Моделирование динамики вихрей в сверхпроводящих пленках с сильным спин-орбитальным взаимодействием (УДК 538.945)

Д.В.Захаров¹, А.Я.Кудлис¹

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук А.Я.Кудлис

E-mail: dmitrii.zakharov@metalab.ifmo.ru

¹ *Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

Введение

Наноструктуры, содержащие сверхпроводящий и ферромагнитный компоненты, хорошо известны с 90-х годов. Сверхпроводящие и ферромагнитные материалы могут взаимодействовать через электростатическое поле или через механизм проникновения электронов между подсистемами, известный как эффект близости. Сильное спин-орбитальное взаимодействие (ССОВ), отсутствие симметрии инверсии и ферромагнитный порядок приводят к ряду интересных явлений: появлению краевых состояний Майорана [1], джозефсоновских φ_0 переходов [2,3], геликоидальных состояний со спонтанными электрическими токами [4,5]. К числу таких явлений также относится сверхпроводящий диодный эффект, который заключается в протекании различных по величине противоположно направленных критических токов в многослойной структуре с отсутствием симметрии инверсии. За последние годы впервые появились экспериментальные подтверждения диодного эффекта в сверхпроводящих системах с джозефсоновским контактом [6] или со слоем ферромагнетика [7].

Таким образом, сверхпроводящий диодный эффект может быть использован для создания сложных компонентов электрических схем [8]. Однако при достаточно сильных магнитных полях, в образце появляются вихри Абрикосова - циркулирующие токи вокруг области с нормальной фазой. Из-за силы Лоренца вихри взаимодействуют с внешним током и таким образом создают новый тип сопротивления [9]. Наличие ССОВ может влиять на динамику вихрей, поэтому изучение транспортных свойств, анализ генерируемых вихрей, их подвижности и расположения имеют решающее значение для использования собственного диодного эффекта в схемах, содержащих сверхпроводящие компоненты.

Основная часть

В рамках данной работы исследуется взаимодействие вихревого ядра и вихрей в тонкой сверхпроводящей пленке, помещенной на ферромагнитный изолятор с однородным обменным полем h и со спин-орбитальной связью на границе раздела сверхпроводник/ферромагнетик (S/F). Спин-орбитальная связь и обменное поле нарушают симметрию инверсии и T-симметрию. Нарушение пространственной симметрии может быть описано вектором $[n \times h]$.

Основным методом исследования является математическое моделирование с численным решением временного уравнения Гинзбурга-Ландау. Моделирование базируется на использовании библиотеки `ruTDGL` [10], с включением нечетных степеней произведения ковариантного градиента параметра порядка и вектора $[n \times h]$. Учет слагаемого пропорционального третьей степени ковариантного градиента требует повышения точности используемых операторов. Для вычисления градиента был использован метод LSQ [11], повышение точности на границах осуществлялось за счет добавления вспомогательных векторов между нормальными к границе пленки. Так как область пленки разбивается на треугольники с помощью триангуляции Делоне, в качестве дискретной формы оператора Лапласа было использовано представление, предложенное в статье [12].

Выводы

Главным результатом моделирования является определение конфигурации одиночного вихря, а именно его равновесного положения на пленки и распределения токов в окрестного вихревого ядра в зависимости от размера пленки и величины поля ферромагнитной подложки. В случае учета линейного по градиенту слагаемого равновесное положение вихря не меняется. Однако наблюдается увеличение эффективной длины когерентности, что также связано с уменьшением критической температуры, при которой появляются неоднородности сверхпроводящей фазы в виде вихрей Абрикосова. Также было показано, что учет линейного слагаемого приводит к увеличению величины тока, циркулирующего в пленке. Учет кубического слагаемого приводит к сдвигу равновесного положения вихря, а также к несимметричному распределению токов вокруг вихря. Данные результаты хорошо согласуются с результатами теории возмущений в области $r > \xi$ при условии малости параметра пропорционального кубическому слагаемому. Достоверность полученных результатов позволяет использовать данную программу для определения критического поля и распределения тока в реальных схемах, содержащих сверхпроводящие компоненты.

1. Jason Alicea New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems // Reports on Progress in Physics – 2012 – Volume 75, №7.
2. Buzdin A. Direct coupling between magnetism and superconducting current in the Josephson ϕ_0 junction // Physical Review – 2008 – Volume 101, №10.
3. Car D., Plissard S. R., Bakkers E. P. A. M., Kouwenhoven L. P., Szombati D. B., Nadj-Perge S. Josephson 0-junction in nanowire quantum dots // Nature Physics – 2016 – Volume 12, №6.
4. Buzdin A., Mironov S. Spontaneous currents in superconducting systems with strong spin-orbit coupling // Phys. Rev. Lett. – 2017 – №118.
5. Chaykin I., Mironov S., Buzdin A. I., Devizorova Zh., Putilov A. V. Phase transitions in superconductor/ferromagnet bilayer driven by spontaneous supercurrents. Phys. Rev. B – 2021 – №103.
6. Fuchs L., Baumgartner C., Paulik N., Bauer J. M., Lin K.-Q., Lupton J. M., Taniguchi T., Watanabe K., Strunk C., Paradiso N., Bauriedl L., Bauml C. Supercurrent diode effect and magnetochiral anisotropy in few-layer NbSe₂ // Nat. Commun. – 2017 – №13.
7. Kawarazaki R., Kan D., Shiota Y., Moriyama T., Shimakawa Y., Ognev A. V., Samardak A. S., Yanase Y., Ono T., Narita H., Ishizuka J. Field-free superconducting diode effect in noncentrosymmetric superconductor/ferromagnet multilayers // Nat. Nanotech. – 2022 – №17.
8. Alex I., Braginski I., Superconductor electronics: Status and outlook // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism – 2018 – №32.
9. Peter N., Koufalis A., Miyazaki A., Senanian M., Liepe D., Liarte B., Hall D. J., Sethna P., Vortex dynamics and losses due to pinning: Dissipation from trapped magnetic flux in resonant superconducting radio-frequency cavities // Phys. Rev. – 2018 – №10.
10. Logan Bishop-Van Horna pyTDGL: Time-dependent Ginzburg-Landau in Python // Computer Physics Communications – 2023 – Volume 291.
11. Syrakos A., Varchanis S., Dimakopoulos Y., Goulas A., Tsamopoulos J. A critical analysis of some popular methods for the discretisation of the gradient operator in finite volume methods // Physics of Fluids – 2017 – №29.
12. Reuter M., Biasotti S., Giorgi D., Spagnuolo M. Discrete Laplace–Beltrami operators for shape analysis and segmentation // Computers & Graphics – 2009 – №33.