

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. Веркіна**

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Олександр В'ячеславович



УДК 538.945

**НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ВИХОРИВ
У НАДПРОВІДНИХ ПЛІВКАХ НІОБІЮ
З АНІЗОТРОПНИМИ ПІНІНГ-НАНОСТРУКТУРАМИ**

01.04.22 — надпровідність

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків — 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна МОН України, м. Харків.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Шкловський Валерій Олександрович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна МОН України (м. Харків),
професор кафедри теоретичної фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Касаткін Олександр Леонідович,
Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова
НАН України (м. Київ), провідний науковий
співробітник відділу надпровідності

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Чабаненко Віктор Васильович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О. О. Галкіна НАН України (м. Київ),
завідувач відділу надпровідності
і тунельної спектроскопії

доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України, професор
Ямпольський Валерій Олександрович,
Інститут радіофізики і електроніки
імені О. Я. Усикова НАН України (м. Харків),
завідувач відділу теоретичної фізики

Захист відбудеться «**31**» **травня** 2016 р. о **15:00** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розіслано «**5**» **квітня** 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03
кандидат фізико-математичних наук



Юзефович О. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження нелінійної динаміки вихорів у надпровідних плівках з періодичними наноструктурами є перспективним з точок зору як фундаментальної, так і прикладної науки, адже такі наноструктури створюють періодичний потенціал пінінгу і дозволяють ефективно впливати на резистивний відгук плівки. З прикладної точки зору це означає зменшення енергоспоживання, підвищення швидкодії і можливість мініатюризації надпровідних приладів — тобто перспективи для трансмісійних ліній, резонаторів, детекторів і квантових комп'ютерів тощо, — що зумовлює невпинно зростаючий інтерес до вивчення вихрового стану у наноструктурованих надпровідниках. З академічної точки зору рух вихорів у наноструктурах характеризується великою кількістю динамічних режимів, які зазнає вихоровий ансамбль при нелінійному кросовері від запінінгованого стану до режиму вільної течії. Адже 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. Саме тому стають зрозумілими недоступність 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. У цьому аспекті двовимірні пінінг-наноструктури типу пральної дошки, які застосовуються у дисертації, відрізняються від інших систем тим, що динаміку вихорів у їх присутності може бути точно описано теоретично. Такий опис можливий у рамках феноменологічного підходу на основі рівняння Ланжевена для поодинокого вихора і вхідних параметрів довільної величини. До того ж, експериментальна реалізація відповідних пінінг-структур не тільки можлива, а і технологічна, тим більше що й безмаскові методи їх виготовлення за допомогою фокусованих пучків іонів та електронів було розвинуто у ході виконання дисертаційного дослідження. Зокрема, такі технології добре підходять для створення ретчет-наноструктур типу пральної дошки, які неможливо отримати літографічними методами. Водночас, вплив самого процесу створення наноструктури на структурні і резистивні властивості надпровідних плівок залишався до останнього часу нез'ясованим. Отже, висвітлення цього аспекту у дисертації не тільки актуально у контексті дослідження пінінгу і динаміки абрикосівських вихорів, але й важливо для розвитку нанотехнологій у цілому. Нарешті, існують подальші системи у фізиці конденсованих середовищ, які підлягають опису на основі рівняння Ланжевена і на які ефекти динаміки вихорів, що завбачено і спостережено у дисертації, можуть бути спроектовані. Зокрема, це спінові текстури, що відомі як скірміони, теоретичний опис динаміки яких вже було певною мірою стимульовано результатами даної дисертації. Таким чином, актуальність дисертаційної роботи обумовлена як фундаментальним інтересом експериментального і теоретичного дослідження нелінійної динаміки вихорів у надпровідних плівках з періодичними пінінг-наноструктурами, так і перспективами їх застосування у якості елементів обчислювальної та високочастотної надпровідної техніки з високими струмонесучими параметрами і швидкодією.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі фізики низьких температур фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Дисертаційна робота виконувалась у рамках державних програм фундаментальних досліджень України “Дисипативний транспорт і впорядкування вихрової матерії у надпровідниках в умовах сильного сталого і змінного струмів”, номер державної реєстрації 0109U001441, термін виконання 2009–2011 рр., “Транспортні властивості сильно корельованих анізотропних систем”, номер державної реєстрації 0111U010546, термін виконання 2012–2014 рр. і “Фазові перетворення, явища переносу і електромагнітні процеси в гетерогенних конденсованих середовищах”, номер державної реєстрації 0111U009545, термін виконання 2011–2015 рр.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей у динаміці вихорів під дією постійного і змінного струмів у надпровідних плівках ніобію з періодичними пінінг-наноструктурами типу пральної дошки. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

Теоретично

- проаналізувати резистивні відгуки і поглинання потужності у надпровідних плівках з симетричним та асиметричним потенціалом пінінгу типу пральної дошки як функції величини постійного струму, амплітуди і частоти змінного струму та температури;
- визначити можливі застосування передбачених ефектів у надпровідних приладах, зокрема перетворювачах частоти, фільтрах, генераторах імпульсів, модуляторах і підсилювачах.

Експериментально

- створити зразки, які відповідають модельній системі, що вивчено теоретично, та дослідити їх структурні і надпровідні властивості;
- провести вимірювання магніторезистивного відгуку у плівках з симетричними пінінг-наноструктурами з ландшафтом пральної дошки;
- побудувати устаткування для вимірювання електричної напруги і поглинання потужності при протіканні через зразок постійного і високочастотного струмів;
- провести вимірювання електричної напруги і поглинання потужності у плівках з симетричними та асиметричними пінінг-структурами типу пральної дошки;
- з'ясувати вплив амплітуди і частоти високочастотного струму на струм депінінгу та вплив постійного струму на поглинання потужності і на частоту депінінгу у плівках з симетричними та асиметричними пінінг-структурами типу пральної дошки.

Об'єктом дослідження є ансамбль абрикосівських вихорів, динамікою якого визначаються резистивний відгук і поглинання потужності високочастотного струму. Анізотропна нелінійна двовимірна динаміка вихрового ансамблю у тонких плівках ніобію з періодичними пінінг-наноструктурами являє собою *предмет дослідження* даної дисертації.

Методи дослідження. Теоретична частина дослідження та обробка експериментальних даних виконувалися дисертантом на кафедрі фізики низьких температур фізичного факультету ХНУ імені В. Н. Каразіна. Зокрема, теоретичний опис нелінійної динаміки вихорів у надпровідних плівках з періодичним потенціалом пінінгу проводився на основі рівняння Ланжевена, що розглядалося у наближенні поодинокого вихора. Аси-

метричний і симетричний потенціали пінінгу моделювалися гармонічними функціями. Рівняння Ланжевена розв'язували методом матричних ланцюгових дробів. Граничні випадки низьких і високих частот змінного струму розглядалися також окремо при нульовій температурі у термінах елементарних функцій і функцій Бесселя відповідно. Числове моделювання резистивних відгуків і поглинання потужності проводилося за допомогою власноруч написаного коду у системі комп'ютерної алгебри Maple.

Експериментальна частина роботи виконувалася автором під час його наукового стажування у Й. В. Гете-університеті м. Франкфурт-на-Майні, ФРН. Епітаксціальні плівки ніобію напилювалися за методом магнетронного розпилення. Чотирьохконтактні містки та мікросмужкові лінії для електричних вимірювань формувалися фотолітографією у поєднанні з видаленням залишків ніобію бомбардуванням іонами галію. Епітаксію плівок виявляли за методом дифракції швидких електронів (RHEED). Кристалічну структуру плівок досліджували за методом дифракції рентгенівського випромінювання (XRD). Морфологію плівок і наноструктур інспектували в атомно-силовому мікроскопі (AFM). Наноструктури виготовляли у скануючому електронному мікроскопі (SEM) фрезуванням поверхні плівки фокусованим пучком іонів (FIB) або осадженням на неї кобальту з органометалічного прекурсору $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ під дією фокусованого пучка електронів (FEBID). Локальний елементний склад плівок визначали за методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX). Вимірювання електричного опору на постійному струмі проводили переважно за звичайним чотирьохзондовим методом у режимі заданого струму. Окремі експерименти проводили у восьмиконтактній геометрії, яка дозволяла одночасно прикладати до зразка компоненти струму у двох перпендикулярних напрямках, так що вектор повного струму міг обертатися. Вимірювання поглинання потужності на високих частотах проводили за нерезонансним методом широкосмугової спектроскопії векторним аналізатором електричних схем. Усі низькотемпературні вимірювання відбувалися у кріостаті та керувалися за допомогою комп'ютера, на якому також зберігали масиви здобутих даних для їх подальшої обробки.

Достовірність отриманих результатів і висновків, сформульованих в дисертації, забезпечена застосуванням добре апробованих методів вимірювань, урахуванням похибок вимірювань, а також підтвердженням окремих експериментальних спостережень іншими авторами і виконанням граничних переходів до раніше відомих результатів у теоретичній частині роботи.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертації отримано низку принципово нових, науково обґрунтованих результатів щодо впливу пінінг-наноструктур з ландшафтом типу пральної дошки на резистивний відгук і поглинання потужності високочастотного струму у надпровідних плівках ніобію. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. Виявлено, що асиметрія потенціалу пінінгу, яку привносить постійний струм, призводить до ретчет-ефекту. Встановлено, що конкуренція внутрішньої і привнесеної струмом асиметрій потенціалу пінінгу призводить до інверсії ретчет-ефекту.
2. Виявлено можливі застосування передбачених теоретично ефектів у надпровідних приладах, зокрема генераторі імпульсів, фільтрі, перетворювачі частоти і стохастичному підсилювачі. Встановлено вимоги до їх робочих параметрів.

3. Виявлено оптимальні умови напилювання епітаксialьних плівок Nb (110) на підкладки Al_2O_3 (11 $\bar{2}$ 0) за методом магнетронного розпилення: температура підкладки 850°C, тиск аргону 4×10^{-3} мбар, швидкість напилювання 0.5 нм/с. Встановлено “чистий” надпровідний режим у таких плівках з товщинами близько 50 нм.
4. Встановлено придатність безмаскових нанотехнологій, а саме фрезування поверхні плівки фокусованим пучком іонів та осадження кобальту з метало-органічного прекурсору $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ під дією фокусованого пучка електронів, до створення симетричних та асиметричних пінінг-наноструктур з формою пральної дошки.
5. З'ясовано вплив іонів галію на структурні і резистивні властивості плівок ніобію з наноканавками. Виявлено гайдінг вихорів з регульованою інтенсивністю та серію полів збігу. Встановлено інтенсивність пінінгу у різних частинах зразка, і виявлено її кореляцію зі структурними властивостями плівок.
6. Створено 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.
7. 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.
8. Виявлено, що з даних про зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму можна визначити координатну залежність потенціалу пінінгу. Це являє собою фізичну основу для нового методу неруйнівної характеристики пінінгу у надпровідниках. Створено флюксонний метаматеріал з квантованими рівнями поглинання потужності.
9. Виявлено ряд ефектів, що пов'язані з впорядкуванням і гайдінгом вихорів, зокрема, анізотропію магніторезистивного відгуку, серію магнітних полів збігу і анізотропію критичного струму у плівках ніобію, декорованих наносмужками кобальту. Виявлено надпровідний ефект близькості у нанорозмірних кобальтових структурах, і розроблено технологію модифікації їх локальних структурних і магнітних властивостей.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному. Теоретичні результати дисертації дозволяють провести кількісний опис ефектів, що спостерігаються експериментально у надпровідниках з періодичним потенціалом пінінгу. Контрольовані пінінг і гайдінг вихорів, ретчет-ефект і його інверсія являють собою основні механізми керування динамікою вихорів у надпровідних флюксонних приладах, а саме: високочастотних фільтрах, генераторах імпульсів, перетворювачах частоти і стохастичних підсилювачах. Запропонований метод визначення координатної залежності потенціалу пінінгу з даних про зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму є важливим для неруйнівної характеристики пінінгу у надпровідниках. Технології створення пінінг-наноструктур у плівках за допомогою фокусованих пучків іонів та електронів являють собою нові безмаскові методи виготовлення наноструктурованих надпровідників. У ході виконання дисертації було створено високочастотні фільтри, які можна переналаштовувати зміною як величини постійного струму, так і його полярності.

Особистий внесок здобувача. Автор брав безпосередню участь на всіх етапах проведеної роботи, а саме: при формулюванні експериментальних завдань, виготовленні і характеризації плівок, виготовленні наноструктур, проведенні вимірювань, розробці та виготовленні високочастотної кріогенної вставки, аналізі експериментальних даних, а також числовому моделюванні експериментальних залежностей на основі розв'язку рівняння Ланжевена у термінах матричних ланцюгових дробів. При написанні наукових статей і підготовці тез доповідей і презентацій на конференціях вклад дисертанта грав вирішальну роль. Здобувачем сформульовані та обґрунтовані висновки і положення за розділами, підсумкові висновки і узагальнення.

Результати досліджень, що викладаються у дисертаційній роботі, оприлюднені в експериментальних [1–3, 5, 6, 10, 12, 15, 16, 20–26] і теоретичних [4, 7–9, 11, 13, 14, 17–19, 27] роботах. Конкретний внесок дисертанта у ці роботи полягає у наступному. У статтях [1, 3] дисертант провів електричні вимірювання магніторезистивного відгуку у плівках ніобію, декорованих наносмужками кобальту, та виявив анізотропію струму депінінгу [1] і серію полів збігу [3]. У роботі [2] автор виявив оптимальні геометрії наноструктур і параметри фокусованих пучків іонів та електронів у скануючому електронному мікроскопі. У статті [6] здобувачем проведено систематичне дослідження впливу параметрів розпилення на кристалічну структуру і резистивні властивості епітаксціальних плівок ніобію. У роботах [5, 10, 12] здобувач дослідив резистивні властивості плівок ніобію з фрезованими наноканавками. У роботі [5] дисертант виявив різницю у критичних струмах для руху вихорів проти розлогих і крутих схилів наноканавок, тобто головну рису асиметричного потенціалу пінінгу. У роботах [10, 12] автором було проведено комплексне дослідження впливу наноструктур на резистивні властивості плівок у нормальному і надпровідному стані, виявлено поля збігу, анізотропію струму депінінгу, досліджено ефект направлено руху вихорів у симетричному потенціалі пінінгу типу пральної дошки та з'ясовано механізми пінінгу, що керують динамікою вихорів у такій системі. У роботі [20] дисертант побудував кріогенну вставку для високочастотних вимірювань і з'ясував її характеристики. У роботах [15, 16, 22, 23] дисертант проводив аналіз експериментальних даних і писав тексти наукових статей. Вплив постійного і квазістатичного струму на поглинання потужності у режимі високих частот досліджувався здобувачем у роботах [24, 25], де було спостережено зменшення частоти депінінгу [24] і модуляцію поглинання потужності [25]. У теоретичних роботах [4, 7–9, 11, 13, 14, 17–19, 27] дисертантом здійснено комп'ютерне моделювання резистивних відгуків за допомогою власноруч написаного коду у системі комп'ютерної алгебри Maple та проведено фізичний аналіз передбачених залежностей як функцій температури і вхідних параметрів експерименту. Таким чином, особистий внесок автора дисертації у виконанні поставлених завдань є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на наступних міжнародних конференціях та симпозиумах: 2nd Int. Conf. Supercond. Magnet. “ICSM 2010”, 25–30 April 2010, Antalya, Turkey; “Cryoconference 2010”, 9–16 Sept. 2010, Kosice, Slovakia; Int. Conf. Nanoscale Magnet. “ICNM 2010”, 28 Sept. – 2 Oct. 2010, Istanbul, Turkey; Appl. Phys. Mater. Science Congress “APMAS 2011”, 12–15 May 2011, Antalya, Turkey; 7th Int. Conf. Vortex Matter Nanostruct. Supercond. “VORTEX VII”, 10–17 Sept. 2011, Rhodes, Greece; 10 Europ. Conf. Appl. Supercond. “SCC 2011”, 19–23 Sept. 2011, Den Haag,

Netherlands; 25th Int. Symp. Supercond. "ISS 25", 3–5 Dec. 2012, Tokyo, Japan; DPG Spring Meeting, 10–15 March 2013, Regensburg, Germany; 4th Int. Conf. for Young Scient. "LTP-2013", 3–7 June 2013, Kharkiv, Ukraine; 11th Europ. Conf. Appl. Supercond. "EUCAS 2013", 15–19 Sept. 2013, Genova, Italy; 8th Int. Conf. Vortex Matter Nanostruct. Supercond. "VORTEX VIII", 21–26 Sept. 2013, Rhodes, Greece; Int. Conf. Electron Correl. Nanostruct. "ECN 2013", 3–6 Oct. 2013, Yalta, Ukraine; 4th Int. Conf. Supercond. Magnet. "ICSM 2014", 27 April – 2 May 2014, Antalya, Turkey; Int. Workshop Adv. Nanostruct. Supercond. "ANS 2014", 4–7 May 2014, Miraflores de la Sierra, Spain; 5th Intern. Conf. Young Scient. "LTP-2014", 2–6 June 2014, Kharkiv, Ukraine; 5th Workshop Focused Electron Beam Induced Processing "FEBIP 2014", 22–24 July 2014, Frankfurt/M, Germany; Int. Workshop "VORTEX 2015", 10–15 May 2015, El Escorial, Spain; 12th Europ. Conf. Appl. Supercond. "EUCAS 2015", 6–10 Sept. 2015; 9th Int. Conf. Vortex Matter Nanostruct. Supercond. "VORTEX IX", 12–17 Sept. 2015, Rhodes, Greece.

Публікації. Результати дисертації оприлюднені у 50 публікаціях: 25 статтях у провідних фахових міжнародних періодичних виданнях [1-6, 8-26] (з них [21] і [26] без співавторів), 1 колективній монографії [7], 1 навчальному посібнику для студентів фізичних спеціальностей (з грифом МОН України) [27] і 23 тезах у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій [28–50].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, огляду літератури, восьми розділів оригінальних досліджень, висновків, додатку і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 288 сторінок, з них 246 сторінок основного тексту. Дисертація містить 101 рисунок і 7 таблиць, що не займають окремих сторінок, та список використаних джерел з 451 найменувань на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** дисертації обґрунтовано актуальність теми, визначено мету й задачі досліджень та методи їх досягнення, сформульовано основні положення і результати роботи, їх наукова новизна і практичне значення, наведено дані про особистий внесок дисертанта, апробацію результатів дисертації, публікації та описано структуру дисертації.

Перший розділ містить огляд літератури за темою дисертації. В ньому представлено короткий опис експериментальних та теоретичних робіт з дослідження нелінійної динаміки вихорів у надпровідниках, а також встановлюється місце проведеного у дисертації дослідження серед вже розв'язаних задач. Звернено увагу на стан теоретичного опису нелінійної динаміки вихорів у наноструктурованих надпровідниках. Зокрема, наголошується, що динаміку вихорів у надпровідних плівках з пінінг-наноструктурами типу пральної дошки у присутності постійного і змінного струмів може бути описано аналітично при скінченній температурі на основі точного рішення рівняння Ланжевена для поодинокого вихора. Зазначається, що до початку виконання дисертаційного дослідження не існувало експериментальних робіт, які відповідають цієї моделі, що саме і зумовило необхідність проведення даної роботи. Крім того, підкреслюються особливості застосування фокусованих пучків електронів та іонів для безмаскової обробки поверхонь. Розділ 1 закінчується переліком основних завдань дослідження, які виконуються у дисертації і дозволяють підняти на якісно вищий рівень розуміння динаміки вихорів в анізотропних пінінг-наноструктурах у присутності комбінації постійного і змінного струмів.

У **другому розділі** досліджується теоретично вплив змінного струму довільної амплітуди і частоти на ретчет-відгук і поглинання потужності у надпровідній плівці з косинусоїдальним потенціалом пінінгу типу пральної дошки при скінченних температурах. Задача розглядається у наближенні поодинокого вихора, на основі точного розв'язку рівняння Ланжевена у термінах матричних ланцюгових дробів. Вирази для напруженості електричного поля і поглинання потужності аналізуються як функції амплітуди і частоти змінного струму, величини постійного струму і температури у широкому діапазоні відповідних безрозмірних параметрів. Окрему увагу приділяється фізичній інтерпретації завбачених ефектів у квазістатичному і високочастотному режимі для нульової температури та їх порівнянню з точними результатами. Результати цього розділу оприлюднені у журнальних статтях [4, 9].

Рух вихора зі швидкістю v у магнітному полі $\mathbf{B} = n\mathbf{B}$, де $B \equiv |\mathbf{B}|$ і $n = nz$, а z — орт вздовж осі z і $n = \pm 1$, аналізується на основі рівняння Ланжевена, яке має вигляд

$$\eta \mathbf{v} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{th}, \quad (1)$$

де η — вихрова в'язкість, $\mathbf{F}_L = n(\Phi_0/c)\mathbf{j} \times \mathbf{z}$ — сила Лоренца, Φ_0 — квант магнітного потоку і c — швидкість світла. Тут $\mathbf{j} = \mathbf{j}(t) = \mathbf{j}^{dc} + \mathbf{j}^{ac} \cos \omega t$, де \mathbf{j}^{dc} і \mathbf{j}^{ac} — вектори густини постійного та амплітуди змінного струму, відповідно, а ω — кутова частота. В рівнянні (1) $\mathbf{F}_p = -\nabla U_p(x)$ — сила анізотропного пінінгу, а $U_p(x) = (U_p/2)(1 - \cos kx)$ — періодичний потенціал пінінгу з $k = 2\pi/a$, де U_p і a — його глибина і період відповідно. Нарешті, \mathbf{F}_{th} — термофлуктуаційна сила, що моделюються гаусовим білим шумом.

Для розв'язування рівняння (1) вводяться безрозмірні параметри: густина постійного струму $\xi^d = j^d/j_c$ і густина амплітуди змінного струму $\xi^a = j^a/j_c$, де $j^{a,d} = |j^{ac,dc}|$ і $j_c = cU_p k/2\Phi_0$ — густина струму депінінгу, що відповідає зникненню бар'єрів потенціалу, частота $\Omega = (2\eta/U_p k^2)\omega$, де $\omega_p \equiv 1/\hat{\tau} = U_p k^2/2\eta$ — частота депінінгу ($\hat{\tau}$ — час релаксації вихора), координата $x = kx$ та обернена температура $g = U_p/2T$. Величинами, що спостерігаються експериментально, є поглинання потужності і напруга, які аналізуються у термінах безрозмірних поглинання потужності \mathcal{P} одиниці об'єму зразка і компонент напруженості електричного поля E . Аналітично E і \mathcal{P} визначаються через ефективну нелінійну рухливість вихорів $v \equiv v(\xi^d, \xi^a, \Omega, g)$, яка виражається у термінах матричних ланцюгових дробів. У розділі насамперед розглядається залежність постійної напруги від амплітуди і частоти змінного струму (так звана вольт-амперна ретчет-характеристика), а також пояснюється її походження у граничних випадках низьких і високих частот на основі розв'язку рівняння (1) при нульовій температурі у термінах елементарних функцій і функцій Бесселя відповідно. У розділі отримано серію принципово нових теоретичних результатів, зокрема, з'ясовано залежність струму депінінгу від частоти змінного струму, завбачено фазо-синхронні торочки у ретчет-напрузі при високих частотах змінного струму, а також проаналізовано появу сингулярності в резистивності при $\xi_s^d = \sqrt{1 + \Omega^2}$ і $\xi^a \rightarrow 0$, що призводить до її негативних значень поблизу ξ_s^d . Розглянемо ретчет-напругу для руху вихорів поперек каналів потенціалу пінінгу більш детально.

На рис. 1(b) представлено залежності постійної напруги від амплітуди змінного струму для ряду значень постійного струму ξ^d і частоти $\Omega = 1$ згідно з точним розв'язком рівняння Ланжевена (1) у термінах матричних ланцюгових дробів. Графік на рис. 1(b) є центральним для подальшого аналізу і містить декілька важливих рис. По-перше, для

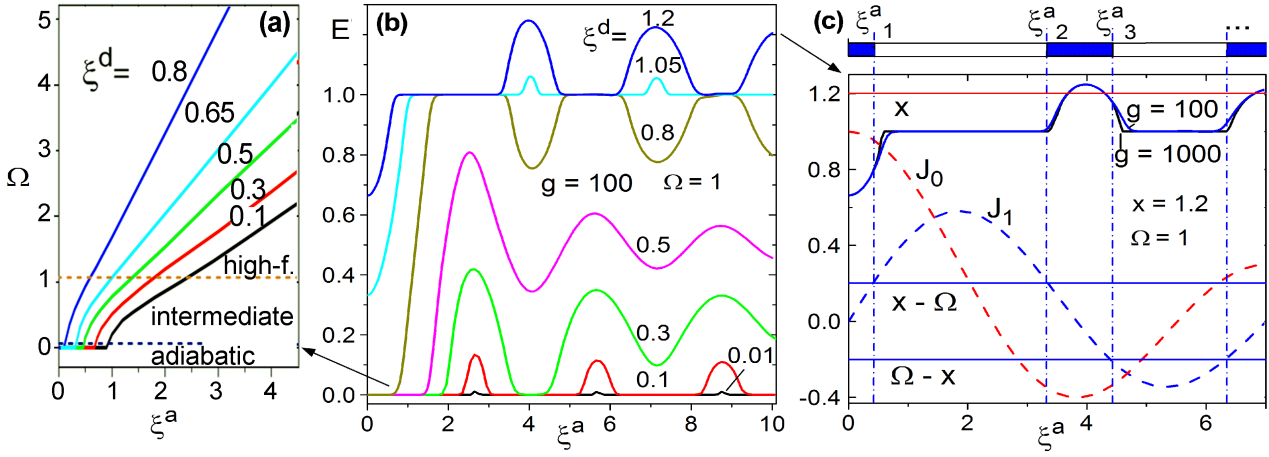


Рис. 1. (a) Співвідношення між густиною змінного струму депінінгу ξ^a , частотою Ω і густиною постійного струму ξ^d . (b) Ретчет-відгук E як функція густини амплітуди змінного струму ξ^a для частоти змінного струму $\Omega = 1$ і ряду густин постійного струму ξ^d . (c) Функції Бесселя $J_0(\xi^a)$ і $J_1(\xi^a)$ (пунктир) поруч з прямими $\xi^d = 1.2$ і $\xi^d - \Omega = \pm 0.2$ за рівнянням (3). Фазо-синхронні торочки в $E(\xi^a)$ при $\Omega = 1$, $\xi^d = 1.2$ і $g = 100$ відповідають білим сегментам на стрічці зверху, де ξ_i^a — корні рівняння (3) для $n = 0$ і $n = 1$. Границі торочок за наближеним розв'язком добре співвідносяться з точними результатами для дуже низьких температур ($g = 1000$).

$\xi^d < 1$ криві мають певне плато, протяжність якого за ξ^a зменшується по мірі зростання ξ^d , див. також рис. 1(a). При збільшенні частоти протяжність бездисипативного плато зростає. По-друге, усі фазо-синхронні торочки у ретчет-напрузі осцилюють і загасають на рівні $E^d/\xi^d = 1$, що відповідає питомому опорі вільної течії потоку. Нарешті, цікаво, що положення фазо-синхронних торочок у ретчет-відгуці може бути наближено обчислено при нульовій температурі у термінах функцій Бесселя. А саме, при $g \rightarrow \infty$ ($T \rightarrow 0$) рівняння (1) може бути записано як

$$dx/dt + \sin x = \xi^d + \xi^a \cos \omega t, \quad (2)$$

яке при $\xi^d > 0.5$ може бути розв'язано за припущенням, що швидкість вихора змінюється синусоїдально як $dx/dt = \langle dx/dt \rangle + \xi^a \cos \omega t$. Результат має вигляд:

$$\xi^d - n\Omega = J_n(\xi^a/\Omega)(-1)^n \sin x_0, \quad (3)$$

де x_0 — константа, яку потрібно визначити. Розглядаючи на рис. 1(b) криву для $\xi^d = 1.2$, для якої при $\xi^a = 0$ реалізується течія потоку, значення E синхронізується за фазою зі змінним струмом при $n = 1$ згідно з рівнянням (3), як показано на рис. 1(c). Водночас виходить, що при $n = 0$ для $\xi^d = 1.2$ і $\Omega = 1$ це рівняння не має розв'язку за жодних значень x_0 . На рис. 1(c) видно, що границі фазо-синхронних торочок за наближеним розв'язком добре співвідносяться з точними результатами для дуже низьких температур ($g = 1000$).

Таким чином, у розділі з'ясовано теоретично появу ретчет-напруги у плівках з симетричним потенціалом пінінгу у присутності постійного струму, залежність струму депінінгу від частоти змінного струму, завбачено фазо-синхронні торочки у ній при високій частоті змінного струму і показано, як виконуються граничні переходи до точних розв'язків рівняння для руху вихора при нульовій температурі. Теоретичні результати цього розділу дозволили вперше пояснити експериментальні дані інших авторів [В. Jin *et al.*, Phys. Rev. B. **81**, 174505 (2010)] у рамках єдиної самоузгодженої моделі.

У **третьому розділі** за допомогою числового моделювання аналізуються резистивні відгуки надпровідника з асиметричним потенціалом пінінгу типу пральної дошки. Обговорюється вплив змінного струму довільної амплітуди і частоти на ретчет-відгук і поглинання потужності при скінченних температурах. Задача розглядається у наближенні поодинокого вихора, на основі точного розв'язку рівняння Ланжевена у термінах матричних ланцюгових дробів з урахуванням ефекту Холла. Вирази для напруженості електричного поля і поглинання потужності аналізуються як функції амплітуди і частоти змінного струму, величини постійного струму і температури у широкому діапазоні відповідних безрозмірних параметрів. Зокрема, завбачено зміну знаку ретчет-напруги при малих постійних і достатньо сильних змінних струмах, а також немонотонне збільшення поглинання потужності при частотах, що значно менші, ніж частота депінінгу. Пояснюється, як і чому ці ефекти з'являються внаслідок конкуренції фіксованої внутрішньої і довільної зовнішньої асиметрії потенціалу пінінгу, яку привносить постійний струм. Результати розділу оприлюднені у роботах [17, 32].

Числове моделювання відгуків проводиться на основі точного розв'язку рівняння Ланжевена (1) у термінах матричних ланцюгових дробів для асиметричного потенціалу

$$U_p(x) = (U_p/2)[1 - \cos kx + e(1 - \sin 2kx)/2], \quad (4)$$

де $k = 2\pi/a$, a — період і U_p — глибина потенціалу пінінгу. У рівнянні (4) e — параметр, що дозволяє змінювати ступінь асиметрії і, отже, при $e = 0$ виконується природний граничний перехід до результатів другого розділу. При $e > 1$ рівняння (4) відповідає дволямному потенціалу. У дисертації розглядається випадок $e = 0.5$, оскільки саме таке значення параметру асиметрії застосовується у роботах інших авторів [A. Arzola *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 168104 (2011), J. Mateos, Phys. Rev. Lett. **84**, 258 (2009)].

На рис. 2(a) показано діаграму сил, що діють на вихор, і визначення напрямків у потенціалі пінінгу. А саме, при русі вихора проти крутого схилу каналу пінінгу говориться про динаміку вихора у “важкому” напрямку і, відповідно, при русі вихора проти розлогого схилу потенціалу його динаміка розглядається у “легкому” напрямку. На рис. 2(b) зображено модифікацію асиметричного потенціалу пінінгу при його схиленні позитивними (права частина графіка) і негативними (ліва частина графіка) струмами, критичні значення яких, $\xi_{c \text{ gentle}}$ і $\xi_{c \text{ steep}}$, відповідають зникненню лівого і правого бар'єрів потенціалу відповідно. Саме ця обставина і є причиною появи та інверсії ретчет-напруги, яку можна бачити на рис. 2(c) для $\xi^d \lesssim 0.5$. Так, у відсутності постійного струму негативна напруга виникає щойно, як амплітуда змінного струму ξ^a сягає значень більших, ніж струм депінінгу у “легкому” напрямку (зворотний ретчет-ефект). По мірі подальшого зростання ξ^a також і бар'єри потенціалу у “важкому” напрямку починають долатися вихорами, і це призводить до зменшення абсолютного значення негативної напруги. Водночас, при збільшенні значення ξ^d внутрішня асиметрія початкового потенціалу пінінгу ефективно компенсується за рахунок зовнішньої асиметрії потенціалу, яку привносить постійний струм, див. рис. 2(b). Так, при значенні постійного струму ξ^d між 0.3 і 0.5, завдяки компенсації внутрішньої і зовнішньої асиметрій, струми депінінгу для лівого і правого бар'єрів потенціалу постають рівними. Саме тому зворотний ретчет-ефекту зникає, і при подальшому зростанні ξ^d спостерігається тільки прямий ретчет-ефект. При-

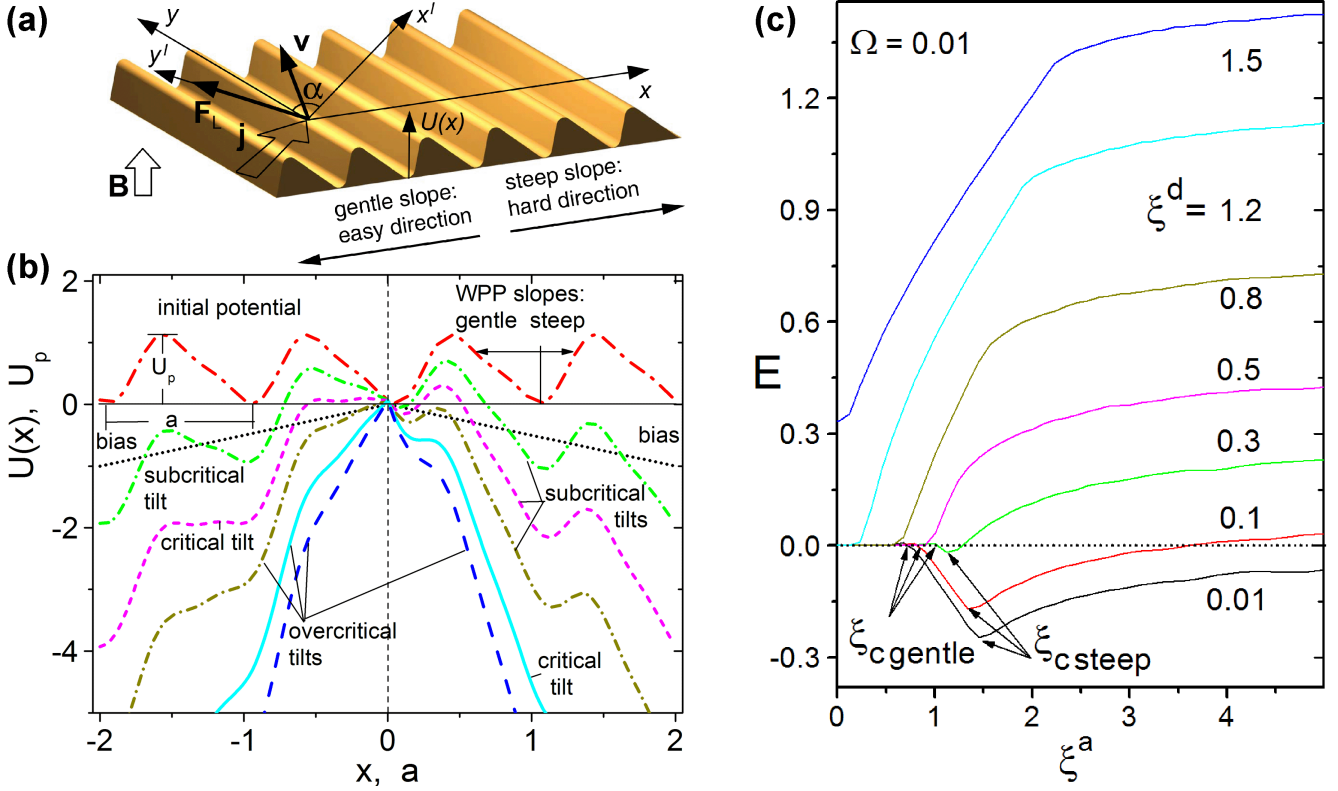


Рис. 2. (а) Діаграма сил, які діють на вихор, і визначення напрямків у потенціалі пінінгу. (б) Ефективний потенціал пінінгу для різних значень струму відносно струму депінінгу для лівого і правого схилів бар'єру. (с) Інверсія ретчет-напруги згідно з точним розв'язком рівняння Ланжевена за виразом (1) для асиметричного потенціалу пінінгу (4) у термінах матричних ланцюгових дробів у квазістатичному режимі $\Omega = 0.01$, $g = 100$ і серії значень постійного струму ξ^d .

роду ретчет-напруги та її інверсії можна з'ясувати на основі аналітичного наближеного розв'язку рівняння (1) для квазістатичного струму j при нульовій температурі. Для цього робиться підстановка $x(t) \rightarrow r^m = \exp\{-imx\}$, так що рівняння (1) набуває вигляд $2ij = (r^{-1} - r) - ie(r^{-2} + r^2)$ і може бути розв'язано за допомогою анзацу $y = r^{-1} - r$. Корні рівняння мають вигляд $r_{\pm} = (iD \pm \sqrt{4 - D^2})/2$, де $D \equiv A/2e = (1 - \sqrt{1 + 8e(e + j)})/2e$, а вольт-амперну характеристику (ВАХ), яку зображено на рис. 3(а), знаходять за виразом

$$E_0(j) = j + \text{Im}r + e[1 - 2(\text{Im}r)^2]. \quad (5)$$

Ретчет-напругу E^r у присутності постійного струму може бути знайдено наступним чином. Після заміни $j \rightarrow \xi^a \cos \omega t + \xi^d$ (наприклад, $\xi^d = 0.1$ для визначеності) шукають усереднену ретчет-напругу E^r за періодом змінного струму

$$E^r \equiv \frac{1}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} dt E(\xi^a \cos \omega t + \xi^d). \quad (6)$$

Результат інтегрування зображено на рис. 3(б) суцільною лінією. Точний розв'язок у термінах матричних ланцюгових дробів для $\xi^d = 0.1$ і двох обернених температур $g = 100$ і $g = 1000$ показано пунктиром. Наближений розв'язок досить гарно передає всі особливості точного результату, а саме: при $\xi^a \lesssim 0.7$ криві мають нульове плато, за ним починається область з $E^r < 0$, а при подальшому зростанні ξ^a ретчет-напруга змінює знак. У якості узагальнення результатів для будь-яких значень параметру асиметрії e на рис. 3(с) представлено контурний графік ретчет-напруги $E(\xi^d, e)$ при $\xi^a = 1.5$ і $g = 100$ у квазі-

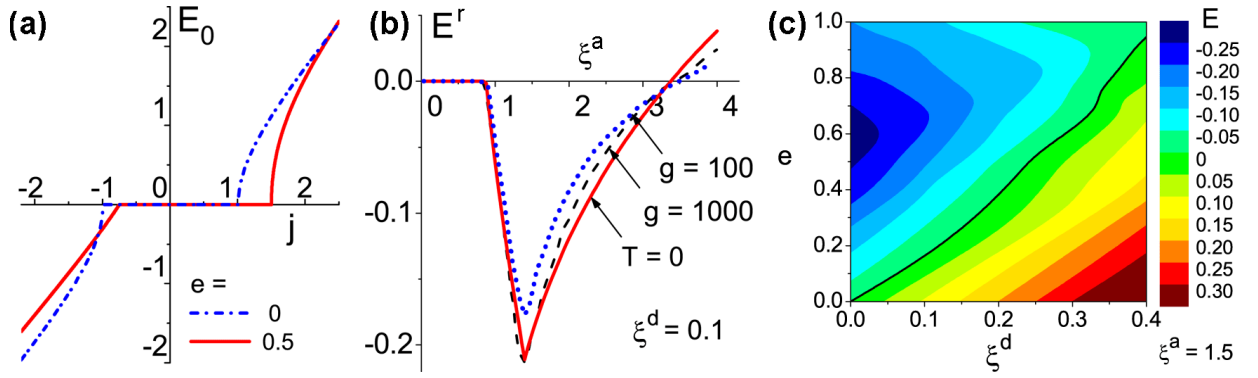


Рис. 3. (a) ВАХ $E_0(j)$ за виразом (5) у квазістатичному випадку при $T = 0$. (b) Ретчет-напруга при $T = 0$ ($g \rightarrow \infty$) за рівнянням (6) (суцільна лінія) поруч з точними результатами для $g = 100$ і $g = 1000$. (c) Контурний графік $E(e, \xi^d)$ при $\xi^a = 1.5$ і $g = 100$. Товста лінія позначає $E = 0$.

статичному режимі $\Omega = 0.01$. Можна бачити, що для експериментального спостереження інверсії ретчет-ефекту добре підходить параметр асиметрії $e \simeq 0.5$, оскільки у такому разі для негативної напруги завбачено її максимальне абсолютне значення та очікується найбільша різноманітність режимів у динаміці вихора. Це саме такий ступінь асиметрії, який було визначено з експериментальних даних для одного із зразків у розділі 8.

У **четвертому розділі** наводяться приклади застосування теоретично завбачених ефектів у ряді абрикосівських флюксонних приладів, а саме: високочастотних фільтрах, перетворювачах частоти, генераторах імпульсів і стохастичних підсилювачах. Викладається також процедура визначення координатної залежності періодичного потенціалу пінінгу довільної форми з даних про зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму при $T = 0$. Результати цього розділу оприлюднені у журнальних статтях [7, 8, 11, 13, 18, 19] і матеріалах конференцій [34, 35, 41].

Розглянемо стисло тут два можливих флюксонних прилади, що базуються на ефекті стохастичного резонансу: підсилювач слабкого змінного струму і перетворювач частоти на третю гармоніку, принцип дії яких можна описати на основі рівняння Ланжевена (1).

Постійне середнє електричне поле, що виникає при русі вихора, має вигляд

$$E = v \xi^d, \quad (7)$$

де $v = v(\xi^d, \xi^a, \omega, g)$ — ефективна рухливість вихора, яка є функцією-сходінкою своїх параметрів і визначається у термінах матричних ланцюгових дробів.

Стаціонарне змінне електричне поле, яке не залежить від початкових умов, являє собою суму відгуків на гармоніках частоти ω

$$E_t = \sum_{k=1}^{\infty} (\xi^a)^k \operatorname{Re} \{ Z_k(\omega) e^{ik\omega t} \}, \quad Z_k(\omega) = \delta_{1,k} - i\psi_k(\omega)/(\xi^a)^k. \quad (8)$$

Безрозмірні трансформаційні коефіцієнти Z_k мають фізичне значення внеску k -ї гармоніки частоти ω вхідного змінного струму у нелінійному змінному відгуці $E_t(\xi^d, \xi^a, \omega, g)$. Функції $\psi_k(\omega)$ визначаються в термінах матричних ланцюгових дробів, а $\delta_{1,k}$ — символ Кронекера. Безрозмірний коефіцієнт $Z_1 \equiv \rho_1 - i\zeta_1$ має фізичне значення нелінійного імпедансу, де ρ_1 і ζ_1 — резистивність і реактивність, відповідно. Нижче буде пояснено якісно стохастичний резонанс у ВАХ на постійному струмі, після чого будуть наведені температурні залежності $|Z_k| = \sqrt{\rho_k^2 + \zeta_k^2}$ для першої ($k = 1$) і третьої ($k = 3$) гармоніки.

Термін “стохастичний резонанс” означає, що періодичний відгук системи може бути модифіковано за допомогою її внутрішнього шуму. Цей феномен притаманний нелінійним системам, у яких присутні три елемента: енергетичний бар’єр, слабе періодичне збудження і джерело шуму [L. Gammaitoni, Rev. Mod. Phys. **70**, 223 (1998)]. Наноструктуровані надпровідні плівки являють собою, зокрема, таку систему для абрикосівських вихорів, оскільки енергетичний бар’єр реалізується завдяки потенціалу пінінгу, система має природні термофлуктуації, а слабе періодичне збудження у поєднанні з контрольованим зменшенням висоти бар’єру забезпечується змінним і постійним струмом відповідно. Коли через зразок протікають постійний і змінний струми $\xi^d + \xi^a \cos \omega t$ з $\xi^a \ll \xi^d$ і $\omega \ll \omega_p$, перша умова дозволяє розв’язувати задачу у лінійному наближенні, а друга означає квазістатичний режим. ВАХ системи, що досліджується, зображено на вставці рис. 4(a) у широкому діапазоні температур. Ці криві добре відомі як для динаміки абрикосівських вихорів, так і для шунтованого опором джозефсонівського контакту. По мірі зростання температури, що відповідає зменшенню g , нелінійний перехід від режиму термоактивованої течії потоку при субкритичних струмах ($\xi^d < 1$) до лінійного режиму течії потоку при закритичних струмах ($\xi^d > 1$) розмивається.

У присутності суми постійного і малого змінного струму для ВАХ можна записати

$$E(\xi^d + \xi^a \cos \omega t) \approx E(\xi^d) + \frac{\partial E(\xi^d)}{\partial \xi^d} \xi^a \cos \omega t, \quad (9)$$

і з’ясувати температурну залежність коефіцієнта при $\xi^a \cos \omega t$, яку зображено на рис. 4(a). Важливо, зокрема, що при $\xi^d < 1$ і $\xi^d > 1$ похідна $\partial E(\xi^d)/\partial \xi^d$ має якісно протилежні залежності від температури та особливість типу δ -функції при $\xi^d = 1$.

Температурні залежності абсолютного значення нелінійного імпедансу $|Z_1|$ і трансформаційного коефіцієнту третьої гармоніки $|Z_3|$ за точним розв’язком у термінах матричних ланцюгових дробів зображено на рис. 4(b) і 4(c) відповідно. Максимуми відгуків на частоті змінного струму та її третьої гармоніки спричинені стохастичним резонансом вихорів, що може застосовуватися у підсилювачах і конверторах частоти. Цікаво, що

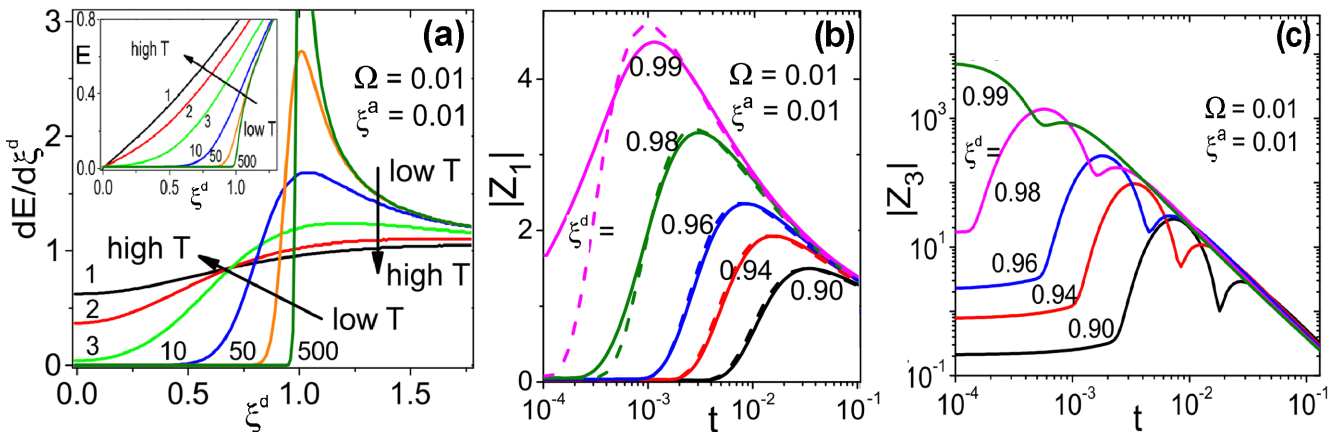


Рис. 4. (a) Похідна від ВАХ демонструє немонотонну залежність від температури. Вставка: ВАХ за виразом (7) для ряду обернених температур $g \equiv U_p/2T = 1, 2, 3, 10, 50, 500$. (b) Абсолютне значення нелінійного імпедансу $|Z_1|$ як функція температури $t \equiv T/U_p$ за рівнянням (8) та адиабатичному режимі $\Omega = 0.01$. Розв’язок у лінійному відгуці (10) зображено пунктиром. (c) Залежність абсолютного значення трансформаційного коефіцієнта третьої гармоніки $|Z_3|$ від температури.

лінійний імпеданс $Z_{\text{lin}}(g, \xi^d, \omega)$ може бути аналітично одержано з рівняння (1) у термінах модифікованих функцій Бесселя $I_\nu(z)$ за методом власних значень [W. T. Coffey, Y. P. Kalmykov, J. T. Waldron *The Langevin Equation* (Singapore: World Scientific, 2012)], а саме:

$$Z_{\text{lin}} = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{I_{1+\mu}(g)}{I_\mu(g)(\lambda + i\Omega/\lambda)} + \frac{I_{1-\mu}(g)}{I_{-\mu}(g)(\lambda^* + i\Omega/\lambda)} \right], \quad (10)$$

де $\lambda = I_\mu(g)I_{1+\mu}(g)/[2 \int_0^g I_\mu(t)I_{1+\mu}(t)dt]$ — ефективне власне значення і $\mu \equiv ig\xi^d$.

При $\xi^d = 0$ рівняння (10) еквівалентно відомому результату [M. W. Coffey, J. R. Clem, Phys. Rev. Lett. **67**, 386 (1991)], оскільки у даному разі $\mu = 0$, $\lambda = \lambda^* = I_0(g)I_1(g)/[I_0^2(g) - 1]$ і

$$Z_{\text{lin}}(g, 0, \Omega) \equiv Z_{\text{lin}}^0 = \frac{v_0 + \Omega^2 + i\Omega(1 - v_0)}{1 + \Omega^2}, \quad (11)$$

де $v_0 \equiv v(\xi^d = 0) = 1/I_0^2(g)$ — крип-фактор і, за визначенням, $\Omega \equiv (2\eta/U_p k^2)\omega$.

Аналітичний результат (10) для лінійного імпедансу зображено на рис. 4(b) пунктиром. Вираз (10) є гарним наближенням до точних результатів для усіх ξ^d за винятком $\xi^d \simeq 1$. Таким чином, у розділі зазначено граничні переходи до раніше відомих результатів, а також викладено конкретні застосування завбачених ефектів у флюксонних приладах, одне з яких (високочастотний фільтр) з успіхом реалізовано у розділі 8.

П'ятий розділ присвячено комплексному дослідженню структурних особливостей плівок і наноструктур, які у подальшому застосовуються для резистивних вимірювань і поглинання потужності високочастотного струму. Обґрунтовується вибір експериментальної системи і викладаються експериментальні методи, які застосовувалися для виготовлення і характеристики плівок і наноструктур. Результати цього розділу оприлюднені у журнальних статтях [2, 6] і матеріалах конференцій [28, 29, 43, 45, 46].

У розділі зазначається, що для експериментальної реалізації модельної системи, яка розглядалася у розділах 2-4 теоретично, зразки повинні задовольняти певним умовам. По-перше, ізотропний пінінг, який властивий усім матеріалам завдяки структурній неідеальності, повинний бути якомога слабким, а штучно створений періодичний потенціал пінінгу має бути якомога сильним. По-друге, співвідношення між характерними довжинами у надпровідній плівці, параметрами наноструктур і геометричними розмірами зразка, при половині критичної температури T_c , повинно бути близьким до

$$2\xi \approx 2b \simeq d < \lambda < a \ll W, \quad (12)$$

де ξ — довжина когерентності, що визначає розмір кору вихора, λ — глибина проникнення магнітного поля, яка визначає інтенсивність міжвихорової взаємодії, $2b$ — ширина каналу пінінгу (області з пригніченим параметром порядку у надпровіднику під дією елемента наноструктури у формі канавки або стрічки), a — період наноструктури, d — товщина плівки і W — ширина плівки. Оскільки дослідження інших авторів виявили, що термофлуктуації значно маскують очікувані ефекти у високотемпературних надпровідниках [O. Soroka, PhD Thesis, J. Gutenberg-Universität Mainz, 2005], було вирішено обмежити пошук експериментальної системи “холодними” надпровідниками. При цьому, з урахуванням того, що для високочастотних вимірювань, які вимагають наявності коаксіальних кабелів, існувала можливість вимірювань лише у ^4He кріостаті, бажано було застосувати надпровідник з відносно високою T_c . Серед надпровідників, що задовольняють співвідношенню (12), таким умовам відповідає зокрема ніобій, наноструктуровані плівки якого й стали експериментальними зразками.

Плівки ніобію напилювалися методом магнетронного розпилення на сапфірові підкладки. З плівок вищавлювалися містки, після чого наноструктури виготовлялися обробкою поверхні містків фрезуванням наноканавок фокусованим пучком іонів (FIB) або осадженням наносмужок кобальту з газу-прекурсору $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ під дією фокусованого пучка електронів (FEED) у скануючому електронному мікроскопі. З метою отримати зразки з домінуючим анізотропним пінінгом оптимізація структурних властивостей плівок і геометричних параметрів пінінг-наноструктур велася одночасно за двома напрямками. По-перше, було знайдено тип підкладок і параметри розпилення епітаксialьних плівок, що характеризуються високою структурною якістю. По-друге, було виявлено оптимальні геометричні розміри наноструктур і параметри фокусованих пучків електронів та іонів для отримання максимальної роздільної здатності, яка забезпечувала точну періодичність наноструктури та її однакові властивості в усіх регіонах зразка.

Епітаксію плівок ніобію встановлювали дифракцією швидких електронів (RHEED) у поєднанні з дифракцією рентгенівського випромінювання (XRD), див. рис. 5. Оптимальними параметрами для виготовлення плівок високої якості є наступні: підкладка Al_2O_3 (11 $\bar{2}$ 0), температура підкладки 850°C, тиск аргону у камері 4×10^{-3} мбар, швидкість розпилення 0.5 нм/с. Плівки являють собою фазу Nb (110) без текстури, що встановлено у атомно-силовому мікроскопі (AFM). Характерне значення питомого електричного опору плівок при 10 К складає 1 мкОмсм. Для неструктурованих плівок з товщиною близько 50 нм температура переходу до надпровідного стану $T_c \simeq 9$ К, а відношення опорів при кімнатній температурі і 10 К сягає $RRR = 10 \div 50$. Плівки характеризуються верхнім критичним полем при нулі температур близько 1 Т і довжиною когерентності $\xi(0) \simeq 20$ нм, які визначено з апроксимації експериментальних даних до феноменологічного закону $H_{c2}(T) = H_{c2}(0)[1 - (T/T_c)^2]$ і співвідношення $\xi(0) = \sqrt{\Phi_0/2\pi H_{c2}(0)}$ відповідно. Значення $\lambda(0)$ для плівок оцінено як 100 ± 10 нм [Gubin A. I. *et al.*, Phys. Rev. B 72, 064503 (2005)].

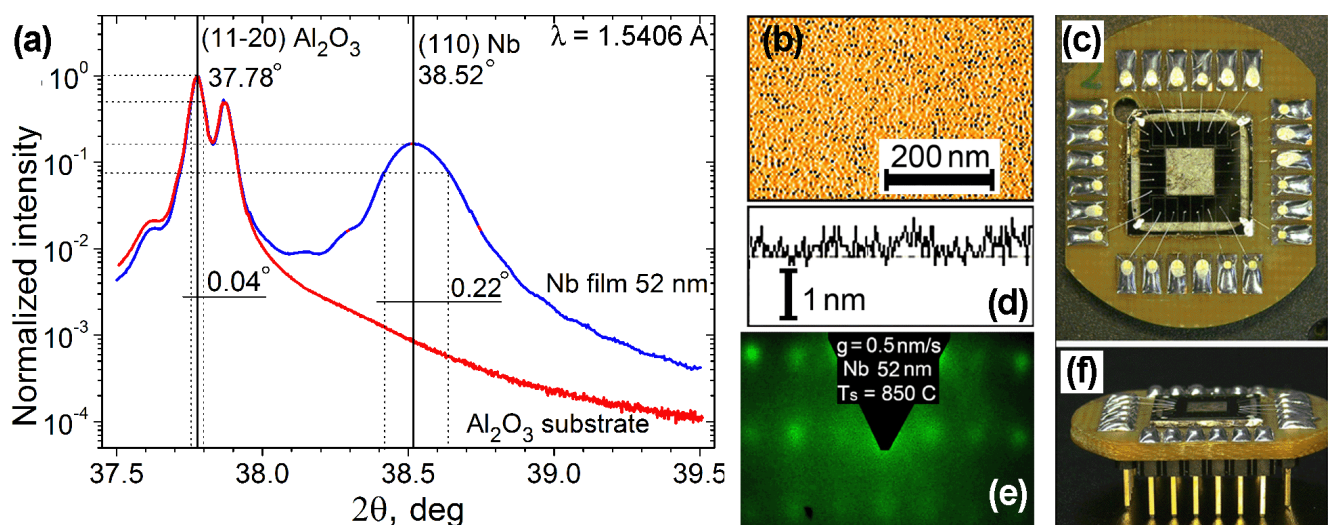


Рис. 5. (а) Частина рентгенівської дифрактограми поблизу піків від підкладки Al_2O_3 (11 $\bar{2}$ 0) і Nb (110). (b) Зображення поверхні епітаксialьної плівки ніобію в AFM та її профіль (d). (e) Дифракційна картина швидких електронів для плівки ніобію. (c) і (f) Зображення утримувача з плівкою для електричних вимірювань на постійному струмі при низьких температурах у розділі 6.

Наноструктури виготовлялися у двохраневому скануючому електронному мікроскопі. При цьому застосовувалися два різних процеси обробки поверхонь фокусованими пучками частинок, принцип дії яких зображено на рис. 6 згідно з роботами [I. Utke *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. **26**, 1197 (2008), M. Huth *et al.*, Beilstein J. Nanotechnol. **3**, 597 (2012)]. Фрезування фокусованим пучком іонів полягає у тому, що іони галію (10–30 KeV) бомбардують поверхню плівки і вибивають атоми ніобію. При цьому, зокрема, певна кількість іонів галію зупиняється у приповерхневому шарі плівки з товщиною близько 15 нм, а ніобій на дні канавки частково аморфізується, рис. 6(a). Другий процес міститься у тому, що газ-прекурсор, у даному випадку $\text{Co}_2(\text{CO})_8$, запускається у камеру електронного мікроскопу і дисоціює під дією пучка електронів на органічні ліганди, що відпомповуються з мікроскопу, а осаджений матеріал залишається на поверхні плівки, рис. 6(b).

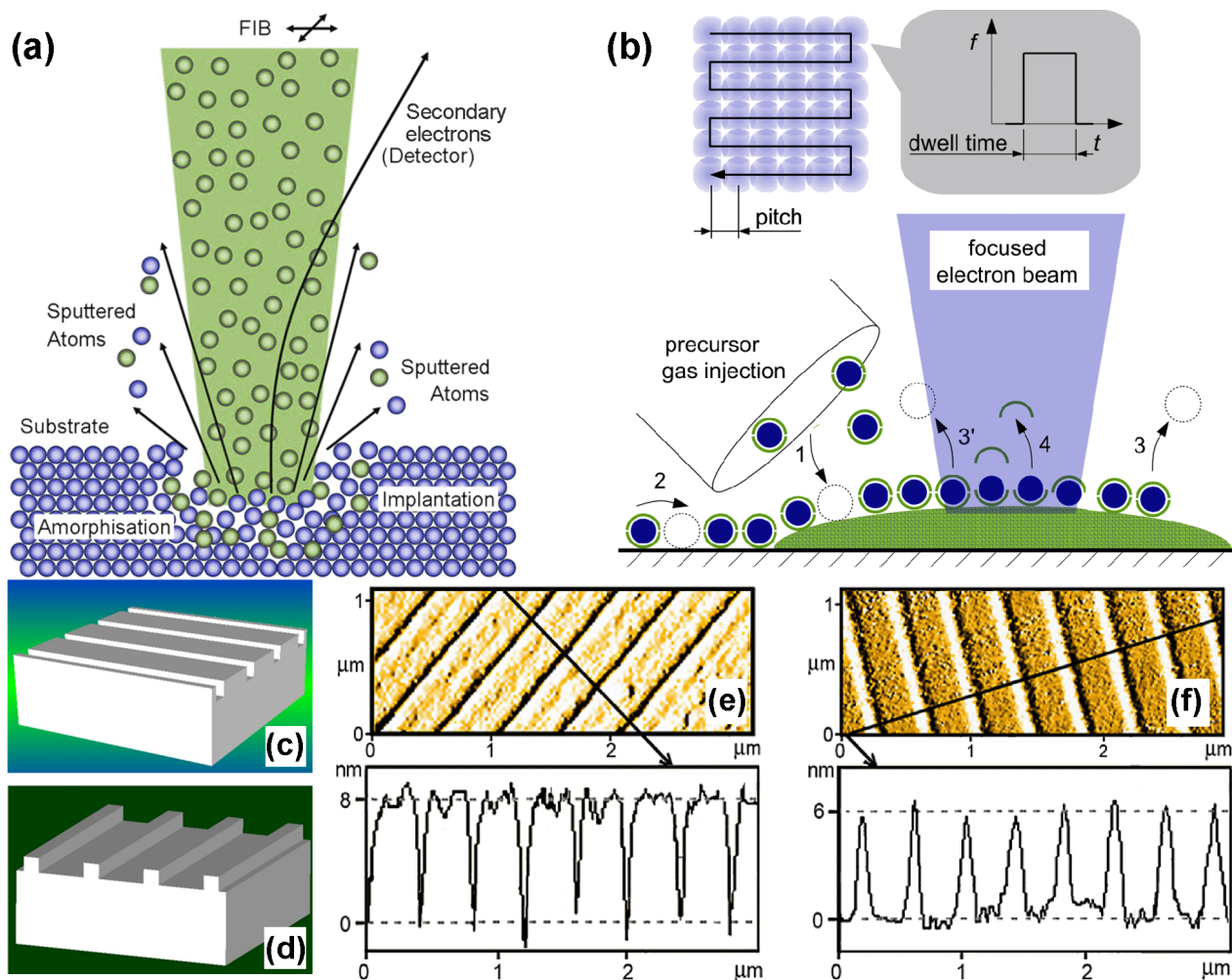


Рис. 6. (a) Принцип фрезування поверхні фокусованим пучком іонів (FIB). Видалення матеріалу в межах фокусу пучка (20–50 нм) супроводжується імплантацією галію, аморфізацією і утворенням вакансій у зразку. (b) Принцип осадження матеріалу під дією фокусованого пучка електронів (FEBID). Молекули газу-прекурсору адсорбуються (1) на поверхні. Поверхнева дифузія (2), термічна десорбція (3) та електронно-активована десорбція (3') мають місце. У межах фокусу пучка електронів (10–30 нм) молекули дисоціюють на летючі органічні ліганди (4) та осаджений матеріал. Вставка зверху: Для визначення структури фокусований пучок рухається над поверхнею зразка і затримується над певними точками на визначений у файл-макеті час. Макети (c,d) і зображення (e,f) виготовлених наноструктур у AFM поруч з їх профілями.

У шостому розділі досліджується експериментально магніторезистивний відгук плівок ніобію з фрезованими наноканавками. Положення вихорів при полях збігу використовуються для аналізу інтенсивності пінінгу у різних частинах наноструктури за допомогою ареніусівського аналізу температурних залежностей опору. Локальний елементний склад плівки досліджується за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) і корелює з інтенсивністю пінінгу в її різних частинах. Результати цього розділу оприлюднені у статтях [10, 12] і матеріалах конференцій [38, 39, 42, 43, 45].

Зразками є дві плівки ніобію з товщинами 52 нм, які напилювалися у єдиному процесі. На кожній з плівок звичайною фотолітографією було визначено чотири шестиконтактні містки з розмірами $30 \times 100 \text{ мкм}^2$, див. також рис. 5(c) і (f). Один місток було залишено без наноструктури, а у семи інших були профрезовані наноканавки за допомогою FIB під різними кутами α до довгої сторони містка, рис. 7(a-c). Локальний елементний склад у плівках з наноструктурами визначали за допомогою EDX, див. рис. 7(d). Неструктурована плівка виявляє 100 ат.% ніобію, як очікувалося. Усі наноструктуровані містки містять також малу долю галію, а саме: 2.5 ат.% Ga між канавками і 11.5 ат.% Ga на дні канавок. У надпровідних властивостях плівок це відображається через критичну температуру $T_c = 8.61 \text{ К}$, яка трохи нижча, ніж $T_c = 8.88 \text{ К}$ для неструктурованого містка. Проте важливо, що для всіх містків з різними α надпровідний перехід має ширину $\Delta T \lesssim 0.05 \text{ К}$ і T_c не залежить від α у межах похибки $\pm 2 \text{ мК}$. Вимірювання електричного опору проводилися у стандартній чотирьохконтактній геометрії у режимі заданого постійного струму. На рис. 8(a,b) зображені залежності густини критичного струму $j_c(B)$ і питомого опору $\rho(B)$ від величини магнітного поля, у яких легко бачити екстремуми при 8.8 мТ і 11.7 мТ. Відповідні конфігурації вихорів зображені на вставках до рис. 8(d,e).

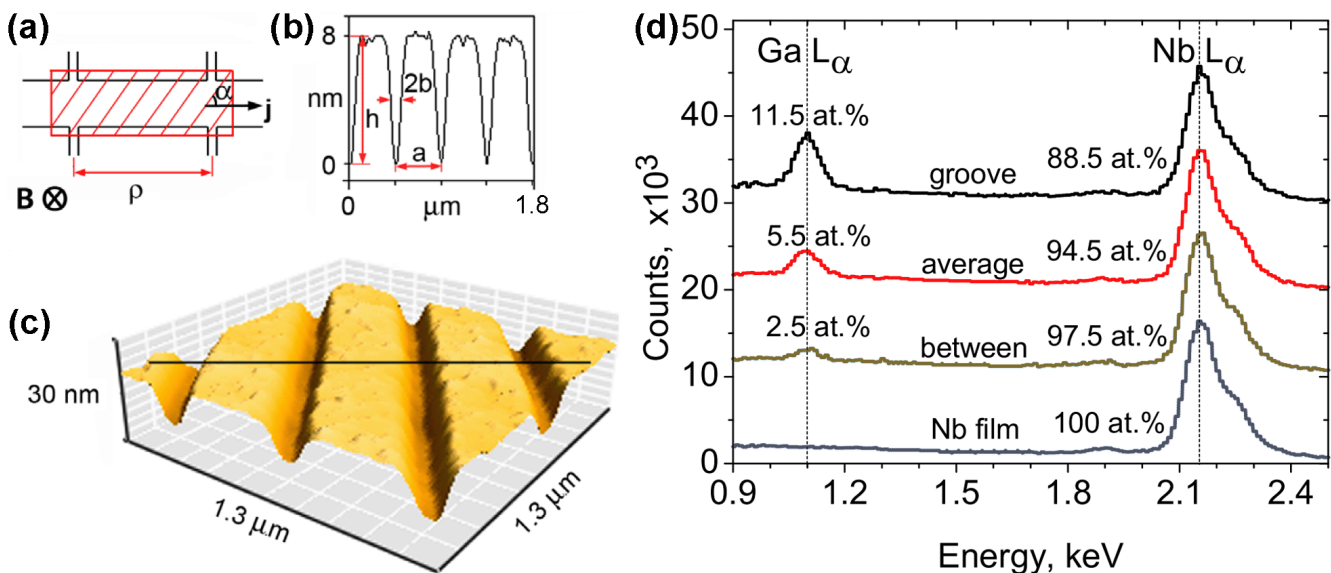


Рис. 7. (a) Геометрія експерименту: плівка Nb з товщиною 52 нм знаходиться у перпендикулярному магнітному полі при $T \lesssim T_c$. Постійний струм малої густини j протікає крізь зразок. Вимірюється поздовжня компонента магнітоопору ρ відносно напрямку j . (b) Профіль наноструктури з параметрами, що визначені з зображення поверхні плівки у AFM (c). Символи $a = 450 \pm 2 \text{ нм}$ $h = 8 \pm 0.5 \text{ нм}$ і $2b = 60 \pm 3 \text{ нм}$ позначають період пінінг-наноструктури та глибину і ширину канавок на половині їх глибини відповідно.

Направлений рух вихорів вздовж наноканавок порівнюється для трьох значень магнітних полів 8.8 мТ, 11.7 мТ і 15 мТ при вимірюванні температурної залежності поздовжнього електричного опору для значень α , підписаних на рис. 8(d-f). Найбільше значення опору завжди реалізується для напрямку струму під кутом $\alpha = 90^\circ$ до канавок (вихорі рухаються вздовж канавок), тоді як мінімальна дисипація спостерігається для $\alpha = 0^\circ$ (рух вихорів поперек канавок). При цьому найбільша ефективність гайдінгу вихорів досягається при фундаментальному полі збігу, коли кожний ряд вихорів запінінгований до канавки і нема “зайвих” вихорів. Цікаво, що положення вихорів при різних магнітних полях можна використати для оцінки інтенсивності пінінгу у різних частинах зразка. У випадку слабого струму для цього аналізуються ареніусівські графіки $\ln \rho(T)$ за допомогою модельної функції $v(T, F) = \exp(-\theta U_{\text{eff}})(k_B T)$, де $\theta = 1 - T/T_c$ і $U_{\text{eff}} = U_0 - Fb$ — ефективний потенціал пінінгу, U_0 — глибина потенціальної ями, F — зовнішня сила, що діє на вихор, і b — характерна ширина потенціалу пінінгу. З урахуванням відносної кількості вихорів, які запінінговані на дні канавок і поміж ними, вдається знайти енергію активації анізотропного $U_a \approx 6000$ К та ізотропного U_i пінінгу, як підписано на рис. 8(c).

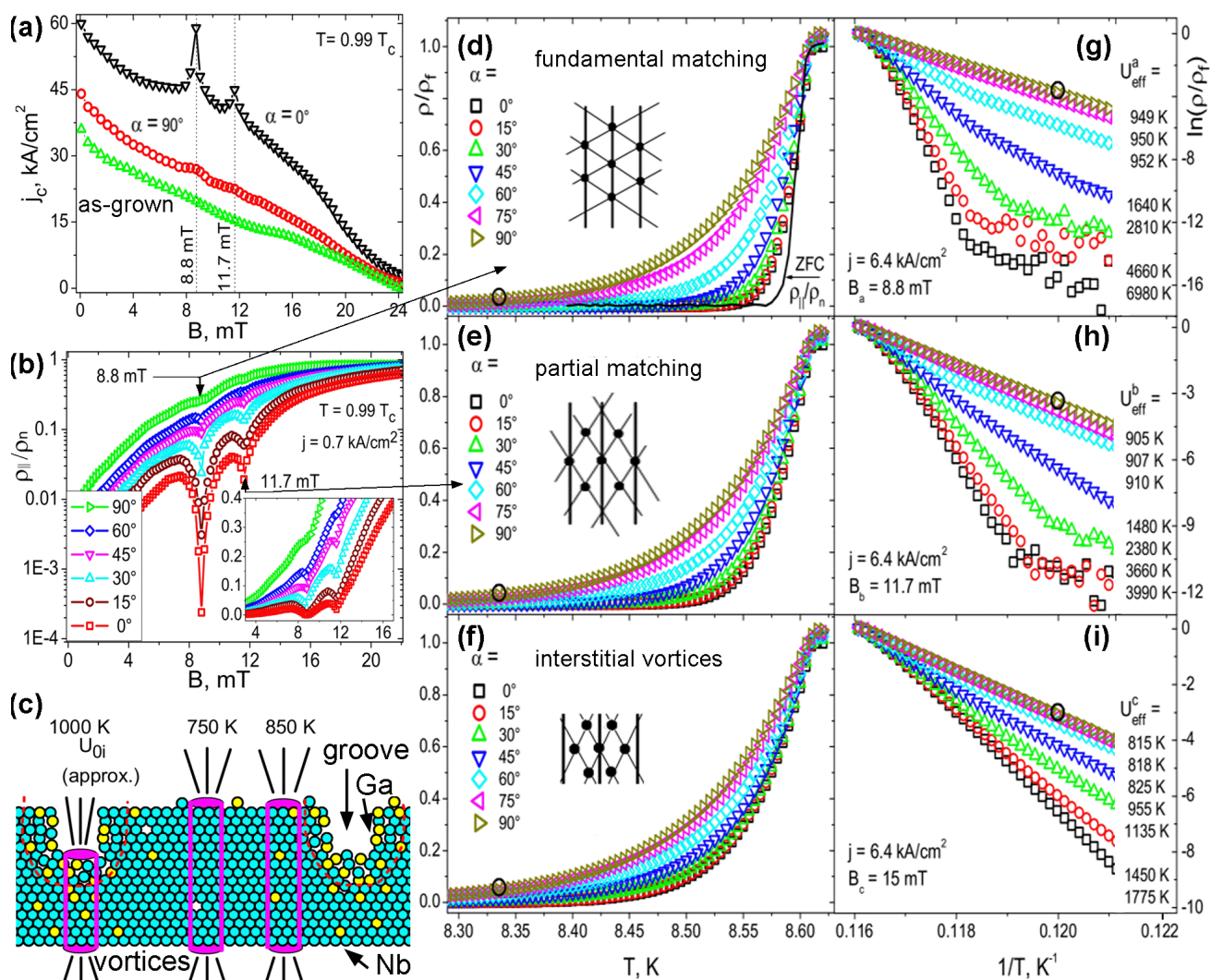


Рис. 8. Польові залежності (a) густини критичного струму j_c і (b) питомого опору ρ плівок ніобію. (c) Енергії активації ізотропного пінінгу у різних частинах плівки з наноструктурою. (d-f) Залежності $\rho(T)$ для трьох конфігурацій вихорів відносно наноструктур і семи кутів напрямку струму відносно наноканавок. (g-i) Ареніусівські графіки для визначення енергії активації пінінгу у (d-f).

У **сьомому розділі** представлено кріогенну вставку, за допомогою якої проводилися комбіновані вимірювання електричної напруги і поглинання потужності у присутності постійного і змінного струмів. Описані спостереження сходинок Шапіро у ВАХ плівок, кросовер від адіабатичного до високочастотного режиму у динаміці вихорів і вплив змінного струму на величину постійного струму депінінгу. Результати цього розділу оприлюднені у журнальних статтях [20, 21] і матеріалах конференцій [44, 48].

Для комбінованих вимірювань електричної напруги і поглинання потужності змінного струму у діапазоні частот 300 КГц–20 ГГц дисертантом було розроблено і зібрано кріогенну вставку, яка зображена на рис. 9. Високочастотний сигнал генерується векторним аналізатором схем Agilent E5071C (максимальна потужність +10 дБм, що відповідає 10 мВт) і подається до наноструктурованої мікросмужки через мікро-SMP конектори.

ВАХ мікросмужки з канавками симетричного профілю (S) у присутності змінного струму зображені на рис. 10(a), де сходинки Шапіро з'являються при напругах

$$V = nV_0 \equiv nN\Phi_0 f, \quad (13)$$

де n — ціле число, N — кількість рядів вихорів між потенційними контактами, f — частота змінного струму і Φ_0 — квант магнітного потоку. Сходинки виникають, коли час долання певної кількості періодів потенціалу пінінгу співпадає з періодом змінного струму.

На рис. 10(b) зображено залежності постійного струму депінінгу від кореню з потужності вхідного змінного струму, $I_c(\sqrt{P})$, для ряду частот. Залежності можна апроксимувати прямими, що можна пояснити тим, що у разі сумарної дії постійного і змінного струмів ефективний струм депінінгу визначається сумою їх компонент. Графік на рис. 10(c) відображає частотні залежності I_c для ряду рівнів потужності високочастотного струму. Можна бачити, що значення постійного струму депінінгу при частотах $f \lesssim 10$ МГц стає незалежним від частоти. Це є ознакою кросоверу від квазістатичного режиму у динаміці вихорів до високочастотного режиму, який буде розглянуто у наступному розділі.

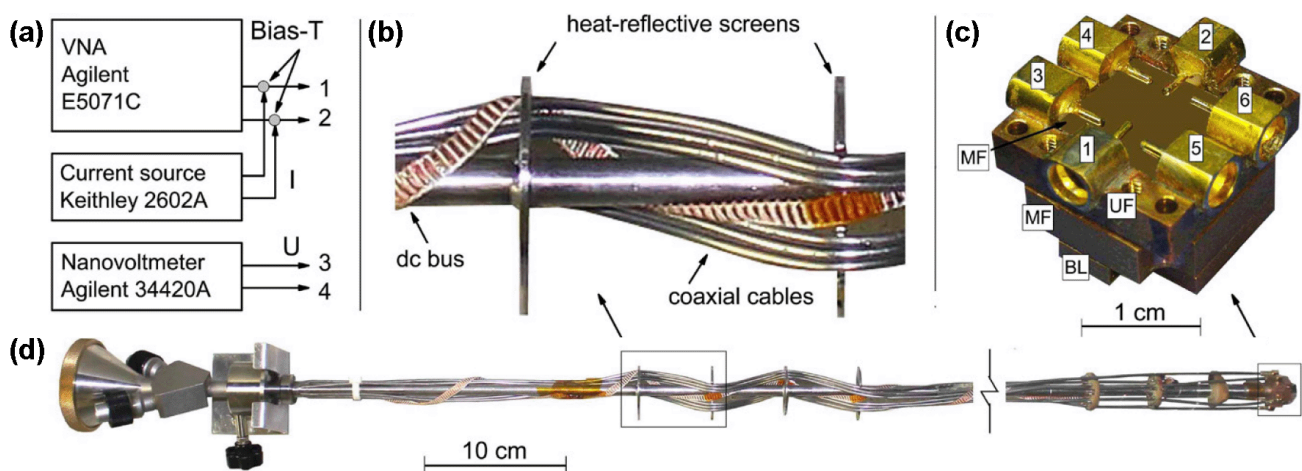


Рис. 9. Експериментальне устаткування для вимірювань постійної напруги і поглинання потужності змінного струму у присутності постійного струму. (a) Вимірювальні прилади для подання і аналізу комбінованого постійного і змінного струмів. (b) Шість коаксіальних кабелів поруч з додатковою шиною проходять термозахисні екрани кріогенної вставки. (c) Від'єднаний утримувач зразків із знятою верхньою кришкою. (d) Зображення повністю зібраної кріогенної вставки.

Температурна залежність трансмісійного параметру $S_{21}(T)$, що є мірою втрати потужності сигналом між вихідним і вхідним терміналом мікросмужки, у відсутності постійного струму зображена на рис. 9(d) для $f = 1.37$ ГГц і ряду магнітних полів. При зростанні магнітного поля кросовер розширюється і зсувається у напрямку більш низьких температур, що нагадує тенденцію змін у кривих $R(T)$. На рис. 9(e) зображено зміни $S_{21}(T)$ для фундаментальної конфігурації вихорів при зростанні потужності змінного струму на 20 дБ для трьох частот. При збільшенні частоти втрати високочастотного сигналу зростають, і вище 7 ГГц різниця між втратами у нормальному і надпровідному стані зникає. При зменшенні частоти $\Delta S_{21} = S_{21}(P = -10 \text{ дБм}) - S_{21}(P = -30 \text{ дБм})$ виходить на насичення на рівні -5 дБ. Таким чином, частотний діапазон 100 МГц – 5 ГГц є дуже цікавим для вивчення найважливішої характеристики динаміки вихорів у присутності надпровідного струму – частоти депінінгу, яка характеризує кросовер від слабого поглинання потужності змінного струму вихорами при низьких частотах до сильного поглинання при високих частотах [J. I. Gittleman and B. Rosenblum, Phys. Rev. Lett. 16, 734 (1966)].

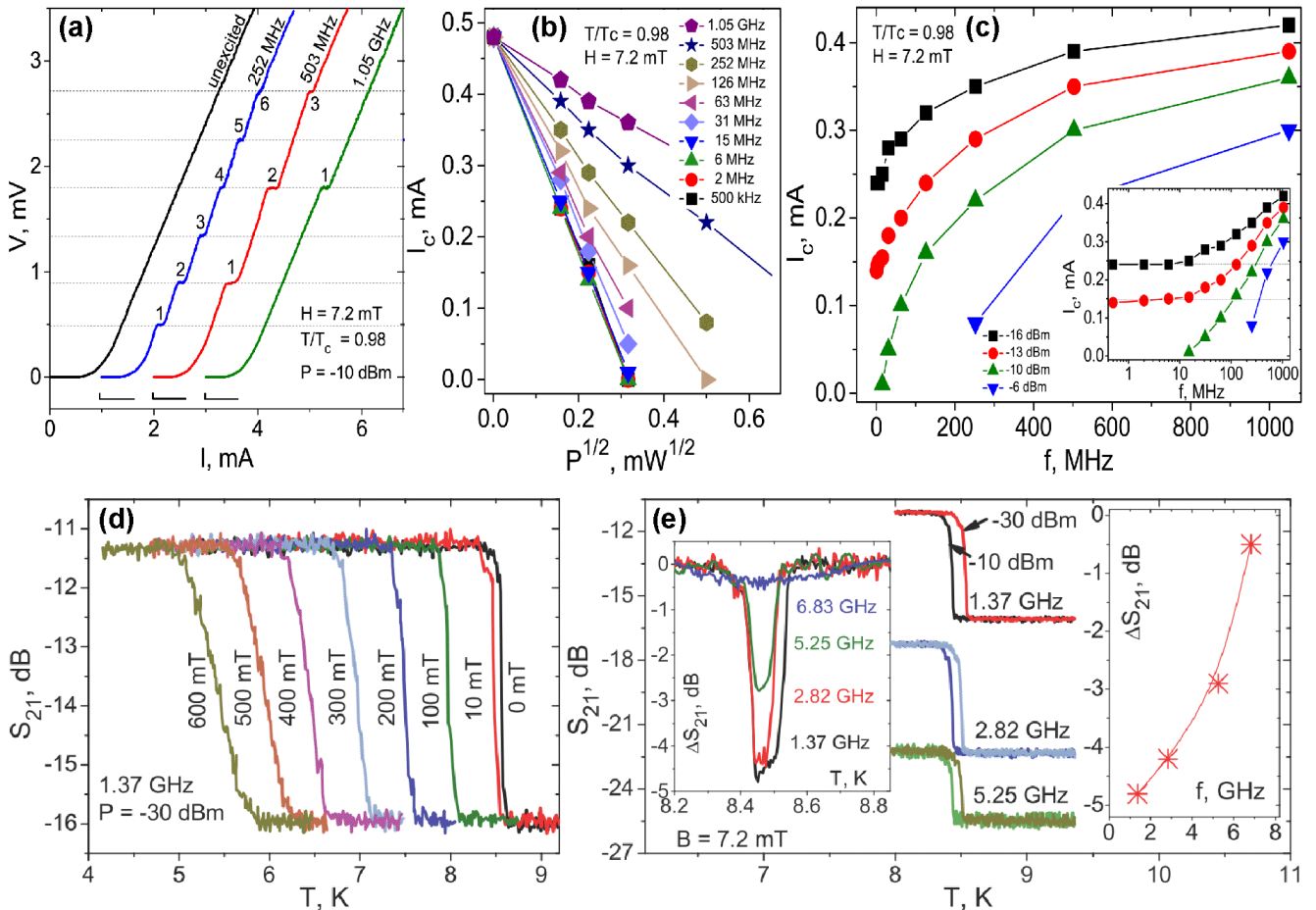


Рис. 10. (a) Сходишки Шапіро у ВАХ наноструктурованої плівки S для ряду частот змінного струму. Початки кривих рознесені на 1 мА вздовж осі струму. Постійний струм депінінгу як функція квадратного кореню з потужності високочастотного струму для ряду частот і (b) функція частоти для ряду значень постійного струму (c). Температурна залежність трансмісійного параметру $S_{21}(T)$ при $f = 1.37$ ГГц і ряду магнітних полів (d) та при $B = 7.2$ мТ, двох потужностях високочастотного струму і ряду частот (e). Ліва вставка в (e) зображує відносну зміну $\Delta S_{21} = S_{21}(P = -10 \text{ дБм}) - S_{21}(P = -30 \text{ дБм})$ як функцію температури, а права – ΔS_{21} як функцію частоти.

У **восьмому розділі** досліджується експериментально поглинання потужності у плівках ніобію у присутності постійного струму за нерезонансним методом широкосмугової спектроскопії. Реалізовано височастотний фільтр, частоту зрізу якого можна переналаштовувати не тільки величиною, а й полярністю постійного струму. Виявлено зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму. З цих даних визначено координатну залежність потенціалу пінінгу. Результати розділу оприлюднені у журнальних статтях [24–26] і матеріалах конференцій [40, 47, 49, 50].

Дві мікросмужки ніобію S і A мають розміри $150 \times 500 \text{ мкм}^2$ і виготовлені з плівок з товщинами 40 нм і 70 нм відповідно. Наноструктури являють собою паралельні канавки з періодом $a = 500 \text{ нм}$, які виготовлено за допомогою FIB та які мають симетричний (S) та асиметричний (A) профілі, див. рис. 11(a,b). Рисунок 11(d) зображує відносне змінювання трансмісійного параметру $\Delta S_{21} = S_{21} - S_{21\text{ref}}$ плівки A як функцію магнітного поля при $T = 0.98T_c$ для ряду частот. Тут $S_{21\text{ref}}$ позначає втрати сигналу у трансмісійній лінії (всі кабелі і конектори тощо), і тому ΔS_{21} є мірою поглинання потужності завдяки руху вихорів у плівці. Для усіх частот потужність збудження $P = -20 \text{ дБм}$ (10 мкВт), яка підтримується векторним аналізатором згідно із збереженими даними калібрування $S_{21\text{ref}}(f, T)$. Криві $\Delta S_{21}(H)$ на рис. 9(d) симетричні по відношенню до $H = 0$, і втрати сигналу при низьких частотах зростають із збільшенням магнітного поля. Водночас, при більш високих частотах ΔS_{21} стає менш чутливим до зміни величини поля і досягає максимального рівню втрат -6.4 дБ . Істотне зменшення втрат сигналу (піки у ΔS_{21}) має місце при 7.2 мТ і 9.6 мТ, причому перше значення магнітного поля відповідає фундаментальному полю сбігу положень вихорів і каналів ландшафту пінінгу, що створюються наноструктурою. На вставці рис. 11(d) зображено впорядкування вихорів при 7.2 мТ для трикутної решітки зі сталою решітки $a_\Delta = (2\Phi_0/H\sqrt{3})^{1/2}$. Для цієї конфігурації розглядаються усі наступні ефекти.

Графіки на рис. 12(a) і (d) відображають частотну характеристику $\Delta S_{21}(f)$ плівки A для однакових значень позитивної і негативної густини постійного струму при $T = 0.3T_c$.

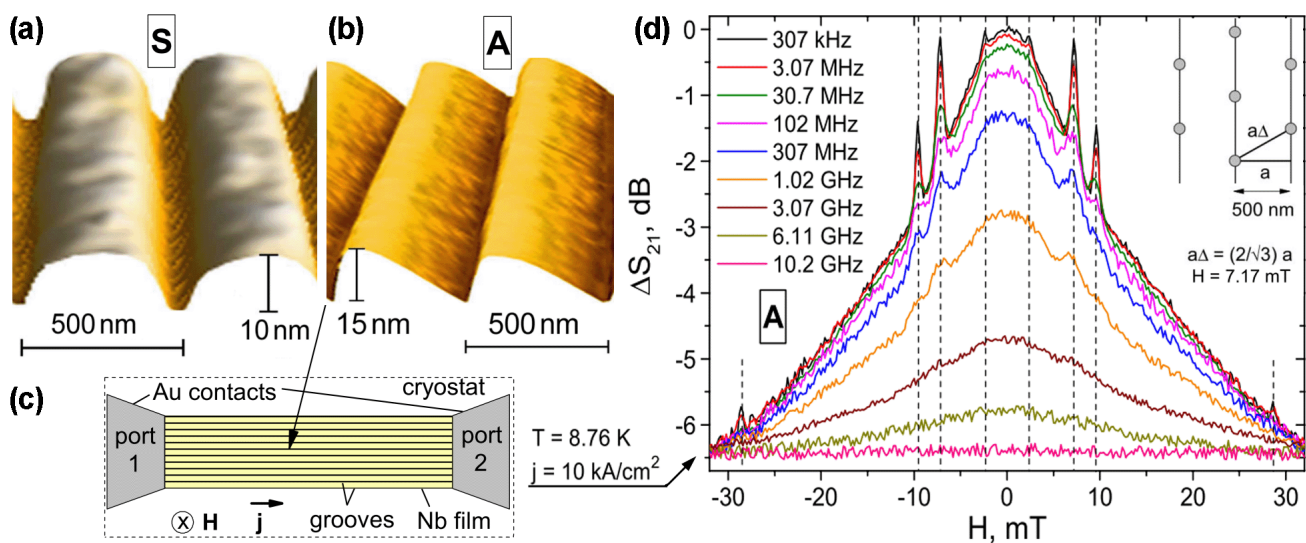


Рис. 11. Зображення поверхні наноструктурованих мікросмужок у AFM. Наноканавки з симетричним (a) та асиметричним (b) профілем виготовлені фрезуванням за допомогою FIB. (c) Геометрія експерименту: величиною, що вимірюється є трансмісійний параметр ΔS_{21} , який є мірою поглиненої потужності сигналу у зразку. (d) Залежність $\Delta S_{21}(H) = S_{21}(H, f, T) - S_{21\text{ref}}(f, T)$.

У відсутності постійного струму втрати сигналу максимальні при високих частотах, тоді як відгук вихорів при низьких частотах слабо дисипативний. Для обох полярностей постійного струму при збільшенні величини струму криві $\Delta S_{21}(f)$ зсуваються в напрямку низьких частот, але величини цих зсувів значно відрізняються для плівки А, у той час як вони майже співпадають для плівки S, для якої через це на рис. 12(e) показані тільки криві для позитивної полярності. Зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму пояснюється ефективним зменшенням бар'єрів потенціалу пінінгу, що відповідає двом різним струмам депінінгу j_d для позитивної і негативної гілки ВАХ для плівки А. При $T = 0.3T_c$ і $H = 7.2$ мТ вони дорівнюють 0.52 МА/см² і 1.25 МА/см² відповідно, у той час як $j_d = 0.75$ МА/см² для плівки S, див. рис. 12(c). Тут j_d визначено за критерієм напруженості електричного поля 10 мкВ/см. Таким чином, плівка А поводить себе як фільтр, частоту зрізу якого можна переналаштовувати не тільки величиною постійного струму, а і його полярністю. Комбінація наноструктур А і S дозволила створити флюксонний метаматеріал з квантованими рівнями поглинання потужності.

Частотні характеристики фільтрів можна апроксимувати до виразу $\Delta S_{21}(f) = 1/[1 + (f_d/f)^n]$ з показниками $n = 2$ для $0 < j < 0.42$ МА/см² і $n \approx 1.85$ для $j \simeq j_d$ у зразку S. Для "легкого" напрямку зразка А $n \approx 2.1$, а для його "важкого" напрямку $n \approx 1.9$, що дуже близько до характеристики фільтру першого порядку, де $n = 2$ [D. M. Pozar *Microwave*

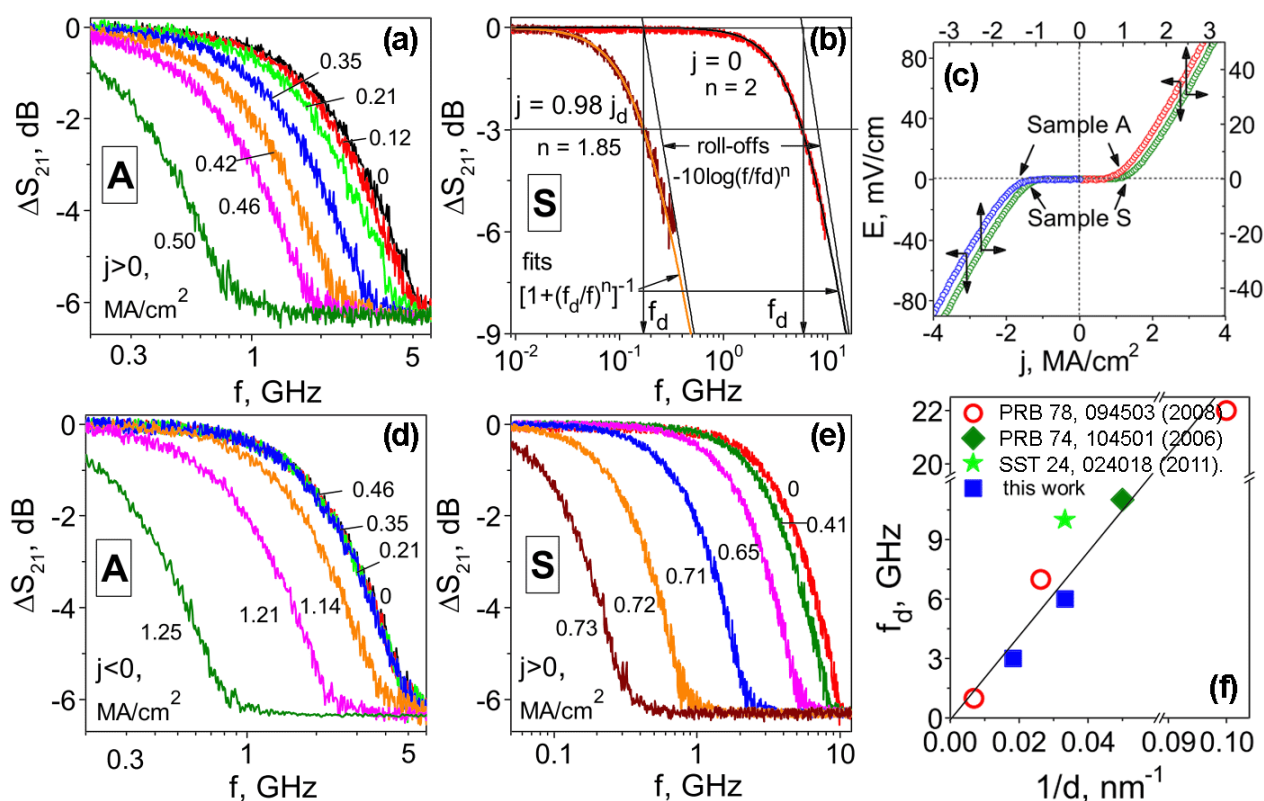


Рис. 12. Залежності $\Delta S_{21}(f)$ для плівки А при позитивних (а) і негативних (d) густинах постійного струму. (e) Визначення частоти депінінгу f_d за критерієм -3 дБ для зразка S поруч з апроксимацією частотної характеристики фільтру до виразу $\Delta S_{21}(f) = 1/[1 + (f_d/f)^n]$. (c) ВАХі плівки А (ліва і нижня осі) і плівки S (права і верхня осі). (e) Частотна характеристика $S_{21}(f)$ плівки S для ряду густин постійного струму. Для всіх графіків $H = 7.2$ мТ, $T = 0.3T_c$ і $P = -20$ дБм. (f) Частота депінінгу у відсутності постійного струму при $H = 0$ і $T = 0$ як функція (оберненої) товщини плівок ніобію у порівнянні з даними інших авторів. Пряма $f_d \propto 1/d$ є орієнтиром для ока.

Engineering (John Wiley & Sons, New York, 2011)]. Частотна характеристика добре описується виразом $-10 \log_{10}[(f/f_d)^2]$, як показано на рис. 12(b), а частоти депінінгу при $j^d = 0$ за критерієм -3 дБ дорівнюють 5.72 ГГц і 3.95 ГГц для зразків S і A відповідно. За допомогою феноменологічних виразів $f_d(T) = f_d(0)[1 - (T/T_c)^4]$ і $f_d(H) = f_d(0)[1 - (H/H_{c2})^2]$ з експериментальних даних можуть бути знайдені f_d при $T = 0$ і $H = 0$ і порівнені з даними для плівок ніобію інших авторів, див. рис. 12(f), звідки випливає, що залежність частоти депінінгу від товщини плівки може бути непогано апроксимована виразом $f_d \propto 1/d$.

Нарешті, з залежностей $f/f_d(j/j_d)$ визначено координатні залежності потенціалу пінінгу для трьох зразків. Після обробки даних, як викладено у роботі [11], координатну залежність потенціалу пінінгу у плівці S можна апроксимувати виразом $U(x)/U_0 = [1 - \cos 2\pi x]/2$, тобто потенціалом, який застосовувався у розділі 2. Для зразка A1 залежність $U(x)/U_0$ асиметрична відносно $x/a = 0.5$ (крива має максимум при $x \approx 0.44$) і може бути задовільно описана виразом $U(x)/U_0 = [(1 - \cos 2\pi x) + 0.13(1 - \sin 4\pi x)/2]/2$. Для зразка A2 асиметрія сильніша, і координатна залежність потенціалу апроксимується добре виразом $U(x)/U_0 = [(1 - \cos 2\pi x) + 0.5(1 - \sin 4\pi x)/2]/2$, тобто $e = 0.5$ як у розділі 3. Оскільки $U(x)/U_0$ корелюють добре з AFM профілями наноструктур на рис. 13(d-f), то можна припустити, що домінуючим механізмом пінінгу є зменшення довжини вихорів. Більший розбіг між профілем і розрахованою залежністю потенціалу для плівки S можна віднести до меншої просторової долі наноканавок у цій пінінг-наноструктурі.

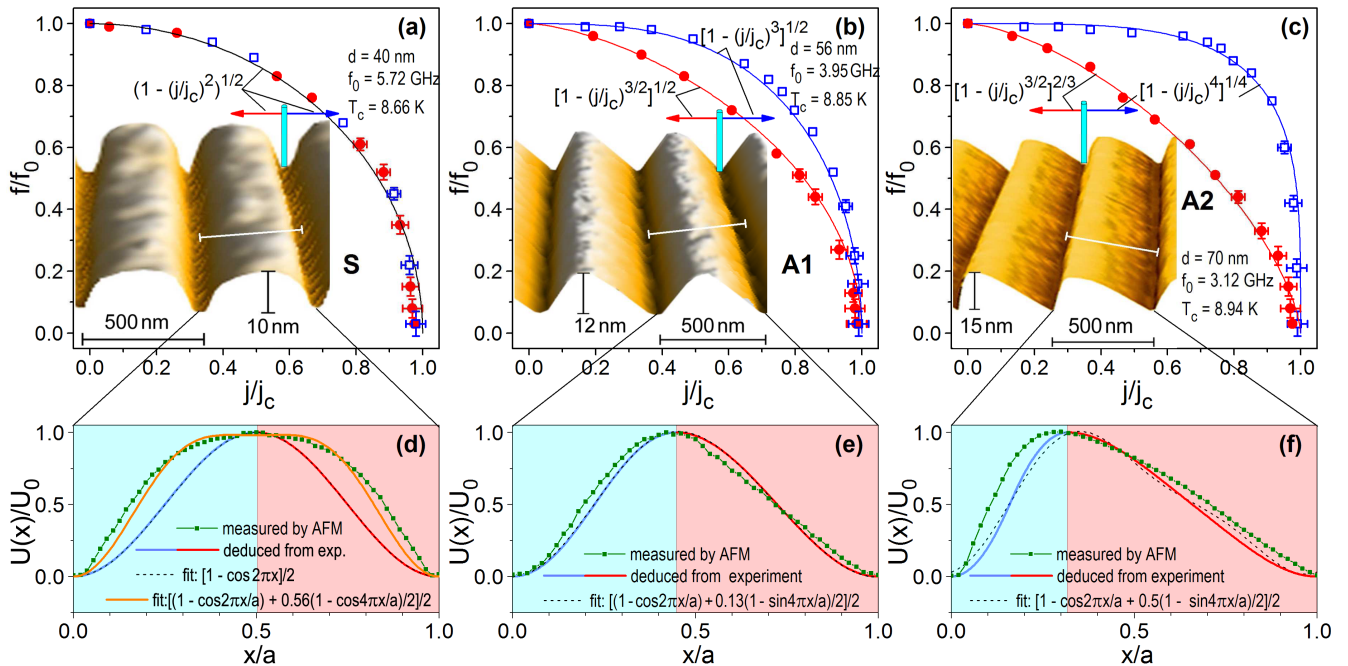


Рис. 13. Зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму при $T = 0.3T_c$. Експериментальні дані для позитивної (кола) і негативної (квадрати) полярності постійного струму поруч з апроксимаціями до виразу загальної форми $f/f_d = [1 - (j/j_d)^{k/l}]^{m/n}$ з показниками k, l, m, n як підписано на графіках. На вставках показані зображення відповідних наноструктур в AFM. Для кожного наноландшафту показаний тільки один вихор, запінінгований на дні наноканавки. При зростанні величини постійного струму вихори осцилюють під дією височастотного струму і таким чином “зондують” кривизну потенціалу пінінгу. (d)-(f) Розраховані координатні залежності потенціалів пінінгу зображені поруч з лінійними профілями відповідних наноструктур у AFM.

У дев'ятому розділі експериментально досліджується магніторезистивний відгук плівок ніобію, які декоровані наносмужками кобальту. Вимірювання електричної напруги на постійному струмі проводилися у геометрії струму, що обертався. Для цього у плівці було виготовлено 8 контактів за схемою, яку показано у нижній частині рис. 14. Дві компоненти струму, I_x і I_y , прикладалися вздовж напрямків x і y та дозволяли таким чином обертати вектор повного струму I у площині зразка. Компоненти електричної напруги, U_x і U_y , вимірювалися одночасно і дозволяли аналізувати повний магнітоопір $R = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} / \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$ як функцію кута α між I і напрямком наносмужок кобальту, які паралельні осі y . У розділі обговорюється анізотропія повного магнітоопору і критичного струму, а також наявність мінімумів опору у залежностях $R(B)$ та їх зникнення при збільшенні α від 0° до 90° . Результати цього розділу оприлюднені у журнальних статтях [1, 3, 5, 15, 16, 22, 23] і матеріалах конференцій [30, 36, 46].

Зразком є плівка ніобію з товщиною 52 нм, поверхню якої у межах 46×46 мкм² у місці перетину струмових контактів декоровано наносмужками кобальту з періодом 400 нм і висотою близько 8 ± 0.5 нм за допомогою FEBID. Зображення наноструктури у AFM показано на рис. 14(a). Повний магнітоопір плівки зображено на рис. 14(c) як функцію кута α при магнітному полі $B = 10$ мТ і температурах від 7.00 до 8.10 К ($0.86 \div 0.99T_c$). При нижчих температурах магніторезистивний відгук істотно анізотропний, причому найменше значення опору досягається при $\alpha = 0^\circ, 180^\circ$, а при наближенні до критичної температури відгук стає ізотропним. Виходячи з того, що рух вихорів відбувається у присутності потенціалу пінінгу типу пральної дошки, еволюція форми кривих пояснюється наступним чином. При куті струму 90° відносно наносмужок вихори рухаються вздовж них, у той час коли при протіканні струму паралельно наносмужкам ($\alpha = 0^\circ$) вони рухаються упоперек до них. Максимуми опору при $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$ і його мінімуми при $\alpha = 0^\circ, 180^\circ$ свідчать про те, що при достатньо низьких температурах, завдяки тому, що $j_c(0^\circ) > j_c(90^\circ)$, ви-

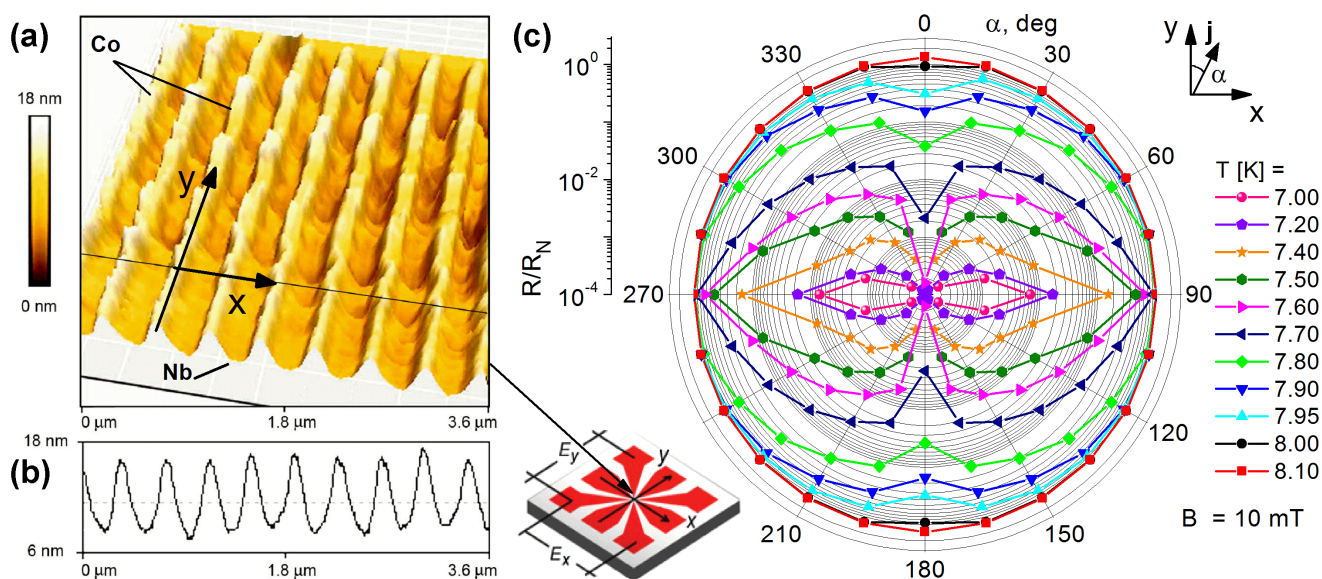


Рис. 14. (a) Зображення поверхні плівки ніобію, декорованої наносмужками кобальту, у атомно-силовому мікроскопі. (b) Профіль наноструктури вздовж осі x . (c) Полярна діаграма повного магнітоопору плівки при обертанні вектора повного струму. R_N позначає повний магнітоопір у нормальному стані. Експериментальну геометрію зображено посередині у нижній частині рисунку.

хори значно легше рухаються вздовж каналів пінінгу для усіх $\alpha \neq 0^\circ, 90^\circ$, ніж долають їх бар'єри. Яскраво виражена форма вісімки є характерною рисою і полярної діаграми на рис. 15(a), на якій нанесено температури, для яких при заданому повному струмі через зразок спостерігається певна напруга.

У кривих $R(B)$, які зображені на рис. 15(b) при $T = 0.99T_c$, спостерігаються особливості при магнітних полях 11 мТ і 15 мТ. Так, мінімуми опору істотні при $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ (і всіх проміжних кутах, які не показано), у той час як ці особливості майже непомітні для $\alpha = 60^\circ$ і зовсім відсутні для 90° . Наявність мінімумів опору означає, що при певних полях пінінг постає більш ефективним, а при $\alpha > 60^\circ$ опір зразка перестає бути чутливим до конфігурації вихорів, які у значній мірі рухаються вздовж каналів потенціалу, де інтенсивність пінінгу не дуже відрізняється від інтенсивності пінінгу між канавками. За виразом для параметру трикутної решітки вихорів $a_\Delta = (2\Phi_0/B\sqrt{3})^{1/2}$ конфігурації вихорів відносно системи наносмужок з періодом $a = 400$ нм зображені на рис. 15(b). З урахуванням геометричного співвідношення між a_Δ і a , поле 11.2 мТ відповідає фундаментальній конфігурації збігу, коли кожний ряд вихорів запінінгований до наносмужки кобальту (при цьому кількість вихорів найбільша) та ефективна міжвихорова взаємодія зникає [Q. Lu *et al.*, Phys. Rev. B **75**, 054502 (2007)]. Це саме та конфігурація, коли вихровий ансамбль рухається як єдине ціле, і можливо застосування результатів теоретичного опису на основі рівняння Ланжевена у наближенні поодинокого вихора. Таким чином, вперше виявлено експериментально, що FEBID пінінг-наноструктури типу пральної дошки можуть ефективно застосовуватися для керування резистивним відгуком у надпровідниках через гайдінг вихорів. Це дозволяє очікувати високочастотні ефекти, аналогічні до тих, що обговорювалися у розділі 8. Подальший розвиток технології FEBID дозволив дослідити, зокрема, надпровідний ефект близькості [15, 16, 22] у нанорозмірних структурах і модифікувати структурні, провідні і магнітні властивості кобальтових наноструктур [23].

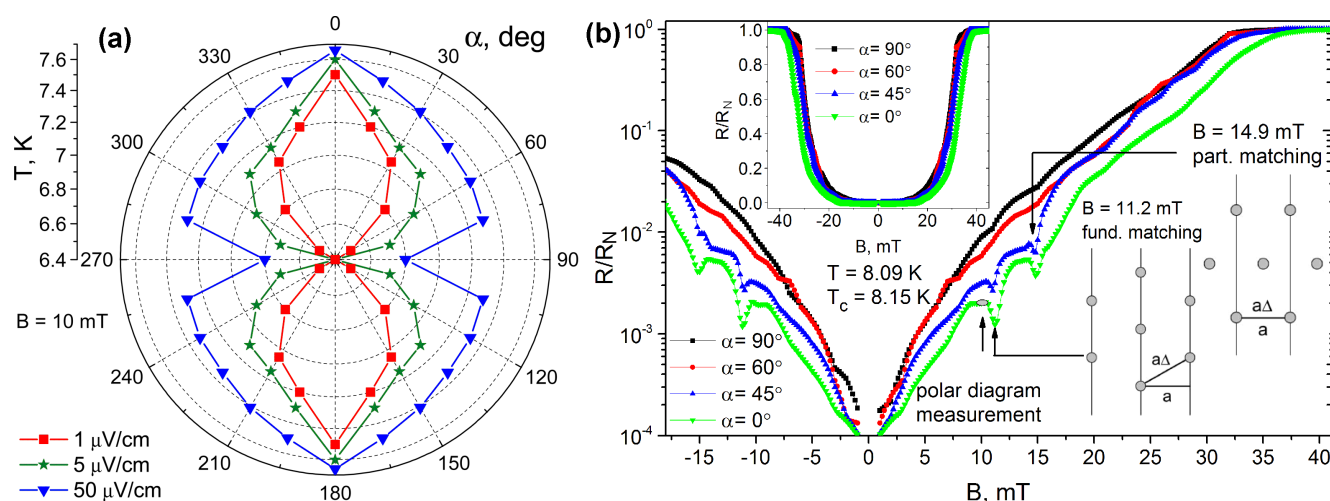


Рис. 15. (a) Полярна діаграма температури, що відповідає напруженості поля за трьома критеріями $E = 1, 5, 50$ мкВ/см і $T = 0.99T_c$. (b) Залежність $R(B)$ для ряду кутів між напрямком струму відносно наносмужок кобальту. Зверху: $R(B)$ у лінійному масштабі. Знизу справа: конфігурації вихорів відносно ландшафту пінінгу, що створюється наносмужками кобальту, для значень магнітних полів, при яких спостерігаються зменшення електричного опору.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу проблему фізики надпровідності, а саме: встановлено закономірності у динаміці вихорів у надпровідних плівках ніобію з пінінг-наноструктурами типу пральної дошки. З'ясовано вплив величини постійного струму, амплітуди і частоти змінного струму на резистивний відгук і поглинання потужності в них.

За результатами проведених досліджень можна зробити такі підсумкові висновки:

1. Виявлено, що асиметрія потенціалу пінінгу, яку привносить постійний струм, призводить до ретчет-ефекту. Встановлено, що конкуренція внутрішньої і привнесеної струмом асиметрій потенціалу пінінгу призводить до інверсії ретчет-ефекту.
2. Виявлено можливі застосування передбачених теоретично ефектів у надпровідних приладах, зокрема генераторі імпульсів, фільтрі, перетворювачі частоти і стохастичному підсилювачі. Встановлено вимоги до їх робочих параметрів.
3. Виявлено оптимальні умови напилювання епітаксціальних плівок Nb (110) на підкладки Al_2O_3 (11 $\bar{2}$ 0) за методом магнетронного розпилення: температура підкладки 850°C , тиск аргону 4×10^{-3} мбар, швидкість напилювання 0.5 нм/с. Встановлено "чистий" надпровідний режим у таких плівках з товщинами близько 50 нм.
4. Встановлено придатність безмаскових нанотехнологій, а саме фрезування поверхні плівки фокусованим пучком іонів та осадження кобальту з метало-органічного прекурсору $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ під дією фокусованого пучка електронів, до створення симетричних та асиметричних пінінг-наноструктур з формою пральної дошки.
5. З'ясовано вплив іонів галію на структурні і резистивні властивості плівок ніобію з наноканавками. Виявлено гайдінг вихорів з регульованою інтенсивністю та серію полів збігу. Встановлено інтенсивність пінінгу у різних частинах зразка, і виявлено її кореляцію зі структурними властивостями плівок.
6. Створено 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.
7. 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 переналаштувати зміною як величини, так і полярності постійного струму.
8. Виявлено, що з даних про зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму можна визначити координатну залежність потенціалу пінінгу. Це являє собою фізичну основу для нового методу неруйнівної характеристики пінінгу у надпровідниках. Створено флюксонний метаматеріал з квантованими рівнями поглинання потужності.
9. Виявлено ряд ефектів, що пов'язані з впорядкуванням і гайдінгом вихорів, зокрема, анізотропію магніторезистивного відгуку, серію магнітних полів збігу і анізотропію критичного струму у плівках ніобію, декорованих наносмужками кобальту. Виявлено надпровідний ефект близькості у нанорозмірних кобальтових структурах, і розроблено технологію модифікації їх локальних структурних і магнітних властивостей.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] **Dobrovolskiy O. V.** Anisotropic magnetoresistive response in thin Nb films decorated by an array of Co stripes / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // *Superconductor Science Technology*. — 2010. — V. 23, №12. — P. 125014(1)–125014(5).
- [2] **Dobrovolskiy O. V.** Fabrication of artificial washboard pinning structures in thin niobium films / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. — 2011. — V. 24, №1–2. — P. 375–380.
- [3] **Dobrovolskiy O. V.** Vortex lattice matching effects in a washboard pinning potential induced by Co nanostripe arrays / **O. V. Dobrovolskiy**, E. Begun, M. Huth, V. A. Shklovskij, M. Tsindlekht // *Physica C: Superconductivity*. — 2011. — V. 471, №15–16. — P. 449–452.
- [4] Shklovskij V. A. Frequency-dependent ratchet effect in superconducting films with a tilted washboard pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Physical Review B*. — 2011. — V. 84, №1. — P. 054515(1)–054515(12).
- [5] **Dobrovolskiy O. V.** Fluxonic properties of vortices in a washboard pinning potential fabricated by focused particle beam techniques / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // *Acta Physica Polonica A*. — 2012. — V. 121, №1. — P. 82–84.
- [6] **Dobrovolskiy O. V.** Crossover from dirty to clean superconducting limit in dc magnetron-sputtered thin Nb films / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth // *Thin Solid Films*. — 2012. — V. 520, №18. — P. 5985–5990.
- [7] Shklovskij V. A. Microwave Absorption by Vortices in Superconductors with a Washboard Pinning Potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Superconductors – Materials, Properties and Applications* / A. Gabovich. — Rijeka, 2012. — Chap. 11. — P. 263–288.
- [8] **Dobrovolskiy O. V.** Current-controlled filter on superconducting films with a tilted washboard pinning potential / **O. V. Dobrovolskiy**, V. A. Shklovskij, M. Huth // *Physics Procedia*. — 2012. — V. 36. — P. 7–10.
- [9] Shklovskij V. A. Nonadiabatic ratchet effect in superconducting films with a tilted cosine pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2012. — V. 400. — P. 022108(1)–022108(4).
- [10] **Dobrovolskiy O. V.** Electrical transport and pinning properties of Nb thin films patterned with focused ion beam-milled washboard nanostructures / **O. V. Dobrovolskiy**, E. Begun, M. Huth, V. A. Shklovskij // *New Journal of Physics*. — 2012. — V. 14. — P. 113027(1)–(27).
- [11] Shklovskij V. A. Determination of coordinate dependence of a pinning potential from a microwave experiment with vortices / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Low Temperature Physics*. — 2013. — V. 39, №2. — P. 120–124.
- [12] **Dobrovolskiy O. V.** Material composition – Pinning strength correlation in Nb thin films with focused ion beam-milled washboard nanostructures / **O. V. Dobrovolskiy**, E. Begun, M. Huth, V. A. Shklovskij // *Physica C: Superconductivity*. — 2013. — V. 494. — P. 102–105.
- [13] Shklovskij V. A. Noise-assisted microwave up-conversion by vortices in thin film superconductors with a dc-biased washboard pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth // *J. Supercond. Novel Magnet.* — 2013. — V. 26, №5. — P. 2079–2083.

- [14] Shklovskij V. A. Determination of the coordinate dependence of a pinning potential from the microwave experiment with vortices / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Fizika Nizkikh Temperatur.* — 2013. — V. 39, №2. — P. 162–167.
- [15] Kompaniets M. Proximity-induced superconductivity in crystalline Cu and Co nanowires and Co nanogranular structures / M. Kompaniets, **O. V. Dobrovolskiy**, C. Neetzel, E. Begun, F. Porrati, W. Ensinger, M. Huth // *J. Appl. Phys.* — 2014. — V. 116. — P. 073906(1)–(10).
- [16] Kompaniets M. Long-range superconducting proximity effect in polycrystalline Co nanowires / M. Kompaniets, **O. V. Dobrovolskiy**, C. Neetzel, F. Porrati, J. Brötz, W. Ensinger, M. Huth // *Appl. Phys. Lett.* — 2014. — V. 104. — P. 052603.
- [17] Shklovskij V. A. Vortex ratchet reversal in an asymmetric washboard pinning potential subject to combined dc and ac stimuli / V. A. Shklovskij, V. V. Sosedkin, **O. V. Dobrovolskiy** // *Journal of Physics : Condensed Matter.* — 2014. — V. 26. — P. 025703(1)–025703(12).
- [18] Shklovskij V. A. DC to AC converter on Abrikosov vortices in a washboard pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Journal of Physics Conference Series.* — 2014. — V. 507, №1. — P. 012007(1)–012007(4).
- [19] Shklovskij V. A. Stochastic resonance of vortices in nanostructured superconductor films with a washboard pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // *Physica C: Superconductivity.* — 2014. — V. 503. — P. 128–131.
- [20] **Dobrovolskiy O. V.** ⁴He sample probe for combined microwave and dc electrical transport measurements / **O. V. Dobrovolskiy**, J. Franke, M. Huth // *Measurement Science and Technology.* — 2015. — V. 26. P. 035502(1)–035502(9).
- [21] **Dobrovolskiy O. V.** AC quantum interference effects in nanopatterned Nb microstrips / **O. V. Dobrovolskiy** // *J. Supercond. Novel Magnet.* — 2015. — V. 28, №2. — P. 469–473.
- [22] Kompaniets M. Superconducting proximity effect in crystalline Co and Cu nanowires / M. Kompaniets, **O. V. Dobrovolskiy**, C. Neetzel, W. Ensinger, M. Huth // *J. Supercond. Nov. Magnet.* — 2015. — V. 28. — P. 431–436.
- [23] Begun E. Post-growth purification of Co nanostructures prepared by focused electron beam induced deposition / E. Begun, **O. V. Dobrovolskiy**, M. Kompaniets, R. Sachser, Ch. Gspan, H. Plank, M. Huth // *Nanotechnology* — 2015. — V. 26, №7. — P. 075301(1)–(11).
- [24] **Dobrovolskiy O. V.** Dual cut-off direct current-tunable microwave low-pass filter on superconducting Nb microstrips with asymmetric nanogrooves / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth // *Applied Physics Letters.* — 2015. — V. 106. — P. 142601(1)–142601(5).
- [25] **Dobrovolskiy O. V.** Alternating current-driven microwave loss modulation in a fluxonic metamaterial / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // *Applied Physics Letters.* — 2015. — V. 107. — P. 162603(1)–162603(5).
- [26] **Dobrovolskiy O. V.** Abrikosov fluxonics in washboard nanolandscapes [Electronic resource] // Cornell University Library, arXiv:1510.06872v1. — Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/1510.06872v1.pdf>. — 2015. — Title from the screen.
- [27] Шкловский В. А. Пиннинг и динамика вихрей в сверхпроводниках // В. А. Шкловский, **А. В. Добровольский** // Учебное пособие для студентов физических специальностей. — Харьков, 2015. — 124 с.

- [28] **Dobrovolskiy O. V.** Fabrication of artificial washboard pinning structures in thin niobium films sputtered onto sapphire substrates / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 2nd International Conference on Superconductivity and Magnetism “ICSM 2010”, — 25–30 April 2010, Antalya, Turkey. — P. 307.
- [29] **Dobrovolskiy O. V.** Realization of an asymmetric washboard pinning potential in nanostructured thin films of niobium / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // “Cryo-conference 2010”, — 9–16 September, 2010, Kosice, Slovakia. — P. 5–6.
- [30] **Dobrovolskiy O. V.** Applied aspects of the vortex dynamics in FIB- and FEBID-nanostructured Nb films / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // Applied Physics and Materials Science Congress “APMAS 2011”, — 12–15 May, 2011, Antalya, Turkey. — P. 116.
- [31] **Dobrovolskiy O. V.** Odd magnetoresistive response in nanostructured Nb thin films / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 26th International Conference on Low Temperature Physics “LT26”, — 10–17 August, 2011, Beijing, China. — P. 132–133.
- [32] Shklovskij V. A. AC-driven vortex ratchet reversal in superconducting films with asymmetric tilted washboard pinning potential / V. A. Shklovskij, V. V. Sosedkin, **O. V. Dobrovolskiy** // 7th International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors “VORTEX VII”, — 10–17 September 2011, Rhodes, Greece. — P. 129.
- [33] **Dobrovolskiy O. V.** Magnetoresistive response in thin Nb films with uniaxial ratchet pinning potential / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 7th International Conference “VORTEX VII”, — 10–17 September, 2011, Rhodes, Greece. — P. 142.
- [34] **Dobrovolskiy O. V.** Current-controlled filter on superconducting films with a tilted washboard pinning potential / **O. V. Dobrovolskiy**, V. A. Shklovskij, M. Huth, // European Conference on Applied Superconductivity (Superconducting Centennial Conference) “SCC 2011”, — 19–23 September, 2011, Den Haag, Netherlands. — P. 16.
- [35] **Dobrovolskiy O. V.** Nonlinear microwave response of vortices in superconducting films with a dc-biased washboard pinning potential / **O. V. Dobrovolskiy**, V. A. Shklovskij, M. Huth // 3rd International Conference on Superconductivity and Magnetism “ICSM 2012”, — 29 April – 02 May 2012, Istanbul, Turkey. — P. 93.
- [36] **Dobrovolskiy O. V.** Electrical transport and pinning properties of Nb thin films with washboard-like nanostructures / **O. V. Dobrovolskiy**, E. Begun, M. Huth, V. A. Shklovskij // 25th Int. Symp. on Superconductivity, — 3–5 December 2012, Tokyo, Japan. — P. 108.
- [37] **Dobrovolskiy O. V.** Insertable ^4He sample probe for combined microwave and dc electrical transport measurements / **O. V. Dobrovolskiy**, J. Franke, M. Huth // DPG Spring Meeting, — 10–15 March 2013, Regensburg, Germany. — TT. 58.23.
- [38] **Dobrovolskiy O. V.** Electrical transport and pinning properties of Nb films with washboard-like nanostructures / **O. V. Dobrovolskiy**, E. Begun, M. Huth, V. A. Shklovskij // DPG Spring Meeting, — 10–15 March 2013, Regensburg, Germany. — TT. 64.11.
- [39] **Dobrovolskiy O. V.** Nonlinear anisotropic magnetoresistive response in niobium microstrips with an array of uniaxial grooves / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 4th Int. Conf. for Young Scient. “LTP-2013”, — 3–7 June 2013, Kharkiv, Ukraine. — P. 21.

- [40] **Dobrovolskiy O. V.** DC-tunable microwave loss in as-grown and nanostructured superconducting Nb films / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 11th Europ. Conf. on Applied Supercond. “EUCAS 2013”, — 15–19 September 2013, Genova, Italy. — P. 620.
- [41] Shklovskij V. A. Generation of voltage pulses by dc current in superconducting films with periodic pinning potential / V. A. Shklovskij, **O. V. Dobrovolskiy** // 11th Europ. Conf. on Applied Supercond. “EUCAS 2013”, — 15–19 September 2013, Genova, Italy. — P. 624.
- [42] **Dobrovolskiy O. V.** Nonlinear vortex dynamics in niobium thin films with anisotropic washboard pinning nanostructures / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 8th International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors “VORTEX VIII”, — 21-26 September 2013, Rhodes, Greece. — P. 86. *Invited talk*.
- [43] **Dobrovolskiy O. V.** Focused particle beams: An application to fluxon manipulation via mask-less nanopatterning / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // International Conference on Electron Correlations in Nanostructures “ECN 2013”, — 3–6 October 2013, Yalta, Ukraine. — P. 40–41. *Invited talk*.
- [44] **Dobrovolskiy O. V.** Synchronization effects in nanopatterned Nb microstrips under combined dc and ac drives / **O. V. Dobrovolskiy**, R. Sachser, M. Hanefeld, M. Huth, V. A. Shklovskij // 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism “ICSM 2014”, — 27 April – 2 May 2014, Antalya, Turkey. — P. 983.
- [45] **Dobrovolskiy O. V.** Suppression of superconductivity and tuning flux-flow properties in Nb thin films via focused particle beams processing / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Zörb, M. Hanefeld, L. Köhs, M. Huth // Internat. Workshop Advances in Nanostructured Superconductors “ANS 2014”, — 4–7 May 2014, Miraflores de la Sierra, Spain. — P. 71–72.
- [46] **Dobrovolskiy O. V.** FEBID for Abrikosov fluxonics applications: Tuning the magneto-resistive response of a superconductor via ferromagnetic decorations / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth // 5th workshop on Focused Electron Beam Induced Processing “FEBIP 2014”, — 22–24 July 2014, Frankfurt am Main, Germany. — P. 155–156.
- [47] **Dobrovolskiy O. V.** Microwave power absorption by vortices in dc-biased nanopatterned Nb microstrips / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 5th Intern. Conf. for Young Scientists “LTP-2014”, — 2–6 June 2014, Kharkiv, Ukraine. — P. 39. *Best talk award*.
- [48] **Dobrovolskiy O. V.** Coupling effects in the vortex dynamics in Nb films with nanogroove arrays / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // International workshop “VORTEX 2015”, — 10–15 May 2015, El Escorial, Spain. — P. 51. *Invited talk*.
- [49] **Dobrovolskiy O. V.** DC-tunable low-pass microwave filter on superconducting nanopatterned Nb microstrips / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 12th European Conference on Applied Superconductivity “EUCAS 2015”, — 6–10 September 2015, Lyon, France. — P. 22. *Invited talk*.
- [50] **Dobrovolskiy O. V.** Assessment of periodic pinning in superconductors at microwaves / **O. V. Dobrovolskiy**, M. Huth, V. A. Shklovskij // 9th International Conference “VORTEX IX”, — 12–17 September 2015, Rhodes, Greece. — P. 88. *Invited talk*.

АНОТАЦІЯ

Добровольський О. В. Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.22 — надпровідність. — Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2016.

Дисертацію присвячено експериментальному і теоретичному дослідженню нелінійної динаміки абрикосівських вихорів у надпровідних тонких плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами типу пральної дошки. Виявлено анізотропію магнітоопору при зміні кута між напрямком струму відносно каналів потенціалу пінінгу, а також ряд магнітних полів збігу, коли положення вихорів геометрично відповідають положенням центрів пінінгу і внаслідок цього дисипація сягає мінімальних значень. Теоретично з'ясовано ретчет-ефект і його інверсію у плівках з симетричним та асиметричним потенціалом пінінгу відповідно. Проаналізовано можливі застосування передбачених ефектів у флюксонних приладах, а саме: високочастотних фільтрах, перетворювачах частоти, генераторах імпульсів, модуляторах, і стохастичних підсилювачах. Експериментально досліджено і теоретично з'ясовано вплив постійного струму на поглинання потужності змінного струму і частоту депінінгу. З експериментальних даних щодо зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму визначено координатну залежність потенціалу пінінгу, що являє собою новий метод неруйнівної характеристики періодичного пінінгу у надпровідниках.

Ключові слова: Вихори Абрикосова, потенціал пінінгу, ніобій, наноструктури, гайдінг вихорів, нелінійна динаміка, ретчет-ефект, поглинання потужності, флюксонні прилади, безмаскова обробка поверхонь фокусованими пучками частинок.

АННОТАЦИЯ

Добровольский А. В. Нелинейная динамика вихрей в сверхпроводящих пленках ниобия с анизотропными пиннинг-наноструктурами. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.22 — сверхпроводимость. — Физико-технический институт низких температур имени Б. И. Веркина Национальной академии наук Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию нелинейной динамики абрикосовских вихрей в сверхпроводящих тонких пленках ниобия с анизотропными пиннинг-наноструктурами типа стиральной доски. Обнаружена анизотропия магнетосопротивления при изменении угла между направлением тока относительно каналов потенциала пиннинга, а также ряд полей совпадения, когда положения вихрей геометрически соответствуют положениям центров пиннинга и вследствие этого диссипация оказывается минимальной. Теоретически объясняется рэтчет-эффект и его инверсия в пленках с симметричным и асимметричным потенциалом пиннинга соответственно. Проанализированы возможные применения предсказанных эффектов в ряде флу-

ксонных приборов, а именно: высокочастотных фильтрах, преобразователях частоты, генераторах импульсов, модуляторах и стохастических усилителях. Экспериментально исследовано и теоретически объяснено влияние постоянного тока на поглощение мощности переменного тока и частоту депиннинга. Из экспериментальных данных об уменьшении частоты депиннинга в присутствии постоянного тока определена координатная зависимость потенциала пиннинга, что представляет собой новый метод неразрушительной характеристики периодического пиннинга в сверхпроводниках.

Ключевые слова: Вихри Абрикосова, потенциал пиннинга, ниобий, наноструктуры, гайдинг вихрей, нелинейная динамика, рэтчет-эффект, поглощение мощности, флюксонные приборы, безмасковая обработка поверхностей фокусированными пучками частиц.

ABSTRACT

Dobrovolskiy O. V. Nonlinear vortex dynamics in superconducting niobium films with anisotropic pinning nanostructures. — Printed as a manuscript.

Thesis submitted for the degree of Doctor of Sciences in Physics and Mathematics by speciality 01.04.22 — Superconductivity. — B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to an experimental and theoretical investigation of the nonlinear dynamics of Abrikosov vortices in superconducting niobium films with anisotropic pinning nanostructures of the washboard type. The films are epitaxial Nb thin films sputtered by dc magnetron sputtering on heated sapphire substrates. Two types of nanostructures fabricated by maskless processing of the film surface by focused particle beams are used in the work. These are (i) nanogroove arrays etched in the films by focused ion beam milling and inducing a pinning potential chiefly by vortex length reduction and (ii) arrays of magnetic Co nanostripes fabricated by focused electron beam induced deposition on the film surface, that influences the vortex motion via order parameter suppression. The changes in the electrical transport and the pinning properties of the nanopatterned films are shown to correlate well with the results of their microstructural and topographical characterization. Both experimental systems are characterized by a strong anisotropic pinning clearly dominating the weak isotropic pinning of background character.

The resistive response and the absorbed microwave power in the nanopatterned Nb films are investigated in the mixed state under combined dc and ac currents by electrical resistance measurements and non-resonance broadband microwave spectroscopy, respectively. For combined microwave and dc resistance measurements a custom-made top-loading ^4He sample probe has been built and successfully tested. For the films of both types several generic effects are observed. Specifically, this is a pronounced anisotropy of the magnetoresistive response as the transport current direction is rotated with respect to the guiding direction of the pinning landscape (vortex guiding effect), the critical (depinning) current anisotropy, and a series of matching fields at which the energy losses are substantially reduced, as seen in both, electrical resistance and microwave loss measurements. The latter effect is due to the vortex pinning

efficiency enhancement caused by the spatial commensurability of the Abrikosov vortex lattice with the underlying pinning nanolandscape, i.e. when each row of vortices is pinned at the groove bottom or to a Co nanostripe and there is no interstitial vortices. For the ratchet pinning landscapes induced by nanogrooves with an asymmetric cross-section, the depinning currents for the steep and the gentle groove slope notably differ and thereby allow for rectification of an ac current. This diode effect can, in turn, be suppressed by superimposing a dc bias counterbalancing the internal asymmetry of the original pinning potential by a dc-tunable, external asymmetry induced by the tilt of the pinning potential. The dependence of the depinning frequency not only on the dc value, but also on the dc polarity is observed and is implemented in dual cut-off, dc-bias tunable microwave filters and in fluxonic metamaterials with quantized microwave loss levels. This substantiates an advanced Abrikosov fluxonic functionality of superconducting films with ratchet pinning landscapes and is relevant for tuning the microwave loss in superconducting planar transmission lines. In particular, the key fluxonic tools for the vortex manipulation, namely vortex pinning, vortex guiding and the ratchet effect, which allow for the dynamical, directional and orientational control of the vortex motion, respectively, are supplemented by the three groups of coupling effects in the time, coordinate, and energy spaces: Temporal synchronization manifests itself as Shapiro steps in the current-voltage curves when one or a multiple of the vortex hopping period coincides with the period of the ac drive. Spatial commensurability becomes apparent through dissipation dips at the matching fields, and stochastic resonance takes place when a certain level of noise assists the amplification of a small ac signal.

On the basis of the single-vortex Langevin equation solved in terms of matrix continued fractions, the ratchet effect and its reversal are elucidated for a symmetric and an asymmetric pinning potential, respectively. Special attention is devoted to the physical interpretation of the exact results by comparing them to the quasistatic and high-frequency solutions at zero temperature, derived in terms of analytical and Bessel functions, respectively. The feasibility of using some of the predicted effects in fluxonic applications is analyzed for high-frequency cut-off filters, frequency converters, generators of ac pulses and stochastic amplifiers. The effect of a dc bias on the absorbed power of the high-frequency stimulus and the depinning frequency is experimentally investigated and theoretically elucidated. The coordinate dependence of the pinning potential is deduced from the experimental data on the absorbed ac power and correlates reasonably well with the nanostructures' cross-sections measured by atomic force microscopy. This finding substantiates the physical background for a new approach for the non-destructive evaluation of superconductors with periodic pinning, where the type and details of the pinning potential are crucial for the conductor's strong current-carrying ability, but are hard to suppose a priori. The obtained results are not only of immediate relevance for superconducting circuits and Abrikosov fluxonic applications, but they are also generic to a broad range of nonlinear stochastic systems across various fields of science and technology, which can be described on the basis of the Langevin equation and are subjected to a combination of dc and ac stimuli.

Keywords: Abrikosov vortices, pinning potential, niobium, nanostructures, vortex guiding, nonlinear dynamics, ratchet effect, power absorption, fluxonic applications, mask-less processing of surfaces by focused particle beams.

Підписано до друку 28.12.2015 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 1,6. Наклад 100 прим.

Надруковано з готового оригінал-макету у друкарні ФОП Петров В. В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис за № 2480000000106167 від 08.01.2009 р.
61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79-В, к. 137,
тел. (057) 778-60-34, e-mail: bookfabrik@rambler.ru

