

УДК 538.945

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-1-5-9

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПИРАЛЬНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ
ФЕРРОМАГНИТНОГО СЛОЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СПИНОВОГО ВЕНТИЛЯ**

© Д.И. Джебаров, Н.А. Гусев, Н.Г. Пугач, Б.Г. Львов, Е.Г. Екомасов

Исследуется переключение сверхпроводящего спинового вентиля на основе спирального магнетика. В качестве магнетика рассматривается соединение $MnSi$, которое имеет сложную магнитную структуру с намагниченностью в виде геликоидальной спирали. Приводится модель двухслойного сверхпроводящего спинового вентиля на основе спирального магнетика и прилегающим тонким слоем сверхпроводника. Ранее было показано, что критическая температура такой сверхпроводящей пленки зависит от направления магнитной спирали. Произведен расчет магнитодинамики этой структуры, на основе которой в перспективе можно будет строить элементы памяти или логики низкотемпературной наноэлектроники. Было реализовано несколько задач по математическому моделированию переключения намагниченности спинового вентиля, исследованию структуры спинового вентиля в программах электромагнитного моделирования для изменения намагниченности и поворота вектора спирали магнетика под действием импульса магнитного поля, построению и анализу трехмерного распределения намагниченности спирального магнетика для отслеживания процесса перемагничивания. В ходе работы были использованы средства программирования в среде Matlab, инструменты построения графиков распределения векторных полей. Показано, что направление магнитной спирали можно переключать импульсным магнитным полем. Исследованы получившиеся распределения намагниченности и визуализированы в виде векторных полей.

Ключевые слова: спиновая электроника, сверхпроводимость, магнетизм, спиральная намагниченность.

Введение. На данный момент быстро развивается научная область сверхпроводниковой спинтроники. Спинтроника, другими словами, спиновая электроника, рассматривает и изучает протекание спин-поляризованного тока. Ток управляется путем воздействия на спины электронов с помощью магнитных свойств исследуемых материалов. Сверхпроводниковая спинтроника изучает те же эффекты на базе сверхпроводников при очень низких температурах и исследует структуры, в которых возникают явления и эффекты, требующие для своего появления контакта сверхпроводящих и магнитных материалов [1]. Научный интерес к данной области заключается в построении и реализации элементов памяти для записи, хранения и обработки информации в виде двоичного кода.

Работа таких элементов может строиться на изменении критической температуры сверхпроводника (T_c), в результате чего изменяется сверхпроводящий ток, протекающий через сверхпроводник или его сопротивление [1, 2]. Ранние работы в данной области обосновывают эту возможность существованием эффекта близости, т.е. эффектом подавления сверхпроводимости вблизи контакта сверхпроводника с магнитной структурой. Также ведутся исследования, которые показывают обратное воздействие и проникновение сверхпроводимости в слой магнитного материала вблизи поверхности контакта – обратный эффект близости.

Сверхпроводимость дает также возможность осуществлять спин-вентильный эффект, т.е. изменение критической температуры,

ДЖЕПАРОВ Даниил Иванович, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», e-mail: didzheparov@edu.hse.ru

ГУСЕВ Николай Александрович, Российский квантовый центр, e-mail: nagusew@gmail.com

ПУГАЧ Наталия Григорьевна – к.ф.-м.н., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», e-mail: pugach@magn.ru

ЛЬВОВ Борис Глебович – д.т.н., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», e-mail: BLvov@hse.ru

ЕКОМАСОВ Евгений Григорьевич – д.ф.-м.н., Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы; Башкирский государственный университет, e-mail: ekomasoveg@gmail.com

при изменении магнитной конфигурации магнетика между коллинеарной и неколлинеарной направленностью. Неколлинеарная намагниченность в структуре сверхпроводник–ферромагнетик создает спин-триплетные корреляции, куперовские пары при этом имеют ненулевую проекцию спина на ось квантования и обменное поле не подавляет спаривание электронов с одинаковой проекцией спинов. Эти корреляции называются дальнедействующими триплетными сверхпроводящими корреляциями или long range triplet correlation (LRTC), которые возникают в гибридных наноструктурах с неколлинеарной намагниченностью [3, 4]. При этом куперовские пары устремляются из проводника в слой магнетика, что способствует понижению критической температуры. Этот эффект был отмечен во множестве экспериментальных работ и описан в теоретических работах исследователей. Важно найти применение изученным эффектам в прикладной области и построить с их помощью элементы современной электроники.

Для исследований фундаментальной физики, а также прикладных применений в инженерии наиболее интересными являются исследования сложных магнитных структур с неординарной намагниченностью материала. Например, магнитные структуры с геликоидальной намагниченностью были изучены в конце прошлого века. В основе такой намагниченности может лежать взаимодействие Дзялошинского–Мория, обусловленное нецентросимметричностью кристаллической системы [5]. Такая намагниченность существует, например, в магнитном соединении MnSi и образует магнитную спираль. Такие необычные магнитные материалы как спиральные магнетики имеют потенциально значимые свойства для применений в нанoeлектронике и могут служить основой для построения сверхпроводящих спиновых вентилях.

Модель. В работе рассматривается структура из спирально-магнитного слоя F и прилегающего к ней слоя сверхпроводника S. Магнитный слой обладает спиральной намагниченностью, которая описывается вектором спирали Q. Для осуществления работы спинового вентиля необходимо уметь управлять намагниченностью слоя F для влияния на критическую температуру и сверхпроводящий ток слоя S под действием спин-вентильного эффекта близости [1]. Следует научиться перемагничивать структуру между несколькими устойчивыми состояниями магне-

тика, такую возможность обеспечивает кубическая кристаллическая структура силицида марганца (MnSi). Был предложен способ воздействия на намагниченность спиральной структуры импульсным магнитным полем. При подаче импульса поля намагниченность F слоя меняется, в результате чего изменяется направление вектора спирали Q. За счет этого в результате эффекта близости изменяется T_c сверхпроводника, и происходит переключение состояния спинового вентиля. Также необходимо уметь возвращать намагниченность структуры в исходное состояние, т.е. подать импульс магнитного поля для прямого и обратного переключения вентиля. На рис. 1 представлены начальное состояние структуры сверхпроводящего спинового вентиля до прямого переключения и после него с направлениями вектора намагниченности Q наклоном к плоскости сверхпроводящей пленки. Обратное переключение возвращает структуру в исходное состояние.

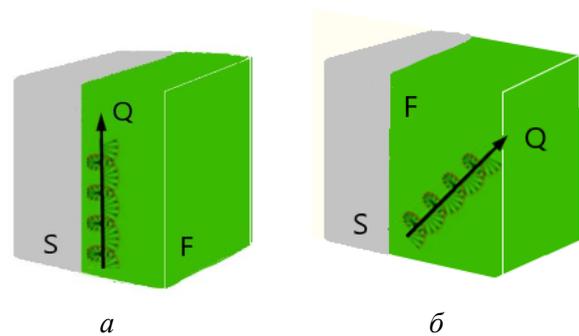


Рис. 1. Структура спинового вентиля S-F в двух состояниях (а) начальное состояние, (б) состояние после прямого перемагничивания

Вектор намагниченности Q, который характеризует магнитные моменты F слоя, при подаче магнитного импульса меняет свое направление и поворачивается на определенный угол. Для управления перемагничиванием важно знать структуру распределения намагниченности в обоих состояниях.

Изменение магнитного момента \vec{m} во времени под действием внешнего магнитного поля \vec{B} описывается уравнением Ландау–Лившица, с помощью которого можно рассчитать магнитную динамику структуры ферромагнитного слоя спинового вентиля. Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = \gamma_{LL} \frac{1}{1 + \alpha^2} (\vec{m} \times \vec{e}_{eff} + \alpha (\vec{m} \times [\vec{m} \times \vec{e}_{eff}])),$$

где u_{LL} – гиромагнитное отношение, α – безразмерный параметр затухания, \vec{e}_{eff} – вектор эффективного поля [6]. Уравнение Ландау–Лившица является в общем случае сложным интегро-дифференциальным уравнением. Уровень его сложности зависит от вида \vec{B}_{eff} , для определения которого необходимо использовать выражение для свободной энергии $F(r)$, которая в нашем случае имеет вид:

$$F(r) = \frac{1}{2} A(m_x^2 + m_y^2 + m_z^2) + b\vec{m} \cdot (\nabla \times \vec{m}) + \frac{1}{2} B_1 [(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2] + \frac{1}{2} B_2 \left[\left(\frac{\partial m_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial m_z}{\partial z} \right)^2 \right] + C(m_x^2 + m_y^2 + S_z^2)^2 + D(m_x^4 + m_y^4 + m_z^4),$$

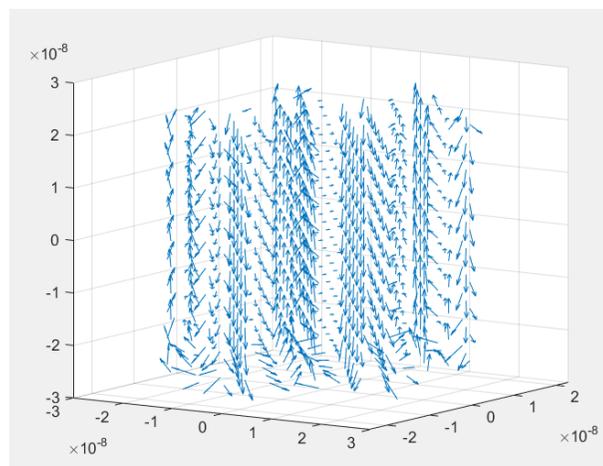
где A – энергия изотропного обмена, b – коэффициент взаимодействия Дзялошинского-Мория, B_1 – коэффициент ферромагнитного обмена, B_2 – коэффициент анизотропии, C и D – кристаллографические коэффициенты [5].

Решение математической модели и моделирования магнитной структуры осуществлялось в программном пакете OOMMF (Object Oriented MicroMagnetic Framework) [7]. С помощью математического метода Рунге–Кутты, применяемого для численного решения дифференциальных уравнений, было решено уравнение Ландау–Лившица для нахождения параметров импульса магнитного поля: напряженность поля H , длительность импульса T . Важно отметить, что внешнее поле должно быть направлено вдоль контакта сверхпроводника с ферромагнетиком. Иначе при другом направлении поля могут возникать паразитные эффекты, такие как абрикосовские вихри. При работе с моделью также выяснилось, что более эффективной является модель цилиндрической формы по сравнению с параллелепипедом или кубом. Это позволяет избавиться или уменьшить воздействие граничных эффектов, которые могут повлиять на намагниченность в углах куба или структуры формы параллелепипеда.

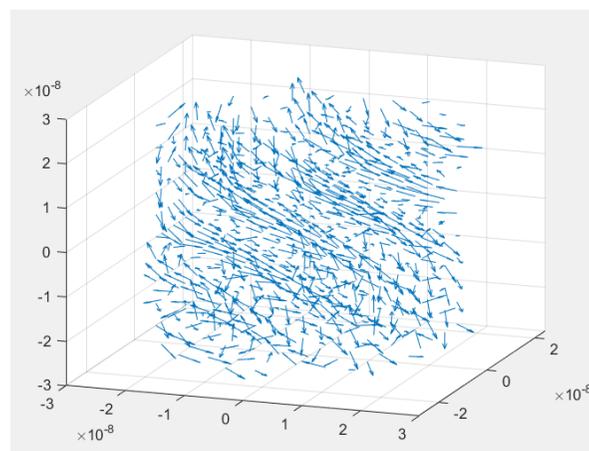
Визуализация 3D распределения намагниченности. Для построения трехмерного распределения намагниченности был выбран программный математический пакет Matlab для обработки данных из OOMMF для дальнейшего преобразования и построения 3D графиков векторного распределения [8].

Исходные данные, с которыми необходимо работать, представляют из себя текстовый документ с набором параметров: параметры координат с шагом по осям x, y, z ; параметры направляющих векторов u, v, w в виде матрицы 125000×3 ;

На первом этапе была преобразована матрица направляющих векторов и сопоставлена с координатной сеткой по осям. Были получены распределения $50 \times 50 \times 50$ векторов по осям координат. Для дальнейшего анализа и наглядной визуализации была уменьшена плотность распределений в 5 раз, координаты векторов брались с шагом 5. На рис. 2 представлены распределения векторов после уменьшения объема данных в 5 раз.



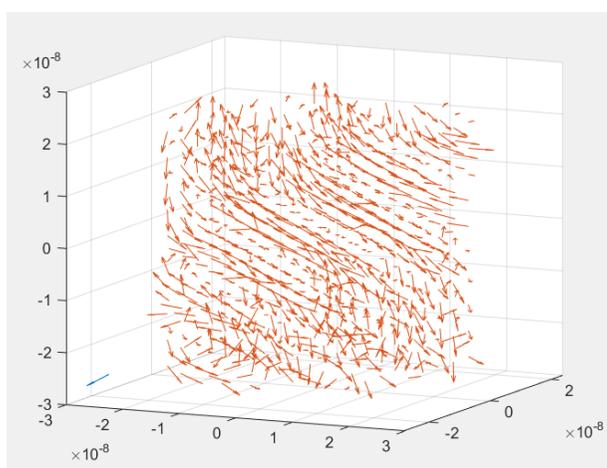
а



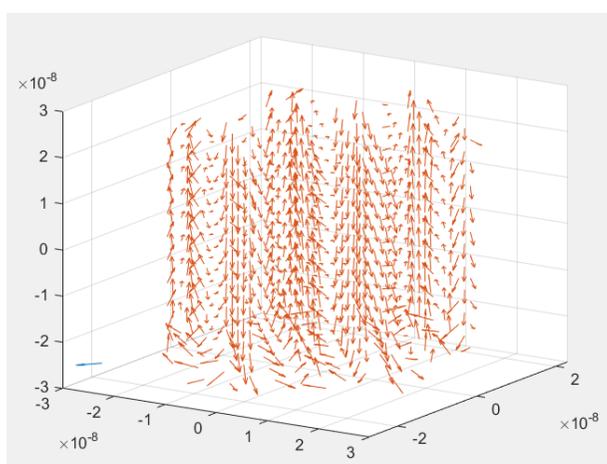
б

Рис. 2. Распределение намагниченности F слоя с уменьшением количества векторов по объему в 5 раз: а – начальное состояние; б – состояние после переключения импульсным полем

На рисунках видны выстраивания векторов намагниченности в определенных плоскостях, перпендикулярно которым расположен вектор спирали Q . Для нахождения направления вектора Q необходимо найти векторное произведение соседних векторов распределения, тогда получившийся вектор будет направлен под углом 90 градусов к перемножаемым. Было найдено векторное произведение соседних векторов по оси x , из которого получилось распределение для вектора Q . Из получившегося распределения был высчитан средний вектор $Q_{ср}$, который соответствует вектору направления спирали. На рис. 3 показано распределение намагниченности и вектор направления спирали Q (синий цвет) для двух состояний магнетика до и после перемагничивания импульсным полем.



а



б

Рис. 3. Распределения намагниченности состояний с направляющим вектором Q : а – начальное состояние; б – состояние после переключения импульсным полем

Обсуждение результатов. По полученным распределениям видна спиральная намагниченность материала. Векторы намагниченности выстраиваются в плоскости, параллельные друг другу, при этом вектора поворачиваются в пределах разных плоскостей, образуя при этом спиральную намагниченность. Вектор, перпендикулярный этим плоскостям, характеризует вектор спирали Q магнетика, в зависимости от направления которого меняется намагниченность всей структуры. Из полученных распределений видно, что в начальном состоянии вектор спирали Q лежит в плоскости контакта сверхпроводник–магнетик, после подачи импульса магнитного поля распределение меняется и вектор спирали поворачивается под углом к начальной плоскости. Удалось получить такие параметры импульса магнитного поля, чтобы считать эти два состояния устойчивыми и иметь возможность перемагничивать структуру в прямом и обратном направлении. Рассчитанная в данной работе магнитодинамика позволит проводить экспериментальные работы для реализации физической структуры спинового вентиля, используя тонкие пленки сверхпроводника на поверхности силицида марганца.

Авторы благодарят проект «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы.

Литература

1. Пугач Н.Г., Сафончик М.О., Хайм Д.М., Яговцев В.О. Сверхпроводящие спиновые вентили на основе спиральных магнетиков // Физика твердого тела. 2018. Т. 60, вып. 11. С. 2237–2243.
2. Linder J., Robinson J.W.A. Superconducting spintronics // Nature Physics. 2015. V. 11. P. 307–315.
3. Fominov Ya.V., Golubov A.A., Kupriyanov M.Yu. Triplet proximity effect in FSF trilayers. JETP Lett. 2003. V. 77, No. 9. P. 510–515.
4. Пугач Н.Г., Сафончик М.О. Увеличение критической температуры сверхпроводящего перехода гибридной структуры при намагничивании спиральных антиферромагнетиков // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107, вып. 5. С. 320–324.
5. Bak P., Jensen M.H. Theory of helical magnetic structures and phase transitions in MnSi and FeGe // J. Phys. C: Solid Phys. 1980. V. 13. P. L881.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. Т. IX. Статистическая физика. Ч. 2. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982.
7. Object Oriented MicroMagnetic Framework (Электронный ресурс). URL: <https://math.nist.gov/oommf/>

8. Matlab Documentation (Электронный ресурс).
URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

References

1. Pugach N.G., Safonchik M.O., Heim D.M., Yagovtsev V.O. Superconducting spin valves based on spiral magnets. *Fizika tverdogo tela*, 2018, vol. 60, no. 11, pp. 2237–2243.
2. Linder J., Robinson J.W.A. Superconducting spintronics. *Nature Physics*, 2015, vol. 11, pp. 307–315.
3. Fominov Ya.V., Golubov A.A., Kupriyanov M.Yu. Triplet proximity effect in FSF trilayers. *JETP Lett.*, 2003, vol. 77, no. 9, pp. 510–515.

4. Pugach N.G., Safonchik M.O. Increase in the critical temperature of the superconducting transition of a hybrid structure upon the magnetization of spiral antiferromagnets. *JETP Lett.*, 2018, vol. 107, pp. 302–306.

5. Bak P., Jensen M.H. Theory of helical magnetic structures and phase transitions in MnSi and FeGe. *J. Phys. C: Solid Phys.*, 1980, vol. 13, p. L881.

6. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics*. In 10 vols. Vol. 9. *Statistical Physics. Part 2*. Moscow, Nauka, 1982.

7. Object Oriented MicroMagnetic Framework. Available at: <https://math.nist.gov/oommf/>

8. Matlab Documentation. Available at: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav



VISUALIZING THE DISTRIBUTION OF SPIRAL MAGNETIZATION IN THE FERROMAGNETIC LAYER OF A SUPERCONDUCTING SPIN VALVE

© D.I. Dzeparov¹, N.A. Gusev², N.G. Pugach¹, B.G. Lvov¹, E.G. Ekomasov^{3,4}

¹National Research Institute «Higher School of Economics»,
20, ulitsa Myasnitskaya, 101000, Moscow, Russian Federation

²Russian Quantum Centre,
30, bld. 1, Bolshoy bulvar, Skolkovo Innovation Centre, Western Administrative Okrug,
Mozhaysky District, Moscow, Russian Federation

³Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3a, ulitsa Oktyabrskoy revolyutsii, 450008, Ufa, Russian Federation

⁴Bashkir State University,
32, ulitsa Zaki Validi, 450076, Ufa, Russian Federation

In this paper, we investigate the switch of a magnet-based superconducting spin valve. As a magnet, we consider the MnSi compound characterized by a complex magnetic structure with its magnetization in the form of a spiral helicoid. A model is given for a double-layered superconducting spin valve based on the spiral magnet with an adjoining superconducting thin layer. As shown previously, critical temperature of such a superconducting film depends on the direction of the spiral magnet. Calculations have been performed for magnetic dynamics of this structure, which in prospect can serve as the basis for creating memory or logic elements of low temperature nanoelectronics. Several problems have been treated with regards to mathematical simulation of switching the spin valve magnetization, research on the spin valve structure using electromagnetic simulation software to change magnetization and rotation of the spiral magnetic vector under the magnetic-field pulse, construction and analysis of 3D magnetization distributions in spiral magnets to trace the process of remagnetization. In this work, we use a Matlab-based software environment and tools for constructing distribution plots of vector fields. It is shown that the direction of the spiral magnet can be switch by pulsed magnetic field. Research has been done on the resultant magnetization distributions visualized in the form of vector fields.

Key words: spin electronics, superconductivity, magnetism, spiral magnetization.