

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ВТНП

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

В роботі показано стиснення амплітудної залежності ширини сходишки Шапіро на резонансній гілці, що виникає на ВАХ шунтованого LC-контуром джозефсонівського переходу. На цій основі запропоновано новий метод створення стандарту напруги, що дозволяє істотно зменшити використану потужність зовнішнього електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: сходишки Шапіро, LC-контур, джозефсонівський перехід,

Abstract

The paper describes phenomenon of compressing amplitude dependence of the width of the Shapiro step on the resonance branch, which arises on the VAC that shaded by the LC-contour of the Josephson transition. On this basis, a new method of creating a voltage standard is proposed, which allows to reduce used power of the external electromagnetic radiation.

Keywords: Shapiro step, LC-contour, Josephson transition.

Вступ

Одним з найбільш перспективних об'єктів джозефсонівських наносистем є високотемпературні надпровідники (ВТНП) [1-4]. Популярність ВТНП систем пов'язана не тільки з високою критичною температурою, що дає змогу отримати надпровідність при кімнатній температурі, але і з виявленим інтенсивним когерентним терагерцовим електромагнітним випромінюванням з таких систем, які характеризуються широкими можливостями для практичних застосувань [5]. ВТНП матеріали, такі як $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ B, є шаруватими матеріалами, де надпровідні (S-шари) і діелектричні шари утворюють систему пов'язаних джозефсонівських переходів (ПДП) [6]. Таким чином, досліджуваний сигнал в терагерцовому діапазоні є випромінюванням з системи ПДП. Основними напрямками досліджень в цій області є визначення механізму випромінювання і пошук нових можливостей для збільшення його потужності, яка, згідно з останніми даними, становить від 150 до 600 мкВт при частоті 0,5 ТГц з використанням декількох послідовно з'єднаних систем ПДП. Особливий інтерес становить те, що пік інтенсивності випромінювання пов'язаний з деякою областю на вольт-амперній характеристиці (ВАХ), де спостерігається параметричний резонанс [7, 8].

Основна мета роботи полягає в дослідженні фазової динаміки і вольт-амперних характеристик системи зв'язаних джозефсонівських переходів в надпровідниках, їх топологічних, нерівноважних і резонансних властивостях. Було поставлено ряд завдань по дослідженню резонансних властивостей системи ПДП, шунтованої резонансним контуром. Зокрема, вивчити вплив резонансів сформованого контуру на виникаючу в системі подовжню плазмову хвилю і досліди вплив зовнішнього періодичного впливу на нерівноважні властивості такої системи.

Одним із завдань роботи з дослідження системи ПДП є вивчення впливу нерівноважних умов, зокрема зарядового розбалансу, на ВАХ ВТНП, а також на відгук такої системи на зовнішній періодичний вплив. Значний інтерес представляє розробка нових методів детектування майоранівських пов'язаних станів в джозефсонівському переході з топологічно нетривіальним бар'єром. Заплановано розглянути такий перехід в рамках моделі ДП шунтованого ємністю і опором (RCSJ-моделі), яка є більш реалістичною в порівнянні з моделлю ДП без ємності (RSJ-моделі).

Основна частина

В роботі [8] було показано, що при параметричному резонансі на S-шарі виникають коливання заряду, які можуть мати складний характер в залежності від числа переходів в стеку, параметра зв'язку, параметра дисипації і граничних умов. Фур'є-аналіз тимчасової залежності заряду на S-шарі показує наявність різних частот в спектрі, зокрема, частоту Джозефсона, частоту подовжньої плазмової хвилі (ППХ) і їх комбінації. Досліджува-

на ППХ може бути отримана у вигляді рішення системи рівнянь в рамках моделі ємнісно-пов'язаних джозефсо-нівських переходів. Ця модель була запропонована в [9] для опису ВТНП матеріалів. ППХ розпочинається в стесі джозефсонівських коливань [10], частота яких ω_J визначається напругою на переході, і поширюється перпендикулярно площині шарів, а параметричний резонанс реалізується при $\omega_j = 2\omega_{LPW}$, де ω_{LPW} – частота ППХ [1, 7]. Це означає, що є резонансна точка, при якій в стеку переходів створюється ППХ з певним хвильовим числом.

Особливістю ефекту Джозефсона є поява сходинок Шапіро на ВАХ при заданих значеннях напруги [2]. Прилади, засновані на цьому ефекті, широко використовуються в якості стандартів напруги [3, 4]. Захоплення частоти призводить також до синхронізації коливань фази в системі ПДП в межах сходинки. Детальне вивчення сходинок Шапіро в системі ПДП при різних резонансних умовах відкриває цікаву область досліджень з потенціалом для різних застосувань. Ще одна особливість з'являється при розгляді системи ПДП шунтуваної резонансним контуром [5-9]. На ВАХ такої системи з'являються нові резонансні гілки, які можуть приводити до появи додаткового параметричного резонансу, а сходинка Шапіро демонструє зміну властивостей в області резонансної гілки [2]. Таким чином, шунтування дозволяє ефективно контролювати і маніпулювати резонансними особливостями, які потенційно корисні в надпровідній електроніці.

Іншим напрямком застосування джозефсонівських наносистем є індустрія квантових комп'ютерів. Великий інтерес в цій галузі за останні роки привертають майоранівські ферміони (частки, які є своєю власною античастинкою і описані реальними хвильовими функціями) у зв'язку з тим, що такі ферміони можуть бути використані як кубіти в квантовому комп'ютері. Було висунуто кілька пропозицій по виявленню таких ферміонів в системах конденсованого стану [2-10]. Зокрема, майоранівські ферміони можуть бути реалізовані як локалізовані внутрішньо-щільові стани в надпровіднику з триплетним p – спаруванням [6-9]. Такі стани також можуть виникати на кінцях одновимірного (1D) надпровідного дроту з сильним спін-орбітальним зв'язком, що знаходиться в магнітному полі [7, 8]. ДП в присутності майоранівських пов'язаних станів показує 4π – періодичність коливань надпровідного струму [3], а ВАХ такого ДП, на відміну від його тривіальних аналогів, демонструє тільки парні ступені Шапіро. Ця особливість має назву дрібного ефекту Джозефсона і в останні роки активно досліджується в різних системах, оскільки представляє собою експериментальне підтвердження утворення таких станів [3].

Експериментальне виявлення майоранівських пов'язаних станів ґрунтується, в основному, або на виявленні дробного ефекту Джозефсона [3], або на вимірюванні піку тунельної провідності всередині надпровідної щільни [4]. Однак, експериментальні вимірювання піку провідності [5] показали, що він не призводить до очікуваного значення $2e^2/h$ тунельної провідності і погано захищений від перешкод [6, 7]. Внаслідок чого, виявлення парних ступенів Шапіро забезпечує більш надійний спосіб детектування майоранівських ферміонів. Він являє собою фазо-чутливий метод, який вільний від впливу шуму [2]. Отже, дробовий ефект Джозефсона в переходах з нетривіальними бар'єрами є одним з найбільш перспективних методів виявлення майоранівських ферміонів в системах конденсованого стану [8, 9].

Ще однією сферою застосування джозефсонівських наносистем є надпровідна спінтроніка. Основним завданням в цій галузі, є вивчення спінового струму в твердотільних речовинах. Більша частина ефектів в ній базується на зв'язку зарядних і спінових ступенів свободи, що робить актуальним дослідження нерівноважних ефектів, пов'язаних з зарядним і спіновим розбалансом [4-6].

Нерівноважні ефекти, що виникають при стаціонарній інжекції струму в шаруваті надпровідні матеріали, вивчалися в роботах [1, 5]. Фактично, через те, що заряд не екранує в S-шарах, сформована система ПДП у високотемпературних надпровідниках не може перебувати в стані рівноваги при будь-якому значенні електричного струму [9]. Вплив зарядового зв'язку на коливання джозефсонівської плазми було розглянуто в роботах [5, 9]. Однак розбаланс заряду в систематичній теорії збурень розглядається безпосередньо, оскільки він активується флуктуаціями скалярного потенціалу [4, 5], і тільки в роботі [6], він враховується як незалежна ступінь свободи, і, отже, її результати сильно відрізняються від попередніх.

Експериментальні свідчення існування зрівноважених ефектів в системі ПДП були отримані в роботі [5] і були пояснені розбалансом заряду в надпровідних шарах, створених інжекцією квазічасткового струму. В основі експерименту лежала ідея накопичення заряду на S-шарах між резистивним і надпровідним переходами під впливом струму зміщення. Струм через резистивний перехід створюється в основному квазічастинками, а струм через бар'єр в надпровідному стані переноситься куперівськими парами. Це призводить до флуктуацій заряду надпровідного конденсату в S-шарах, що може викликати зсув хімічного потенціалу конденсату і розбаланс гілок спектра елементарних збуджень квазічастинок. В роботі [5] також експериментально спостерігалися зсув сходинки Шапіро по напрузі від її канонічного значення.

Відповідь на питання про те, наскільки сильні нерівноважні ефекти у реальній системі, важлива для різних сфер застосування. У цій роботі сформовано відповідь на це питання. Вивчення нерівноважних ефектів, створених інжекцією струму в зв'язаній системі джозефсонівських переходів, було представлено в роботі [6], в якій було показано як зрівноважений параметр впливає на структуру гілок ВАХ при різних значеннях зв'язку та параметра Мак-Камбера. Однак вплив зовнішнього випромінювання на розбаланс заряду не було взято до уваги.

Важливим моментом для різних варіантів використання джозефсонівських наноструктур є можливість маніпулювати і контролювати їх параметри та характеристики. Одним з ефективних способів впливу на ДП є його шунтування резонансним контуром [5-9]. Зокрема, шунтування може призвести до синхронізації коливань надпровідного струму в стеку ПДП. Шунтування ДП індуктивністю і ємністю (LC-шунтування) призводить до утворення єдиного резонансного контуру, що включає ємність і індуктивність шунта, а також ємність ДП. Коли частота Джозефсона ω_J , дорівнює резонансній частоті контуру ω_{rc} , коливання в системі ПДП синхронізуються. Цей резонанс може з'являтися на ВАХ у вигляді: сходинок [5], горбів і провалів [5,6]. Про існування таких резонансних особливостей на ВАХ в різних системах ПДП з шунтуванням повідомлялось в ряді експериментальних і теоретичних робіт [1,2]. Відзначимо, що виявлений в роботі [3] пік інтенсивності когерентного електромагнітного випромінювання з двовимірної системи ПДП на основі $Nb/Al/AlOx/Nb$ був викликаний резонансом джозефсонівських коливань і коливань в резонансному контурі, що призвело до синхронізації коливань в різних ДП. В роботі [4] була продемонстрована можливість появи в системі ПДП з LC-шунтуванням додаткового параметричного резонансу. Як і очікувалось, в цьому випадку також порушується ППВ з частотою, яка дорівнює половині частоти Джозефсона. Таким чином, шунтування є зручним інструментом здатним змінювати властивості ППВ.

Вже згадана система також має великий потенціал для використання в квантовій метрології [4]. Зокрема, найбільш точні стандарти вольта на даний момент отримують випромінюючі ланцюжки ДП електромагнітної хвилі. У свою чергу, шунтування ДП дозволяє впливати на властивості сходинок Шапіро, коли вони знаходяться на резонансній гілці ВАХ [1].

Представлені результати моделювання системи ПДП і одиночного ДП, що шунтувалися резонансним контуром. Описані особливості, які з'являються в шунтованій системі ПДП. Наведені результати дослідження властивостей одиночного ДП шунтованого LC-елементами, а також розглянута перспектива використання шунтування ДП для оптимізації експериментів по отриманню стандартів напруги, за допомогою зміни властивостей сходинок Шапіро. Дослідженню можливості впливу і керування ППВ в системі ПДП за допомогою шунтування системи резонансним контуром.

Розглянуто систему ПДП в рамках моделі з ємнісним зв'язком і дифузійним струмом (ССJJ + DC модель [7, 10]), шунтована LC-елементами. Опір R не включений в шунтуючий ланцюг з метою виділення основних ефектів впливу резонансного контуру на властивості системи. Зв'язок між переходами в системі виникає внаслідок дуже малої товщини надпровідних і діелектричних шарів. Товщина S-шарів в ВТНП ($\sim 3^\circ A$) порівняно з дебаївською довжиною екранування електричного заряду r_D , тому в окремому S-шарі немає повного екранування заряду і електричне поле, наведене в окремому джозефсонівському переході, проникає в сусідні.

Висновки

Показано, що в системі пов'язаних ДП часова залежність повної напруги стека відображає виникнення електричного заряду на надпровідних шарах, що може служити основою методу його реєстрації.

Запропоновано фазочутливий метод виявлення 4π -періодичності надпровідного струму в джозефсонівських наноструктурах, заснований на зміні властивостей непарних сходинок Шапіро та виникненні додаткової послідовності субгармонік на ВАХ.

Показано, що зарядовий розбаланс гілок спектра елементарних збуджень квазічастинок призводить до нахилу сходинок Шапіро на ВАХ, який зростає зі збільшенням параметра нерівноважності. Продемонстровано розподіл величини нахилу сходинок Шапіро уздовж стеку, що обумовлено наявністю зв'язку між джозефсонівськими переходами.

Були проведені детальні дослідження ПДП в ВТНП у зовнішньому електромагнітному полі з урахуванням ефекту розбалансу гілок спектра елементарних збуджень квазічастинок. Було показано, що розбаланс заряду призводить до нахилу сходинок Шапіро на ВАХ ПДП. Величина нахилу збільшується з збільшенням параметра нерівноважності. Зв'язок між переходами призводить до розподілу величини нахилу вздовж стеку. На ВАХ також спостерігається зсув сходинок Шапіро від її канонічного положення, що визначається частотою зовнішнього випромінювання. Цей зсув обумовлений виникненням контактної напруги і в меншій мірі зарядовим розбалансом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Самолук І. А. Квантові приймачі для терагерцевого спектру частот/В.М. Кичак, І.А. Самолук, М.В. Васильківський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018) XVIII міжнародної науково-технічної конференції, 8-13 червня 2018 р. – Матеріали – Одеса. – 2018 с. 212
2. T.M.Benseman, A. E. Koshelev, K. E. Gray, et al. / Tunable terahertz emission from $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ mesa devices // Phys. Rev. B – 2011. – Vol. 84. – pp. 064523.

3. A. E. Koshelev / Stability of dynamic coherent states in intrinsic Josephson junction stacks near internal cavity resonance // Phys. Rev. B – 2010. – Vol. 82. – pp. 174512.
4. J. Pfeiffer, A. A. Abdumalikov, Jr., M. Schuster, and A. V. Ustinov / Resonances between fluxons and plasma waves in underdamped Josephson transmission lines of stripline geometry // Phys. Rev. B – 2008. – Vol. 77. – pp. 024511.
5. A. A. Yurgens / Intrinsic Josephson junctions: recent developments // Supercond. Sci. Technol. – 2000. – Vol. 13. – pp. R85
6. L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, et al. / Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors // Science – 2007. – Vol. 318. – pp. 1291.
7. U. Welp, K. Kadowaki and R. Kleiner / Superconducting emitters of THz radiation // Nat. Photonics – 2013. – Vol. 7. – pp. 702.
8. Yu. M. Shukrinov and F. Mahfouzi / Influence of Coupling between Junctions on Breakpoint Current in Intrinsic Josephson Junctions // Phys. Rev. Lett. – 2007ю – Vol. 98. – pp. 157001.
9. Yu. M. Shukrinov, F. Mahfouzi, and M. Suzuki / Structure of the breakpoint region on current-voltage characteristics of intrinsic Josephson junctions // Phys. Rev. B – 2008. – Vol. 78. – pp. 134521.
10. T. Koyama and M. Tachiki / I - V characteristics of Josephson-coupled layered superconductors with longitudinal plasma excitations // Phys. Rev. B – 1996. – Vol. 54. – pp. 16183.

Самоліук Ірина Анатоліївна — студентка групи ТКП-15б, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: tkp15b.samoliuk@gmail.com.

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com.

Samolyuk Irina A. — Department of Infocommunication, Electronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tkp15b.samoliuk@gmail.com

Supervisor: **Vasykivskyi Mikola V.** – Ph.D., Senior lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com