукових робіт, практичного та наукового значення та новизни отриманих результатів дисертація Добровольського О.В. «Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами» є завершеною науковою роботою високого рівня, відповідає паспорту спеціальності 01.04.22 та задовольняє всім вимогам, що ставляться до докторських дисертацій, зокрема пп. 9, 10 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника" і вимогам Департаменту по атестації кадрів Міністерства освіти і науки України, а її автор, *беззаперечно, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.22 – надпровідність.*

Офіційний опонент –  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
завідувач відділу надпровідності і тунельної  
спектроскопії Донецького фізико-технічного  
інституту ім. О. О. Галкіна НАН України (м. Київ)



В.В. Чабаненко

Підпис В.В. Чабаненка засвідчую.  
Вчений секретар ДонФТІ НАН України, (м. Київ)  
кандидат технічних наук



В.Ю. Дмитренко