

Перспективы исследования джозефсоновского SFS ϕ_0 -перехода

Ю. М. Шукринов^{1,2,3,*}, Е. Коваленко^{4,**}, J. Tekic^{5,***}, К. В. Куликов^{1,2,****},
M. Nashaat^{1,6,*****}

¹ЛТФ, ОИЯИ, Дубна, Московская обл., 141980, Россия

²Университет Дубна, Московская обл., 141980, Россия

³МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия

⁴Центр для развития численных технологий, Красногорск, Россия

⁵Laboratory for Theoretical and Condensed Matter Physics - 020, "Vinc" Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, P.O. Box 522, 11001, Belgrade, Serbia

⁶Department of Physics, Faculty of Science, Cairo University, 12613 Giza, Egypt

*shukrinov@theor.jinr.ru, **valinbov@gmail.com, ***jstecic@gmail.com, ****kulikov@theor.jinr.ru, *****sci_phy_majed@windowslive.com

Проявление взаимосвязи сверхпроводимости и магнетизма в аномальных джозефсоновских переходах и возможность их использования в сверхпроводниковой спинтронике привлекает большое внимание. В докладе приводятся результаты недавних исследований динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновского SFS ϕ_0 перехода. В частности, обсуждаются эффекты синхронизации джозефсоновских осцилляций и магнитной прецессии в ферромагнитном слое под действием внешнего электромагнитного излучения. Демонстрируется возникновение гистерезисных и хаотических явлений в магнитной динамике ϕ_0 -перехода и их проявление на вольт-амперной характеристике.

Введение

Сосуществование и взаимное влияние сверхпроводимости и магнетизма в течение длительного времени остается одной из наиболее актуальных проблем физики конденсированного состояния [1–3]. Интересный аспект этой проблемы проявляется в физике аномального джозефсоновского перехода, где реализуется прямая связь джозефсоновской фазы и намагниченности. Это приводит к джозефсоновскому ферромагнитному резонансу с уникальными свойствами, в частности, возникновению шапироподобных ступенек на ВАХ [4–6], различным устойчивым магнитным траекториям [7], проявлению нелинейных свойств осциллятора Даффинга [8]. Интересные перспективы открываются в области сверхпроводниковой спинтроники, в частности, основанные на пере-

вороте магнитного момента сверхпроводящим током [9, 10], на проявлении свойств маятника Капицы при ϕ_0 -переходе [11]. Внешнее излучение приводит к возникновению дополнительных резонансных пиков, свойства которых зависят от периодического сигнала и динамики джозефсоновского перехода [12].

В настоящем докладе нами представлены результаты недавних исследований динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновского SFS ϕ_0 -перехода под действием внешнего электромагнитного излучения [5, 13]. Новым элементом в рассмотрении данной проблемы является учет магнитной компоненты излучения.

Результаты

Исследование динамики намагниченности в ϕ_0 -переходе под действием внешнего электромагнитного излучения проводилось на основе решения системы уравнений Ландау – Лифшица – Гильберта – Джозефсона [5, 8] с эффективным полем:

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \frac{K}{M_0} G r \sin\left(\varphi - r \frac{M_y}{M_0}\right) \hat{y} + \left(\frac{K}{M_0} \frac{M_z}{M_0} - H_R \sin(\varphi - r t) \right) \hat{z}$$

где $G = E_J / (KV)$ представляет собой отношение джозефсоновской энергии к энергии магнитной анизотропии. Легкая ось ферромагнетика и градиент спин-орбитального потенциала направлены вдоль оси z .

В этом случае ϕ_0 пропорционален y -компоненте намагниченности ферромагнетика M . Переход находится под действием линейно поляризованного излучения с частотой Ω_R , а магнитная составляющая H_R параллельна оси z .

На рис. 1 представлено влияние электрической и магнитной составляющей внешнего излучения на ВАХ в области ферромагнитного резонанса, когда частота ферромагнитного резонанса близка к джозефсоновской, т. е. когда $\omega_F \approx \omega_J$. Мы демонстрируем три случая: 1) только эффект электрической компоненты (ступенька Шапиро), 2) магнитной компоненты (ступенька Буздина), 3) как электрической, так и магнитной компонент (химерная ступенька). Во всех случаях ступенька постоянного напряжения появляется при $\omega_R = V = 0,458$. Однако ширина ступеньки Шапиро

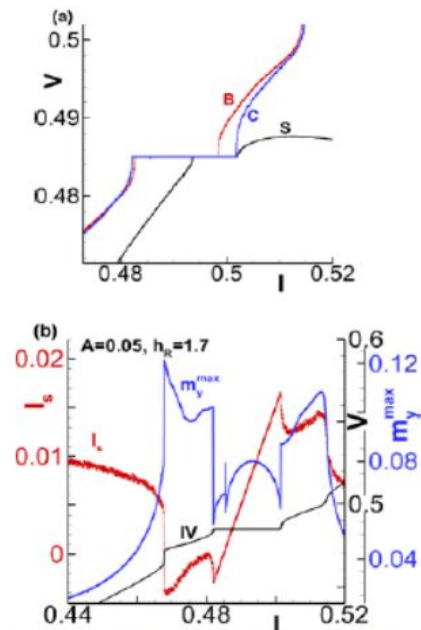


Рис. 1. Эффекты внешнего излучения: *a* – части IV характеристики, демонстрирующие ступеньку Буздина, ступеньку Шапиро и химерную ступеньку; *b* – химерная ступенька на IV характеристике и ее проявление на зависимостях $m_y^{\max}(I)$ и $I_s(I)$ при $A = 0,05$, $h_R = 1,7$, $r = 0,5$

меньше ступеньки Буздина и химерной ступеньки для заданных параметров модели $A = 0,05$, $h_R = 1,7$. Кроме того, мы видим, что ширина химерной ступеньки не является тривиальной суммой ступенек Шапиро и Буздина.

На рис. 1, б показаны среднее напряжение V , максимальное значение магнитной компоненты m_y^{\max} и сверхпроводящий ток I_c вдоль химерной ступени как функции тока смещения при его уменьшении. Результаты показывают, что m_y^{\max} в текущем интервале, соответствующем химерной ступени, обнаруживает интересную «пузырьчатую» особенность.

Такое специфическое поведение является результатом двух конкурирующих эффектов, влияющих на магнитный момент в области ФМР. То есть джозефсоновские осцилляции создают прецессию магнитного момента, а ее амплитуда возрастает вместе с током, при этом прецессирующий магнитный момент также испытывает воздействие магнитной составляющей внешнего излучения. Кроме того, синхронизация джозефсоновских осцилляций магнитной составляющей внешнего излучения проявляется на зависимости сверхпроводящего тока вдоль химерной ступеньки.

Выводы

Таким образом, магнитная и электрическая составляющие внешнего излучения возбуждают прецессию магнитного момента, которая затем посредством взаимной связи синхронизирует джозефсоновские осцилляции. В результате, и джозефсоновские осцилляции, и магнитная прецессия синхронизованы вдоль химерной ступеньки.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-72-30029.

Литература

1. A. S. Mel'nikov, S. V. Mironov, et al. // *Phys. Usp.* 65, 12 (2022).
2. I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, M. A. Silaev // *J. Phys. Condens. Matter.* 34, 353001 (2022).
3. Yu. M. Shukrinov // *Phys. Usp.* 65, 317 (2022).
4. M. Nashaat, A. E. Botha, and Yu. M. Shukrinov // *Physical Review B.* 97(22), 224514 (2018).
5. S. A. Abdelmoneim, Yu. M. Shukrinov, K. V. Kulikov, H. ElSamman, and M. Nashaat // *Physical Review B.* 106, 014505 (2022).
6. I. A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov, V. I. Chichkov, M. Silaev, I. V. Shchetinin, A. A. Golubov, V. V. Ryazanov, A. V. Ustinov, and M. Yu. Kupriyanov // *Physical Review Applied.* 14 (2), 024086 (2020); I. A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, O. V. Emelyanova, I. V. Shchetinin, V. V. Ryazanov, A. A. Golubov, and V. S. Stolyarov // *Physical Review Applied.* 19 (3), 034025 (2023).
7. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and K. Sengupta // *Physical Review B.* 99(22), 224513 (2019).
8. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, A. Janalizadeh, and M. R. Kolahchi // *Physical Review B.* 104(22), 224511 (2021).
9. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. Sengupta, and A. Buzdin // *Appl. Phys. Lett.* 110, 182407 (2017).
10. A. A. Mazanik, I. R. Rahmonov, A. E. Botha, and Yu. M. Shukrinov // *Phys. Rev. Applied.* 14, 014003 (2020).
11. Yu. M. Shukrinov, A. Mazanik, I. R. Rahmonov, A. E. Botha and A. Buzdin // *Europhysics Letters.* 122, 37001 (2018).
12. K. V. Kulikov, D. V. Anghel, M. Nashaat, M. Dolineanu, M. Sameh, and Yu. M. Shukrinov // *Cond-mat arXiv:2307.10989* (2023).
13. Yu. M. Shukrinov, E. Kovalenko, J. Tekic, K. Kulikov, and M. Nashaat // *Cond-mat arXiv: 2308.03701* (2023).