

УДК 537.6:538.9

КОНТРОЛЬ ЗА ВЕКТОРОМ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЛОЯ В ДВУХСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ФЕРРОМАГНЕТИК/СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

© 2023 г. А. А. Камашев¹ *, А. В. Леонтьев¹, И. А. Гарифуллин¹, Р. Ф. Мамин¹

¹Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

*E-mail: kamandi@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Исследованы двухслойные гетероструктуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик, в которых в качестве ферромагнитного слоя использовался кобальт, а в качестве сегнетоэлектрической подложки ниобат лития срезом 41°Y-cut. Показано, что при приложении электрического поля от 10 до 50 В к сегнетоэлектрической подложке ниобата лития регистрируется изменения направления вектора намагниченности ферромагнитного слоя.

DOI: 10.31857/S0367676522700934, EDN: NOPGDT

ВВЕДЕНИЕ

Исследования взаимного влияния сверхпроводимости и ферромагнетизма проводятся с середины прошлого века. Эти два явления антагонистичны друг другу. Противоположность этих явлений, заключается в том, что ферромагнетизм предполагает параллельную ориентацию спинов, а сверхпроводимость – антипараллельную, т.к. спины электронов куперовской пары противоположно направлены. Изначально взаимодействие этих явлений исследовалось в интерметаллических соединениях и сплавах. Эта область исследований остается актуальной и до сих пор вызывает большой интерес (см., например, [1, 2] и обзор [3]). В связи с технологическим прогрессом в приготовлении высококачественных тонкопленочных слоистых металлических структур (см., например, обзор [4]), направление исследований было смещено в сторону искусственно созданных многослойных гетероструктур (см., например, обзоры [5–10]). Интерес к структурам, состоящим из ферромагнитных и сверхпроводящих слоев, связан с тем, что в них сверхпроводимость (С) и ферромагнетизм (Ф) могут быть пространственно разнесены. Эффекты, которые наблюдаются в таких структурах, получили название эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф). Эффект близости заключается в следующем, если привести в контакт два материала с различными свойствами, то вблизи границы раздела этих материалов их свойства спутываются. В случае, ко-

гда два материала не ограничены в пространстве, свойства такого образца определяются свойствами каждого из этих материалов в отдельности. При достаточно малых толщинах слоев их свойства подвергаются модификации. Именно этот эффект взаимного изменения свойств слоев, находящихся в контакте, и называют эффектом близости. Если эти слои являются ферромагнетиком и сверхпроводником, то это и есть эффект близости С/Ф.

В конце 1990-х годов были предложены две теоретические модели сверхпроводящего спинового клапана (ССК), основанных на эффекте близости сверхпроводник/ферромагнетик. Первая модель Ф1/Ф2/С (где Ф1 и Ф2 – ферромагнитные слои, а С – сверхпроводящий слой) была предложена Санжиун О и др. [11]. Другая модель Ф1/С/Ф2 была предсказана Тагировым [12]. Принцип работы обеих моделей одинаков. Данный принцип основан на том, что величина обменного поля от двух Ф-слоев, действующего на куперовские пары из С-слоя, в случае параллельной (П) ориентации намагниченностей Ф-слоев больше, чем в случае антипараллельной ориентации (АП). Эта разница приводит к более низкому значению температуры перехода в сверхпроводящее состояние в случае параллельной ориентации намагниченностей Ф-слоев ($T_c^П$), чем при антипараллельной ориентации ($T_c^{АП}$). Главным условием для возможности контроля за сверхпро-

водящим током в структурах ССК является: $\Delta T_c > \partial T_c$, где $\Delta T_c = T_c^{\text{АП}} - T_c^{\text{П}}$ – эффект сверхпроводящего спинового клапана; ∂T_c – ширина сверхпроводящего перехода.

В 2010 г. наша группа впервые продемонстрировала возможность полного переключения сверхпроводящего тока в структуре Fe1/Cu/Fe2/In [13]. Нами также были получены прямые доказательства существования дальнедействующих триплетных компонент (ДТК) сверхпроводящего конденсата в структурах сверхпроводящего спинового клапана модели Ф1/Ф2/С [14]. Мы продемонстрировали гигантскую величину эффекта сверхпроводящего спинового клапана порядка 0.5 К в магнитном поле 3.5 кЭ, что является рекордом эффекта ССК в этих магнитных полях для структур модели Ф1/Ф2/С [15, 16].

На сегодняшний день управление сверхпроводящим током под действием внешнего магнитного поля в структурах ССК достигло максимальных значений по эффективности. Результаты нашей группы [15, 16] и других групп [17] показывают, что предельные значения эффекта ССК уже достигнуты при использовании большого разнообразия сплавов и элементных ферромагнетиков в структурах Ф1/Ф2/С. В связи с этим необходимо исследовать новые гетероструктуры с нестандартными подходами. Одним из таких подходов может быть исследование структур ССК на базе сегнетоэлектрических подложек. Это позволит управлять сверхпроводящим током с помощью электрического поля в структурах ССК, а не магнитного, как это было раньше.

В общем случае для реализации модели ССК на базе сегнетоэлектрической подложки необходимо решить основную и главную задачу. Необходимо реализовать и отладить механизм контроля за направлением вектора намагниченности ферромагнитного слоя в двухслойной гетероструктуре ферромагнетик/сегнетоэлектрик за счет магнитоупругого эффекта. Магнитоупругий эффект в этой системе возникает вследствие деформаций сегнетоэлектрической подложки, обусловленных обратным пьезоэлектрическим эффектом при приложении внешнего электрического поля к сегнетоэлектрической подложке. Деформации в сегнетоэлектрической подложке вызывают напряжения в ферромагнитном слое из-за контакта ферромагнетика и сегнетоэлектрика, то есть за счет эффекта близости ферромагнетик/сегнетоэлектрик. Это, в свою очередь, проявляется в появлении дополнительной магнитной анизотропии, которая при определенном построении системы может привести к изменению направления вектора намагниченности ферромагнитного слоя.

В данной работе были исследованы двухслойные гетероструктуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик, где в качестве ферромагнитного слоя

использовался кобальт, а в качестве сегнетоэлектрической подложки ниобат лития среза 41°Y-cut. В предыдущей нашей работе [18] в качестве ферромагнитного материала использовалось железо, а в качестве сегнетоэлектрической подложки ниобат лития среза Z-cut. В данной работе мы покажем, что при приложении электрического поля от 10 до 50 В к сегнетоэлектрической подложке ниобата лития надежно регистрируется изменения направления вектора намагниченности ферромагнитного слоя методом эффекта Керра.

ОБРАЗЦЫ

Здесь были приготовлены двухслойные гетероструктуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик. В качестве ферромагнитного материала использовался кобальт (Co). В качестве сегнетоэлектрических подложек были использованы нелинейные кристаллы ниобата лития (LiNbO₃). Использовались подложки среза 41°Y-cut с хорошо отполированной поверхностью, то есть с минимальной шероховатостью. Толщина ферромагнитных пленок варьировалась от 5 до 10 нм.

Была использована сверхчистая мишень ферромагнитного материала кобальта с чистотой выше значения 4N, что говорит о концентрации примеси менее 0.01%. Важным обстоятельством при получении ферромагнитных пленок была необходимость получения пленок с малой структурной анизотропией. Для этого мы добивались того, чтобы пленки получались поликристаллическими. В этом случае, анизотропия будет только наведенная за счет магнитоупругого эффекта вследствие деформаций, наведенных подложкой. Но и такую анизотропию мы пытались минимизировать. Для этого напыление пленок происходило при температурах наиболее близких к комнатной. И так как мы управляем деформациями сегнетоэлектрической подложки, прикладывая электрическое поле в различных направлениях, данная анизотропия преодолевается. Поликристалличность ферромагнитных пленок достигалась высокой скоростью осаждения ферромагнитного материала на поверхность сегнетоэлектрической подложки при близкой к комнатной температуре. Скорость напыления ферромагнитных пленок составляла 0.5 Å/с. Напыление происходило в камере с молекулярно-лучевой эпитаксией. В данной камере установлено 4 различных мишени, что позволяет осуществлять напыление различных материалов в одном вакуумном цикле. Скорость осаждения контролировалась при помощи водоохлаждаемого кварцевого осциллятора, который непосредственно расположен вблизи подложки. Для того, чтобы существовала возможность напыления 8 различных образцов за один вакуумный цикл, был использован специальный держатель образцов. Путем вращения

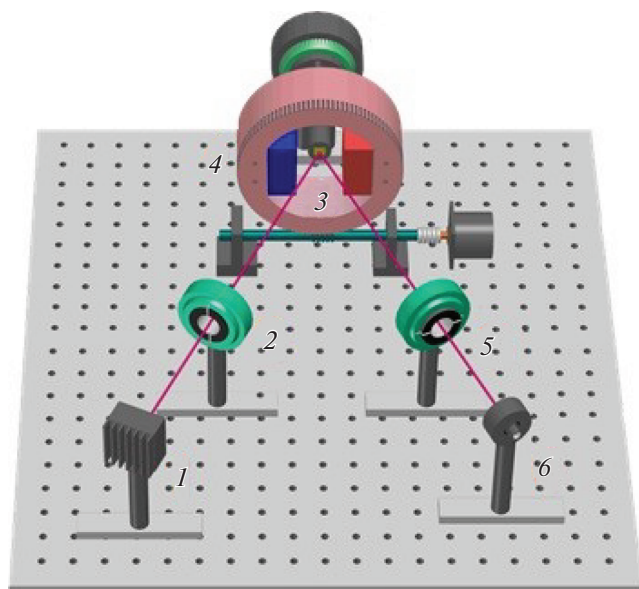


Рис. 1. Схема экспериментальной установки регистрации магнитооптического эффекта Керра: 1 – полупроводниковый лазерный диод; 2, 5 – скрещенные поляризаторы (призмы Глана), 3 – образец; 4 – магнит; 6 – фотодетектор (фотодиод).

данного держателя возможно переключение между различными образцами в одном вакуумном цикле. Напыление образцов в ходе одного вакуумного цикла позволяет исключить роль влияния условий приготовления на свойства образцов. Линейные размеры подложек составляли порядка $5 \text{ мм} \times 7 \text{ мм}$. Толщина подложек 0.5 мм .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Магнитная характеристика образцов проводилась при помощи экспериментальной установки

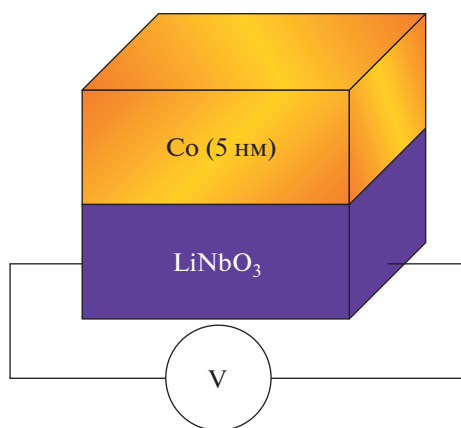


Рис. 2. Модель двухслойной гетероструктуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик с демонстрацией подключения электродов к боковым граням сегнетоэлектрической подложки.

регистрации магнитооптического эффекта Керра, представленной на рис. 1. Фактически мы отслеживали интенсивность света, прошедшего через поляризатор, отраженного от образца и прошедшего через анализатор, а не реальную ориентацию вектора намагниченности ферромагнитного слоя. Величина регистрируемого фотодетектором сигнала зависит от угла поворота плоскости поляризации света, отраженного от образца, что позволяет анализировать поведение намагниченности ферромагнитного слоя на поверхности образца.

Нами была построена карта напряжений при различном расположении электродов и при различных напряжениях внешнего электрического поля. Был осуществлен поиск оптимального дизайна расположения электродов. Согласно результатам моделирования, для приготовленных образцов наиболее эффективным расположением электродов является на боковых гранях сегнетоэлектрической подложки (см. рис. 2).

Наиболее интересный результат удалось получить для образца $\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{LiNbO}_3$ (см. рис. 3). На рис. 3 в точках 1, 2, 3 прикладывалось электрическое поле порядка 30 В к сегнетоэлектрической подложке по схеме, представленной на рис. 2. В точках 4, 5, 6 электрическое поле отключалось. В точках 1, 2, 3 после включения электрического поля наблюдалось резкое изменение интенсивности света, что может свидетельствовать об изменении направления вектора намагниченности ферромагнитного слоя. Этот факт подтверждается и тем, что в точках 4, 5, 6 наблюдается обратное изменение интенсивности света при выключении

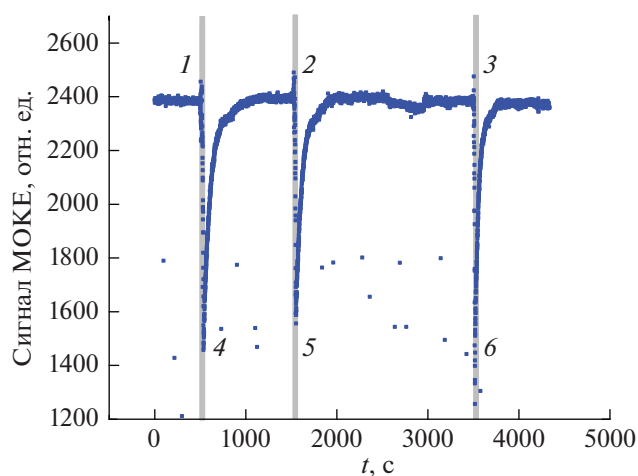


Рис. 3. Зависимость от времени интенсивности света, прошедшего через поляризатор для образца $\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{LiNbO}_3$, где использовался ниобат лития среза 41°Y-cut . Подробное описание рисунка смотрите в тексте. В точках 1, 2, 3 прикладывалось электрическое поле порядка 30 В ; в точках 4, 5, 6 прекращалось воздействие электрического поля.

электрического поля, что свидетельствует о перемагничивании ферромагнитной пленки.

В дальнейших наших исследованиях мы планируем использовать подложки ниобата лития среза $131^\circ Y$ -cut и подложки PMN-PT, и, возможно, другие ферромагнитные материалы для нанесения плёнок. Для надежной регистрации направления вектора намагниченности, в дальнейшем мы будем разделять выходной пучок на два луча с вертикальной и горизонтальной поляризацией и по соотношению интенсивностей определять реальный угол поворота поляризации света, а, следовательно, и реальное изменение ориентации вектора намагниченности ферромагнитного слоя.

Таким образом, наши результаты продемонстрировали, что электрического поля порядка 30 В достаточно для регистрации изменения направления вектора намагниченности в структурах $Co(5 \text{ нм})/LiNbO_3$, где использовался ниобат лития среза $41^\circ Y$ -cut.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы двухслойные гетероструктуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик, где в качестве ферромагнитного слоя использовался кобальт, а в качестве сегнетоэлектрической подложки ниобат лития среза $41^\circ Y$ -cut. Согласно нашим исследованиям, прикладывание электрического поля порядка 30 В к сегнетоэлектрической подложке ниобата лития с расположением электродов на боковых гранях в структурах $Co(5 \text{ нм})/LiNbO_3$, где использовался ниобат лития среза $41^\circ Y$ -cut, достаточно для регистрации изменения направления вектора намагниченности слоя кобальта.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-10178).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fischer O., Peter M. // In: Magnetism. V. 5. N.Y.: Academic Press Inc., 1973.
2. Rehmann S., Herrmannsdrfer T. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. No. 6. P. 1122.
3. Bulaevskii L.N., Buzdin A.I., Kuli'c M.L. et al. // Adv. Phys. 1985. V. 34. No. 2. P. 175.
4. Jin B.Y., Ketterson J.B. // Adv. Phys. 1989. V. 38. No. 4. P. 189.
5. Chien C.L., Jiang J.S., Xiao J.Q. et al. // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. No. 8. P. 5358.
6. Chien C.L., Reich D.H. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 200. P. 83.
7. Garifullin I.A. // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 240. P. 571.
8. Изюмов Ю.А., Прошин Ю.Н., Хусаинов М.Г. // УФН. 2002. Т. 172. № 2. С. 113; Izumov Yu.A., Proshin Yu.N., Khusainov M.G. // Phys. Usp. 2002. V. 45. No. 2. P. 109.
9. Golubov A.A., Kupriyanov M.Y., Il'ichev E. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. No. 2. P. 411.
10. Buzdin A.I. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. No. 3. P. 935.
11. Oh S., Youm D., Beasley M.R. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. No. 16. P. 2376.
12. Tagirov L.R. // Physica C. 1998. V. 307. P. 145.
13. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. No. 10. Art. No. 102505.
14. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. Art. No. 057005.
15. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al. // Beilstein J. Nanotechnol. 2019. V. 10. P. 1458.
16. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. Art. No. 134511.
17. Singh A., Voltan S., Lahabi K., Aarts J. // Phys. Rev. X. 2015. V. 5. Art. No. 021019.
18. Kamashev A.A., Leontyev A.V., Garifullin I.A. et al. // Ferroelectrics. 2022. V. 592. No. 1. P. 123.

Control of the direction of magnetization of a ferromagnetic layer in two-layer heterostructure ferromagnet/ferroelectric

A. A. Kamashev^{a,*}, A. V. Leontyev^a, I. A. Garifullin^a, R. F. Mamin^a

^a Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia

*e-mail: kamandi@mail.ru

We studied two-layer ferromagnet/ferroelectric heterostructures, where iron, cobalt, and nickel were used as ferromagnetic layers, and lithium niobate was used as a ferroelectric substrate. According to our studies, applying an electric field from 10 to 50 V to a ferroelectric lithium niobate substrate is sufficient to register a change in the direction of the magnetization vector of the ferromagnetic layer.