

Переключение намагниченности импульсом напряжения между вырожденными стабильными состояниями в джозефсоновском SFS-переходе на трехмерном топологическом изоляторе

И. Р. Рахмонов^{1,2,3}, Н. М. Широков^{1,3}, Ю. М. Шукринов^{1,2,3}, И. В. Бобкова^{3,4}

¹ЛТФ, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.

²Государственный университет Дубна, Дубна, Московская обл.

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл.

⁴НИУ «Высшая школа экономики», Москва

В работе рассмотрена система из джозефсоновского перехода сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник (SFS) на поверхности трехмерного топологического изолятора. В режиме приложенного напряжения в рассматриваемой структуре возникает четырехкратное расщепление с вырожденными стабильными состояниями. В работе исследуется динамика переходов между стабильными состояниями при действии импульса напряжения.

Введение

В джозефсоновском переходе сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник (S/F/S) на поверхности трехмерного топологического изолятора, содержащего квазичастицы Дирака, сильная зависимость энергии Джозефсона от ориентации намагниченности открывает возможность к управлению намагниченностью с помощью джозефсоновского тока или джозефсоновской разности фаз [1]. Из-за наличия жесткой связи дираковских квазичастиц эта зависимость может привести к расщеплению легкой оси ферромагнетика в режиме приложенного напряжения. В результате образуется четырехкратно вырожденное состояние (рис. 2). Схема рассматриваемой системы приведена на рис. 1.

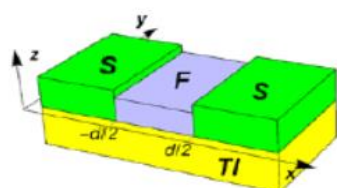


Рис. 1. Эскиз исследуемой системы [1]

Исследование динамики намагниченности под действием пульса напряжения проводилось на основе решения системы уравнений Ландау – Лифшица – Гильберта (ЛЛГ) [1]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$$

с компонентами эффективного поля

$$\frac{H_{\text{eff},x}}{H_F} = \Gamma \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-\frac{\tilde{d}}{\cos(\varphi)}} \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\gamma m_x \cdot \tan(\varphi)) d\varphi \right] \times [1 - \cos(\omega_t - \gamma m_y)],$$

$$\frac{H_{\text{eff},y}}{H_F} = \Gamma \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-\frac{\tilde{d}}{\cos(\varphi)}} \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\gamma m_x \cdot \tan(\varphi)) d\varphi \right] \times \sin(\omega_t - \gamma m_y) + m_y,$$

$$\frac{H_{\text{eff},z}}{H_F} = 0, \quad \omega_t = (\Omega_t + A) \cdot t,$$

где A – импульс напряжения, Ω_t – джозефсоновская частота.

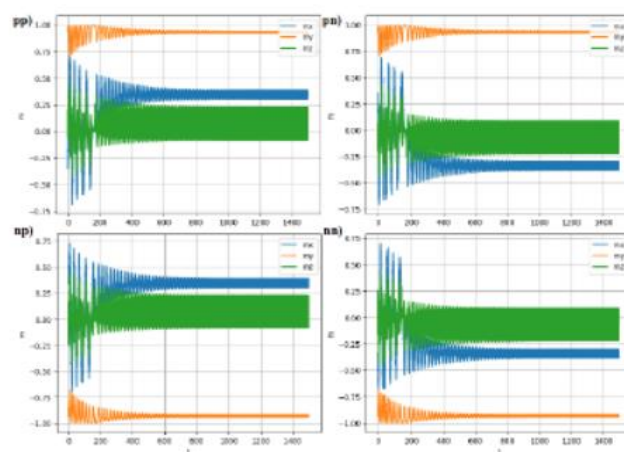


Рис. 2. Реализуемые состояния

Результаты

На основе численного моделирования уравнений динамики намагниченности в данной системе исследовано управление магнитным моментом пульсом напряжения.

С изменением амплитуды напряжения при фиксированной длительности пульса и постоянной Ω_t , была продемонстрирована реализация переключений намагниченности между устойчивыми состояниями, как показано на рис. 3. Здесь первый индекс относится к y -й компоненте магнитного момента (p – positive = 1, n – negative = -1), тогда как второй индекс относится к m_x и m_z ($m_x > 0, m_z > 0$ – positive).

Анализируя систему, мы выявили параметры модели, влияющие на динамику переходов.

На рис. 4 представлена зависимость компонент магнитного момента от амплитуды. Видно, что при $\omega = 1$, система переходит в нестабильное состояние. В результате происходит переход между положительным и отрицательным y .

Оказалось, что детерминированный переход между состояниями можно реализовать через промежуточное состояние при $\omega = 2,3$, когда магнитный момент направлен коллинеарно легкой оси ферромагнетика (рис. 5).

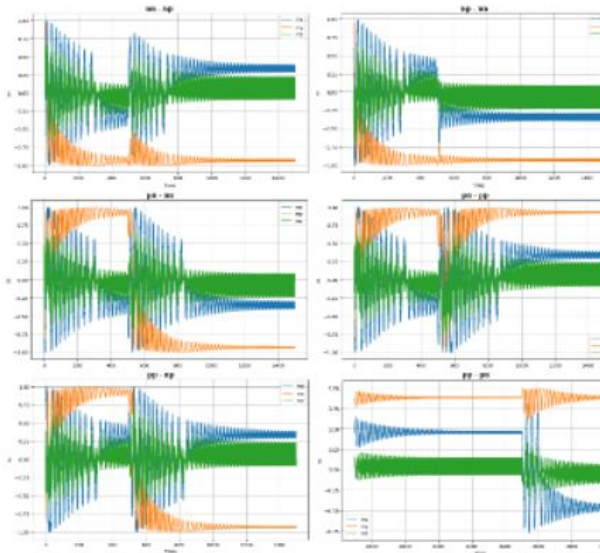


Рис. 3. Переключения между устойчивыми состояниями пульсом напряжения

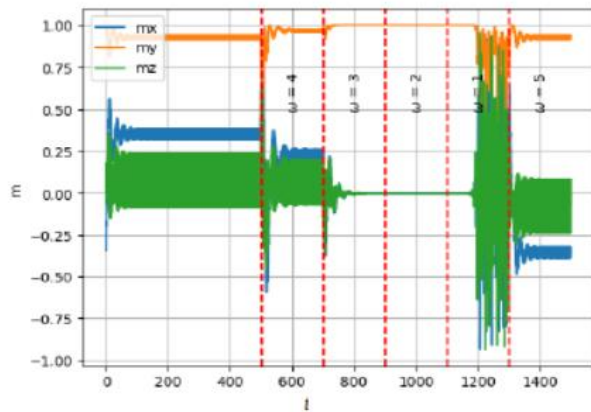


Рис. 4. Зависимость компонент магнитного момента от различных значений амплитуды пульса. Пунктирными линиями показаны начало и конец действия пульса

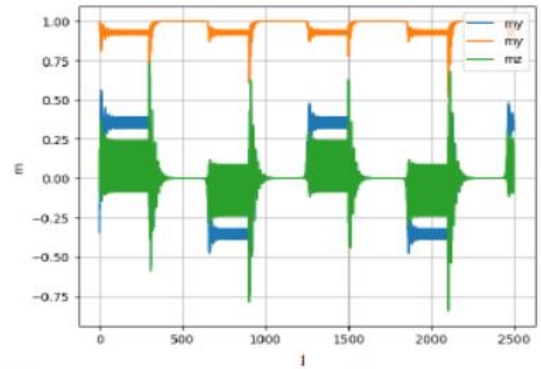


Рис. 5. Переключение pp – pp через стабильное состояние, где магнитный момент коллинеарен легкой оси ферромагнетика

Выводы

В работе исследована динамика магнитного момента. Найдены критерии переходов между состояниями намагниченности. Исследованы критерии для переходов между стабильными состояниями.

Финансирование

Аналитическая часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 22-42-04408. Численные расчеты проведены при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 22-71-10022.

Литература

1. M. Nashaat, I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and K. Sengupta // *Phys. Rev. B*. 2019. V. 100. 054506.
2. I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, I. R. Rahmonov, A. A. Mazanik, K. Sengupta, and Yu. M. Shukrinov // *Phys. Rev. B*. 2020. V. 102. 134505.
3. A. A. Mazanik, I. R. Rahmonov, A. E. Botha, and Yu. M. Shukrinov // *Phys. Rev. Applied*. 2020. V. 14. 014003.
4. Ю. М. Шукринов // *УФН*. 2022. Т. 192, № 4.