

Сверхпроводящие спиновые вентили на основе спиральных магнетиков

Н.Г. Пугач^{1,2,*}, М.О. Сафончик³, Д. Хайм

1 Научно-Исследовательский Институт Ядерной Физики имени Д.В. Скобельцына, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1(2), Москва ГСП-2, 119991.

2 Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, Москва, 101000.

3 Физико-Технический Институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, 194021.

*pugach@magn.ru

Теоретически разработаны спиновые вентили для сверхпроводниковой спинтроники нового типа на основе магнитных материалов со спиральным магнитным упорядочением. Использование таких материалов должно существенно упростить структуру элементов до двух слоев: сверхпроводника и спирального магнетика с контролируемым направлением магнитной спирали. А следовательно, может упростить и технологию их изготовления, и также решить проблему выборочного магнитного переключения в матрице из таких элементов (проблема полувыбора), что создает преимущества при использовании их для низкотемпературной магнитной памяти.

Введение

Элементы памяти являются одним из основных элементов как обычной, так и сверхпроводящей спинтроники [1-3]. Их работа основывается на спин-вентильном эффекте (spin valve effect – SVE), т.е. изменении критической температуры T_c для сверхпроводников, или сопротивления, при перемагничивании магнитных слоев системы от антипараллельной до параллельной ориентации [3].

Переключение сверхпроводящего слоя из сверхпроводящего в нормальное состояние зависит от взаимной ориентации ферромагнитных слоев, параллельной или антипараллельной, по аналогии с обычными спиновыми вентилями. Механизм SVE был обоснован подавлением критической температуры сверхпроводника T_c магнитным обменом в F-слоях, что влияет на свойства S-слоя через эффект близости. В антипараллельной ориентации воздействия двух F-слоев вычитаются, а в случае параллельной магнитной ориентации складываются, что ведёт к более эффективному подавлению сверхпроводимости. Поскольку сверхпроводящие корреляции являются дальнедействующими на масштабах атомной решётки, SVE может проявляться в структурах, изготовленных в двух конфигурациях: FSF или SFF, где магнитные слои расположены по одну или по обе стороны от сверхпроводящего слоя.

Любопытно, что SVE может основываться и на другом физическом механизме. Неколлинеарная намагниченность в SF гетероструктурах вызывает спин-триплетные сверхпроводящие корреляции

(LRTC) с ненулевой общей проекцией спина на ось квантования. Обменное магнитное поле не подавляет одинаковые спин-триплетные пары, которые таким образом проникают дальше в ферромагнитную область. Появление LRTC влияет на эффект близости через открытие нового канала проникновения куперовских пар из сверхпроводящего слоя в ближайший слой. В некоторых экспериментах наблюдалось более сильное изменение T_c для неколлинеарной намагниченности, чем для коллинеарной конфигурации (параллельной или антипараллельной). Однако, могут ли триплетные корреляции быть использованы для переключения элементов в реальных устройствах, до сих пор является открытым вопросом. В самом деле, такие наноструктуры содержат слои нескольких различных магнитных, немагнитных и антиферромагнитных материалов, что сильно усложняет технологию производства и контроль её магнитной конфигурации.

Исследуемые структуры и обсуждение результатов

В данной работе мы рассматриваем реализацию другого типа триплетных устройств, которые содержат только один магнитный слой с контролируемой внутренней неколлинеарной намагниченностью. Подходящими магнитными материалами являются, к примеру, Cr, Ho, соединения семейства MnSi, которые имеют спиральную или геликоидальную намагниченность. В настоящее время такие соединения и плёнки интенсивно исследуются

в качестве среды для магнитных топологических дефектов, типа скирмионов. Их спиральной магнитной структурой, характеризуемой вектором \mathbf{Q} , можно управлять с помощью слабого внешнего магнитного поля, меньше критического для тонких сверхпроводящих пленок.

В недавней работе [4] был предложен новый вид сверхпроводящей памяти, где SVE возникает при контролируемом изменении направления магнитной спирали. Мотивацией для данной работы послужили эксперименты [5,6] где SVE наблюдался при изменении магнитного упорядочения от геликоидального до однородного, которое сохраняется и после выключения поля. В этих экспериментах T_c подавлялось однородной намагниченностью. То же происходит и при \mathbf{Q} параллельном слоям. Мы же обнаружили возможность обратного эффекта: при намагничивании спирального антиферромагнетика от начального состояния с полным магнитным моментом равным нулю, T_c может возрасти (Рис.1) т.к. переключение между спиральным и однородным магнитным упорядочением подавляет канал проникновения куперовских пар, связанный с LRTC.

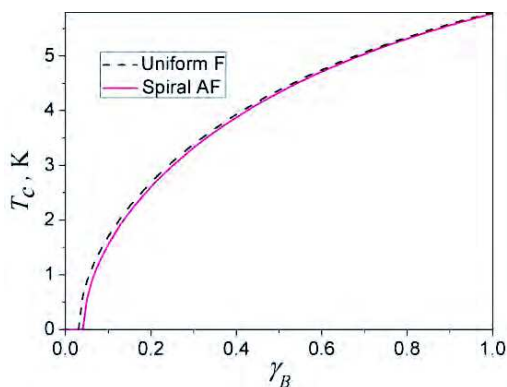


Рис. 1. Зависимость критической температуры сверхпроводящего слоя толщины 30 nm от параметра прозрачности SF границы γ_b при спиральной антиферромагнитной (красная линия) и однородной ферромагнитной (черный пунктир) намагниченности

$$\gamma_b = R_b A \sigma_f / \xi_f$$

На рис.1 показан спин-вентильный эффект, который составляет по порядку величины $\sim 10 - 100$ mK, в зависимости от прозрачности интерфейса SF бислоя (R_b и A - сопротивление и площадь SF интерфейса соответственно, а σ_f и ξ_f - удельная проводимость и длина когерентности металла в F слое).

Как ожидается, γ_b ослабляет сверхпроводящий эффект близости [7], но характерные значения T_c до десятой Кельвина могут быть вполне заметны в эксперименте. Также, было рассчитано изменение критического тока SFS спирального Джозефсоновского спинового вентиля при изменении намагниченности F слоя.

Заклучение

Исследовался эффект близости в гетероструктурах, состоящих из тонкого сверхпроводящего слоя, на поверхности объемного спирального антиферромагнетика и SFS спирального Джозефсоновского спинового вентиля. Их принцип действия основывается на контроле появления дальнедействующих триплетных сверхпроводящих корреляций. Такие би- и трислои в качестве элементов памяти, имеют очень простую структуру по сравнению с представленными ранее. Было численно показано, что однородное намагничивание может не только уменьшать, но и увеличивать T_c в зависимости от параметров F слоя.

Работа была поддержана совместными Российско-Греческими проектами RFMEFI61717X0001 и T4DPQ-00031 "Экспериментальное и теоретическое исследование физических свойств низкоразмерных квантовых нанозлектронных систем".

Литература

1. M. G. Blamire and J. W. A. Robinson J. Phys.: Condens. Matter 26 453201 (2014).
2. J. Linder and J. W. A. Robinson. Nature Physics 11, 307 (2015).
3. M. Eschrig, Rep. Prog. Phys. 78, 104501 (2015).
4. N. G. Pugach, M. Safonchik, T. Champel, et. al. Appl. Phys. Lett. 111, 162601 (2017).
5. Y. Gu, J. W. A. Robinson, M. Bianchetti, et. al. APL Mater. 2, 046103 (2014).
6. N. Satchell, J. D. S. Witt, M. G. Flokstra, et. al. Phys. Rev. Applied 7, 044031 (2017).
7. N. G. Pugach, M. O. Safonchik. JETP Lett. 107(5) (2018) (accepted).