

УДК 53.06:537.6:538.9

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Co1/Cu/Co2/Cu/Pb НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ PMN-PT

© 2024 г. А. А. Камашев^{1,*}, А. А. Валидов¹, С. А. Большаков¹, Н. Н. Гарифьянов¹,
И. А. Гарифуллин¹

¹ Казанский физико-технический институт им. 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 19.02.2024

После доработки 18.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Исследовано влияние пьезоэлектрической подложки PMN-PT ($[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{0.7} - [\text{PbTiO}_3]_{0.3}$) на сверхпроводящие свойства тонкопленочной гетероструктуры Co1/Cu/Co2/Cu/Pb. Зарегистрировано изменение температуры перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) в электрическом и магнитном поле. Максимальная разница в T_c составила 15 мК при приложении электрического поля напряженностью 1 кВ/см. Во внешнем магнитном поле максимальная разница в T_c составила более 80 мК при изменении взаимного направления намагниченностей ферромагнитных слоев от коллинеарного к перпендикулярному.

DOI: 10.31857/S0367676524070172, EDN: PAPBDN

ВВЕДЕНИЕ

Структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК) на основе различных ферромагнитных и сверхпроводящих материалов активно изучаются на протяжении 25 лет (см., например, [1–10]). Сверхпроводящий спиновый клапан — это тонкопленочная гетероструктура, построенная на базе двух ферромагнитных (Ф) слоев и одного сверхпроводящего (С) слоя. Интерес к этим системам связан с возможностью исследования в них взаимного влияния сверхпроводимости и ферромагнетизма на свойства друг друга. Структуры ССК могут быть использованы в качестве сверхпроводящего транзистора или ключа. Принцип работы ССК построен на эффекте близости сверхпроводник/ферромагнетик. В структурах ССК можно управлять температурой перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) изменением взаимной ориентации намагниченностей Ф-слоев. Существует две теоретические модели ССК. Первая модель была предложена в 1997 году — конструкция Ф1/Ф2/С, где Ф1- и Ф2-ферромагнитные слои, разделенные немагнитным слоем, С-сверхпроводящий слой [1]. Согласно работе [1] при параллельной (П) ориентации намагниченностей Ф1- и Ф2-слоев температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_c^{\text{П}}$ ниже, чем в случае их антипараллельной (АП) ориентации $T_c^{\text{АП}}$. Это объясняется меньшим средним обменным полем Ф-слоев, действующим на куперовскую пару С-слоя при АП-ориентации, чем при П-ориентации.

Вторая модель ССК была теоретически предсказана чуть позже, в 1999 году — конструкция Ф1/С/Ф2 [2, 3]. Принцип функционирования обеих моделей ССК одинаков.

Первыми экспериментально исследовались структуры конструкции Ф1/С/Ф2, в которых было подтверждено влияние взаимной ориентации намагниченностей Ф-слоев на T_c . Однако реализовать полный эффект сверхпроводящего спинового клапана для этих систем не удалось, поскольку величина эффекта ССК $\Delta T_c = T_c^{\text{АП}} - T_c^{\text{П}}$ была меньше ширины сверхпроводящего перехода δT_c . Впервые реализовать полный эффект ССК удалось в 2010 году для структуры Ф1/Ф2/С, где в качестве Ф-слоев использовалось железо, а С-слоя — индий [10].

Особое внимание в структурах ССК уделяют возникновению дальнедействующих триплетных компонент (ДТК) сверхпроводящего конденсата. Во многих теоретических работах (см., например, [11–16]) предполагают, что при определенных условиях в С/Ф интерфейсах могут возникать ДТК сверхпроводящего конденсата. В структурах ССК генерация ДТК открывает дополнительный канал для утечки куперовских пар из С-слоя в Ф-слои при неколлинеарных ориентациях намагниченностей Ф-слоев. Это приводит к существенному подавлению T_c при ортогональных ориентациях намагниченностей Ф-слоев [17]. Изучению этого эффекта

посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ (см., например, [17–33]).

К настоящему времени подробно изучены различные конструкции ССК с использованием разнообразных элементных металлов и сплавов. Результаты этих исследований указывают на то, что, возможно, достигнут предел в величине эффекта ССК при управлении магнитным полем [24, 26–27]. Это мотивирует к поиску структур ССК с новыми принципами управления сверхпроводящим током. Создание структур ССК на пьезоэлектрической подложке может быть перспективным в этом направлении. Это может позволить управлять ССК с помощью электрического поля. Для такой конструкции ССК можно предположить, что взаимное изменение направления намагниченностей Φ -слоев будет происходить под действием электрического поля на пьезоэлектрическую подложку за счет обратного магнитострикционного эффекта. Обратный магнитострикционный эффект в этой системе может возникать за счет деформаций пьезоэлектрической подложки при приложении электрического поля. Деформации пьезоэлектрической подложки создадут дополнительные напряжения в Φ -слое, нанесенном на эту подложку. Это приведет к дополнительной магнитной анизотропии, которая при определенном построении структуры может изменить направление вектора намагниченности Φ -слоя.

Таким образом, если зафиксировать намагниченность одного из Φ -слоев в структуре ССК, то можно будет изменять взаимное направление намагниченностей Φ -слоев электрическим полем, а значит, управлять ССК. Для этого нужно использовать Φ -слои с разными коэрцитивными силами или зафиксировать намагниченность одного из Φ -слоев при помощи антиферромагнитного (АФ) слоя.

С помощью магнитооптического эффекта Керра зарегистрировано изменение направления намагниченности Φ -слоя на сегнетоэлектрической подложке при приложении электрического поля напряженностью до 1 кВ/см (см. например, [34]).

В данной работе исследовались сверхпроводящие свойства структур ССК Co1/Cu/Co2/Cu/Pb, приготовленных на пьезоэлектрической подложке PMN-PT ($[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{0.7} - [\text{PbTiO}_3]_{0.3}$), обладающей высокими пьезоэлектрическими коэффициентами. Максимальная разница в T_c составила 15 мК при приложении к подложке электрического поля напряженностью 1 кВ/см. Обнаружено аномальное поведение T_c во внешнем магнитном поле, которое проявлялось в максимальных значениях T_c при ортогональной ориентации намагниченности Φ -слоев. Разница в T_c между коллинеарной и ортогональной ($T_c^{\text{ПП}}$) ориентациями намагниченностей Φ -слоев составила более 80 мК во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Образцы были приготовлены методами электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления в сверхвысоком вакууме на напылительном оборудовании фирмы BESTEC. Образцы напылялись на пьезоэлектрические подложки PMN-PT размерами $2 \times 10 \times 0.5$ мм. Шероховатость подложек составляла не более 0.5 нм. Была приготовлена серия образцов PMN-PT/Co1(3 нм)/Cu(4 нм)/Co2(d_{Co2})/Cu(1.2 нм)/Pb(60 нм)/Si₃N₄ с варьируемой толщиной Co2-слоя d_{Co2} в диапазоне от 1 до 3 нм. Структуры приготовленных образцов представлены на рис. 1. Здесь PMN-PT — пьезоэлектрическая подложка; Co1 и Co2 — ферромагнитные Φ 1- и Φ 2-слои; Cu(4 нм) — слой немагнитного металла, необходимый для разделения намагниченностей Φ -слоев; Cu(1.2 нм) — буферный слой, необходимый для гладкого роста Pb-слоя; Pb — сверхпроводящий слой; Si₃N₄ — защитный слой. Все материалы, использованные для приготовления образцов, имели чистоту 4N (содержание примесей 0.01 %). Слои Co1, Co2, Cu и Pb были приготовлены методом электронно-лучевого испарения. Защитный слой нитрида кремния (Si₃N₄) напылялся методом магнетронного распыления на переменном токе. Скорости напыления слоев составляли: 0.5 Å/с для слоев Co1, Co2 и Cu; 12 Å/с для Pb-слоя; 1.8 Å/с для защитного Si₃N₄-слоя. Образцы были приготовлены при пониженной температуре подложки ($T_{\text{sub}} \sim 150$ К). Такая температура подложки была необходима для получения гладкого Pb-слоя [35].

В приготовленных структурах ССК толщины Φ 1- и Φ 2-слоев различны. Как известно, чем толще Φ -слой, тем легче управлять его намагниченностью. В наших образцах толщина Co1-слоя больше толщины Co2-слоя. Следовательно, изменить направление намагниченности Co1-слоя легче, чем Co2-слоя.

Измерения T_c проводились путем записи сверхпроводящих переходов по изменению сопротивления при помощи стандартного 4-контактного метода на постоянном токе на установке, которая была создана на базе спектрометра ЭПР X-диапазона фирмы Bruker. Она содержит векторный электромагнит с малым (меньше 20 Э) остаточным магнитным полем, что позволяет контролировать с высокой точностью величину магнитного поля во время эксперимента. Использование электромагнита также значительно упрощает процедуру вращения образца в магнитном поле, приложенном в плоскости образца. Перед каждым измерением проводилась специальная процедура юстировки образца относительно оси вращения для того, чтобы минимизировать составляющую магнитного поля, перпендикулярную к плоскости образца. Погрешность позиционирования образца не превышала 3° относительно направления внешнего магнитного поля. Магнитное поле измерялось при помощи датчика Холла с точностью ± 0.3 Э. Образец помещался в низкотемпературную измерительную ячейку

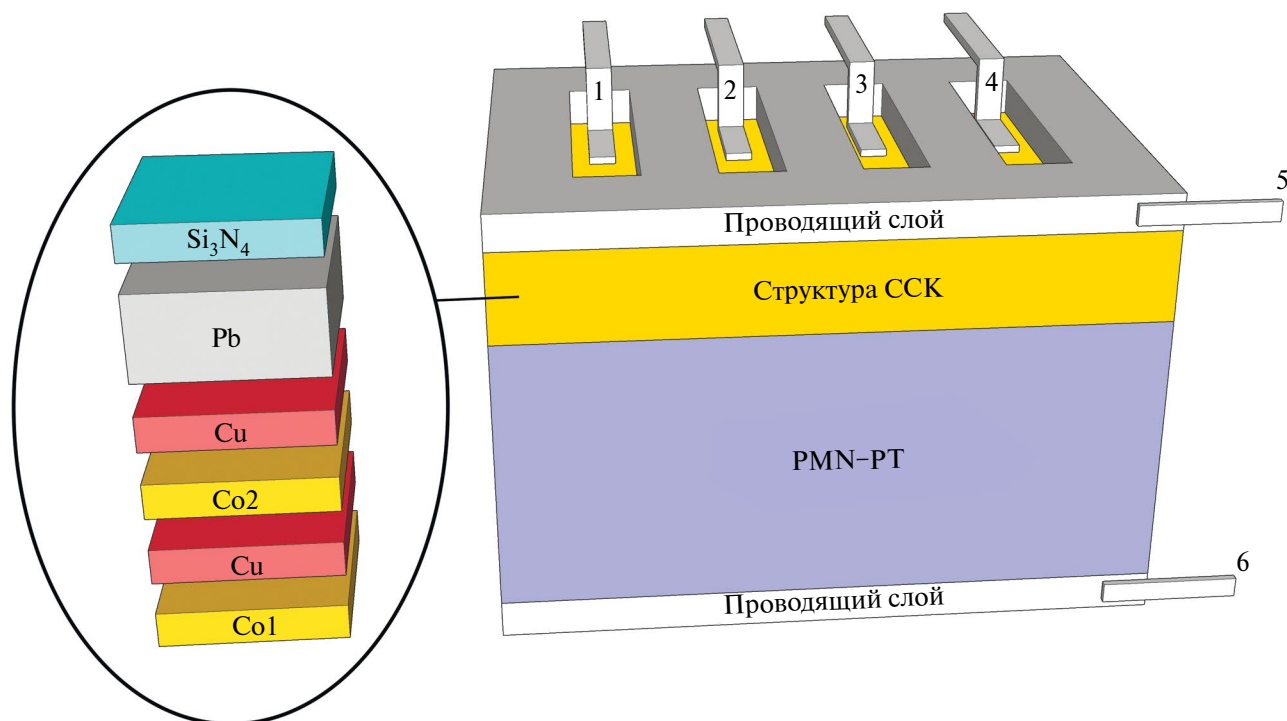


Рис. 1. Структуры приготовленных образцов со схемой измерения электросопротивления, где 1, 4 — токовые электроды; 2, 3 — потенциальные электроды; 5, 6 — емкостные пластины (обкладки конденсатора) для приложения электрического поля к пьезоэлектрической подложке.

с возможностью приложения электрического поля перпендикулярно плоскости образца. Схема измерения электросопротивления образцов представлена на рис. 1. Значения T_c определялись как средняя точка на сверхпроводящем переходе.

Качество сверхпроводящего слоя оценивалось из соотношения остаточных сопротивлений $RRR = R_{300K}/R_{10K}$. Для всех образцов значение RRR находилось в диапазоне 12—15, что свидетельствует о высоком качестве приготовленного Pb-слоя.

Процедура измерения образцов была следующей. Сначала образцы охлаждались от комнатных до гелиевых температур во внешнем магнитном поле 8 кЭ, направленном вдоль плоскости образца (field cooling procedure). После чего внешнее магнитное поле уменьшалось до нуля и изучались сверхпроводящие свойства образцов под действием электрического и магнитного полей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее интересные результаты были получены для образца PMN-PT/Co1(3 нм)/Cu(4 нм)/Co2(1 нм)/Cu(1.2 нм)/Pb(60 нм)/Si₃N₄ [Образец 2]. Исследования сверхпроводящих свойств данного образца в электрическом поле представлены на рис. 2. Кривые сверхпроводящих переходов на рис. 2 измерены без приложения электрического

поля и в электрическом поле напряженностью 1 кВ/см. Разница в T_c составила 15 мК. Существующая конструкция измерительной низкотемпературной ячейки не позволяет прикладывать к образцу большие значения напряженности электрического поля. Полное переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями при приложении электрического поля реализовать не удалось, так как сдвиг T_c оказался меньше ширины сверхпроводящих переходов.

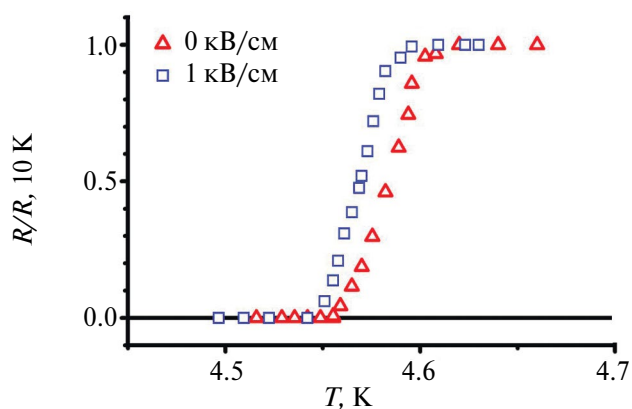


Рис. 2. Кривые сверхпроводящих переходов для образца PMN-PT/Co1(3 нм)/Cu(4 нм)/Co2(1 нм)/Cu(1.2 нм)/Pb(60 нм)/Si₃N₄, измеренные без электрического поля и с приложением электрического поля напряженностью 1 кВ/см.

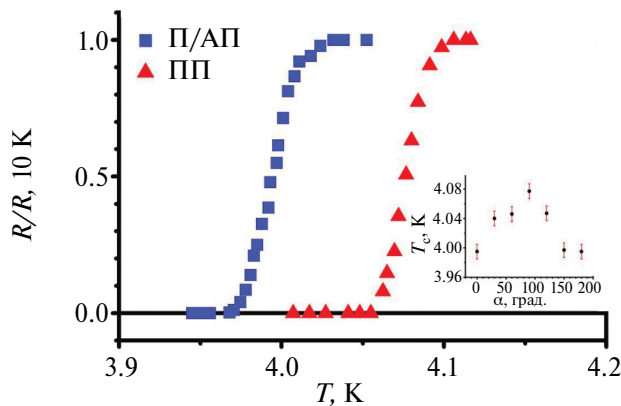


Рис. 3. Кривые сверхпроводящих переходов для образца PMN-PT/Co1(3нм)/Cu(4нм)/Co2(1нм)/Cu(1.2нм)/Pb(60нм)/Si₃N₄, измеренные при коллинеарной и ортогональной ($T_c^{\text{ПП}}$) ориентации намагниченностей Φ -слоев во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ. На вставке изображена зависимость T_c от угла α между намагниченностями Φ -слоев во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ.

На рис. 3 представлены кривые сверхпроводящих переходов для Образца 2, измеренные при коллинеарной и ортогональной ($T_c^{\text{ПП}}$) ориентации намагниченностей Φ -слоев во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ. На вставке на рис. 3 изображена зависимость T_c от угла α между намагниченностями Φ -слоев для Образца 2 во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ. Подобную зависимость мы уже наблюдали для серии образцов PMN-PT/Fe1(3 нм)/Cu(4 нм)/Fe2(d_{Fe2})/Cu(1.2 нм)/Pb(60 нм)/Si₃N₄, где в качестве материала для Φ -слоев использовалось железо [30]. Согласно рис. 3, разница в T_c между коллинеарной и ортогональной ($T_c^{\text{ПП}}$) ориентациями составила около 80 мК, что превышает ∂T_c . Это указывает на возможность реализации полного эффекта ССК для структур данного типа в магнитном поле при изменении взаимного направления намагниченностей Φ -слоев с коллинеарного на ортогональное. Необходимо отметить возникновение максимума T_c при ортогональной ориентации намагниченностей Φ -слоев. Такое положение максимума является аномальным, поскольку, согласно теории Фоминова и др., на угловой зависимости $T_c(\alpha)$ при ортогональной ориентации намагниченностей Φ -слоев должен наблюдаться минимум T_c , свидетельствующий о генерации ДТК сверхпроводящего конденсата [17]. Характерный минимум T_c при ортогональной ориентации намагниченностей Φ -слоев наблюдался во многих экспериментальных работах [18, 21, 22, 24–33]. Наличие максимума T_c при ортогональной ориентации намагниченностей Φ -слоев может быть связано с особенностями роста ССК на охлажденной пьезоэлектрической подложке. Деформации подложки при охлаждении могут приводить к появлению легкой оси намагничивания Co1-слоя. Полный эффект сверхпроводящего спинового клапана реализуется только в случае изменения взаимной ориентации намагниченностей Φ -слоев с коллинеарного на ортогональное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были исследованы сверхпроводящие свойства тонкопленочной гетероструктуры Co1/Cu/Co2/Cu/Pb на пьезоэлектрической подложке во внешнем магнитном и электрическом полях. Обнаружен сдвиг T_c в электрическом поле. Максимальный сдвиг T_c составил 15 мК при приложении электрического поля напряженностью 1 кВ/см. Во внешнем магнитном поле $H_0 = 1$ кЭ был обнаружен сдвиг T_c более чем на 80 мК и продемонстрирована возможность реализации полного эффекта ССК. Показано аномальное поведение угловой зависимости T_c , которое проявляется в максимальных значениях T_c при ортогональной ориентации намагниченностей Φ -слоев. Полученные результаты указывают на возможность реализации рабочей модели ССК на пьезоэлектрической подложке.

Исследования проведены за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-72-10178) и темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН. В рамках гранта РФФИ № 21-72-10178 были приготовлены образцы, проведены исследования образцов при воздействии электрического поля на пьезоэлектрическую подложку, проведена интерпретация полученных результатов при воздействии электрического поля. В рамках темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН были проведены исследования образцов под воздействием магнитного поля и проведена интерпретация полученных результатов при воздействии магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oh S., Youm D., Beasley M.R. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 2376.
2. Tagirov L.R. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. Art. No. 2058.
3. Buzdin A.I., Vedyayev A.V., Ryzhanova N.V. // Europhys. Lett. 1999. V. 48. P. 686.
4. Gu J.Y., You C.Y., Jiang J.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. Art. No. 267001.
5. Moraru I.C., Pratt W.P., Birge N.O. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. Art. No. 037004.
6. Potenza A., Marrows C.H. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. Art. No. 180503(R).
7. Westerholt K., Sprungmann D., Zabel H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. Art. No. 097003.
8. Steiner R., Ziemann P. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. Art. No. 094504.
9. Pugach N.G., Kupriyanov M. Yu., Vedyayev A.V. et al. // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. Art. No. 134516.
10. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. No. 102505.
11. Buzdin A.I. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 935.
12. Blamire M.G., Robinson J.W.A. // J. Phys. Cond. Matter. 2014. V. 26. Art. No. 453201.

13. *Linder J., Robinson J.W.A.* // Nature Phys. 2015. V. 11. P. 307.
14. *Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. Art. No. 4096.
15. *Eschrig M.* // Physics Today. 2011. V. 64. P. 43.
16. *Efetov K.B., Garifullin I.A., Volkov A.F., Westerholt K.* Magnetic heterostructures advances and perspectives in spinstructures and spintransport. Springer, 2007.
17. *Фоминов Я.В., Голубов А.А., Карминская Т.Ю. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 329; *Fominov Ya.V., Golubov A.A., Karminskaya T. Yu. et al.* // JETP Lett. 2010. V. 91. P. 308.
18. *Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. Art. No. 057005.
19. *Wu C.-T., Valls O.T., Halterman K.* // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. Art. No. 014523.
20. *Banerjee N., Smiet C.B., Smits R. et al.* // Nature Commun. 2014. V. 5. Art. No. 3048.
21. *Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A. et al.* // Phys. Rev. B2015. V. 91. Art. No. 214508.
22. *Garifullin I.A., Leksin P.V., Garif'yanov N.N. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 373. P. 18.
23. *Gu Y., Halász G.B., Robinson J.W.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Art. No. 067201.
24. *Singh A., Voltan S., Lahabi K. et al.* // J. Phys. Rev. X. 2015. V. 5. Art. No. 021019.
25. *Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. Art. No. 100502(R).
26. *Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2019. V. 10. P. 1458.
27. *Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al.* // Phys. Rev. B2019. V. 100. Art. No. 134511.
28. *Камашев А.А., Валидов А.А., Гарифьянов Н.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 4. С. 518; *Kamashev A.A., Validov A.A., Garif'yanov N.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 4. P. 448.
29. *Камашев А.А., Большаков С.А., Мамин Р.Ф. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 9. С. 1268; *Kamashev A.A., Bolshakov S.A., Garifullin I.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 9. P. 1308.
30. *Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ 2019. Т. 110. № 5—6. С. 325 // *Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al.* // JETP Lett. 2019. V.110. No. 5. P. 342.
31. *Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А. и др.* // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. № 2. С. 345. // *Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A. et al.* // JETP. 2020. V. 131. No. 2. P. 311.
32. *Kamashev A.A., Garifullin I.A.* // Письма в ЖЭТФ 2021. Т. 113. № 3—4. С. 210. // *Kamashev A.A., Garifullin I.A.* // JETP Lett. 2021. V.113. № 3. No. 3—4. P. 194.
33. *Валидов А.А., Насырова М.И., Хабибуллин Р.Р. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 4. С. 523; *Validov A.A., Nasyrova M.I., Khabibullin R.R. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 4. P. 452.
34. *Kamashev A.A., Leontyev A.V., Garifullin I.A. et al.* // Ferroelectrics 2022. V. 592. P. 123.
35. *Leksin P.V., Kamashev A.A., Schumann J. et al.* // Nano Res. 2016. V. 9. P. 1005.
36. *Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A.* // Magnetism. 2023. V. 3. P. 204.

Superconducting properties of Co1/Cu/Co2/Cu/Pb heterostructure on piezoelectric substrate PMN-PT

A. A. Kamashev^{1, *}, A. A. Validov¹, S. A. Bol'shakov¹, N. N. Garif'yanov¹, I. A. Garifullin¹

¹ *Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Center Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029, Russia*

*e-mail: kamandi@mail.ru

The effect of the PMN-PT piezoelectric substrate ($[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{0.7} - [\text{PbTiO}_3]_{0.3}$) on the superconducting properties of the PMN-PT/Co1/Cu/Co2/Cu/Pb thin-film heterostructure was studied. The change in superconducting transition temperature (T_c) was recorded when an electric field was applied to the PMN-PT substrate and in an external magnetic field. The maximum difference in T_c was 15 mK when an electric field of 1 kV/cm was applied. In an external magnetic field, the maximum difference in T_c was more than 80 mK when the mutual direction of the magnetizations of the ferromagnetic layers changed from parallel/antiparallel to perpendicular.