

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXI Международного  
симпозиума**

*13–16 марта 2017 г., Нижний Новгород*

*Том 1*

*Секции 1, 2, 4, 5*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
2017

# Распределение функций спаривания в различных режимах переключения сверхпроводящего спинового клапана

Р.Р. Гайфуллин<sup>1,\*</sup>, Р.Г. Деминов<sup>1</sup>, Л.Р. Тагиров<sup>1,2</sup>, М.Ю. Куприянов<sup>3,4,1</sup>, А.А. Голубов<sup>5,4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики КФУ, ул. Кремлевская, 18, Казань 420008, Россия

<sup>2</sup> Физико-Технический институт РАН им. Е.К. Завойского, ул. Сибирский Тракт 10/7, Казань 420029, Россия

<sup>3</sup> НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, ул. Ленинские Горы, 1-2, Москва 119992, Россия

<sup>4</sup> МФТИ, Институтский пер., 9, Долгопрудный 141700, Россия

<sup>5</sup> Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute of Nanotechnology University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands

\*gaifullin.rashid@gmail.com

Исследована критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  трехслойной гетероструктуры SF1F2 (S — синглетный сверхпроводник, F1 и F2 — ферромагнитные металлы), в которой дальнедействующая триплетная компонента сверхпроводящего спаривания образуется при неколлинеарной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. Проанализированы различные режимы переключения спинового клапана (прямой, триплетный и инверсный) и особенности распределения по слоям спин-синглетной и спин-триплетных компонент сверхпроводящего спаривания в этих режимах, чтобы выяснить какая из компонент и как может влиять на температуру сверхпроводящего перехода  $T_c$ .

## Введение

Исследована критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  трехслойной гетероструктуры SF1F2 (S — синглетный сверхпроводник, F1 и F2 — ферромагнитные металлы, рис. 1), в которой дальнедействующая триплетная компонента сверхпроводящего спаривания образуется при неколлинеарной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев [1].

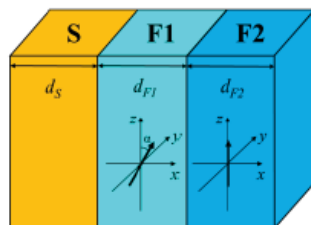


Рис. 1. Трехслойная гетероструктура SF1F2. Граница контакта SF1 соответствует  $x = 0$ . Жирные стрелки в F слоях обозначают направления обменных полей  $\mathbf{h}$ , лежащих в плоскости  $(y, z)$ . Угол между направлениями обменных полей  $\alpha$

Для вычисления  $T_c$  как функции параметров трехслойной структуры конечных размеров был применен асимптотически точный численный метод (многомодовый метод, а также метод фундаментального решения) [2].

Ранее в работе [3] было показано, что  $T_c$  полубесконечной гетероструктуры SF1F2 может быть немонотонной функцией угла  $\alpha$  между намагниченностями двух ферромагнитных слоев в противоположность монотонному поведению  $T_c(\alpha)$ , полученному для FSF модели сверхпроводящего спинового вентиля [4].

В работе [5] было обнаружено существование в FFS структуре аномальной зависимости спин-триплетных корреляций от угла  $\alpha$  в баллистическом случае (толщины слоев много меньше длины когерентности материалов этих слоев).

В настоящей работе рассмотрено распределение амплитуд спин-синглетных и спин-триплетных парных корреляций как функции толщин слоев при различных углах  $\alpha$  между намагниченностями в SF1F2 структуре, чтобы выяснить которое из распределений и каким образом влияет на сверхпроводящую температуру перехода  $T_c$ .

## Результаты и обсуждение

SF1F2 структура исследована в грязном пределе, который описывается уравнениями Узаделя. Задача вычисления  $T_c$  сводится к системе уравнений для синглетной компоненты  $f_0$  в S слое. Эта система уравнений включает в себя уравнение самосогласования

$$\Delta \ln \frac{T_c}{T_c} = 2\pi T_c \sum_{\omega > 0} \left( \frac{\Delta}{\omega} - f_0 \right), \quad (\Phi 1)$$

и уравнение Уздеда

$$\frac{D}{2} \frac{d^2 f_0}{dx^2} - \omega f_0 + \Delta = 0, \quad (\Phi 2)$$

с граничными условиями [3-5]:

$$\left. \frac{df_0}{dx} \right|_{x=-d_S} = 0, \quad -\xi_S \left. \frac{df_0}{dx} \right|_{x=0} = W f_0. \quad (\Phi 3)$$

Результат численных расчетов  $T_c$  как функции взаимной ориентации намагниченностей F слоев (триплетный режим переключения спинового клапана) представлен на рис. 2.

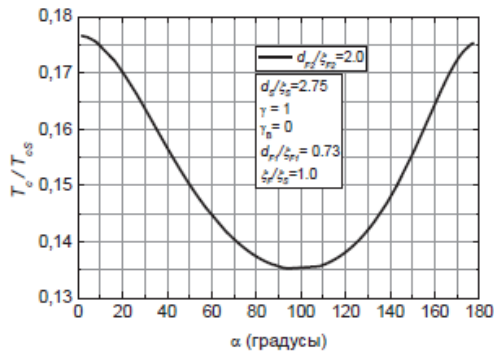


Рис. 2. Зависимость температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$  от угла  $\alpha$  между намагниченностями F слоев

При температурах несколько выше минимальной температуры возможно переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями при относительно небольшом изменении угла  $\alpha$  между намагниченностями F-слоев – эффект триплетного спинового клапана. Изменение  $T_c$  при изменении угла между намагниченностями ферромагнитных слоев сопровождается изменением соотношений между амплитудами различных компонент сверхпроводящего спаривания: синглетной компоненты  $f_0$ , триплетной компоненты  $f_3$  с нулевой проекцией на ось  $z$  и триплетной компоненты  $f_2$  с проекцией  $\pm 1$  на ось  $z$ . Максимум дальнедействующей триплетной компоненты сверхпроводящего спаривания  $f_2$  наблюдается при ортогональной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. Распределение всех компонент сверхпроводящего спаривания по слоям гетероструктуры при ортогональной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев представлено на рис. 3.

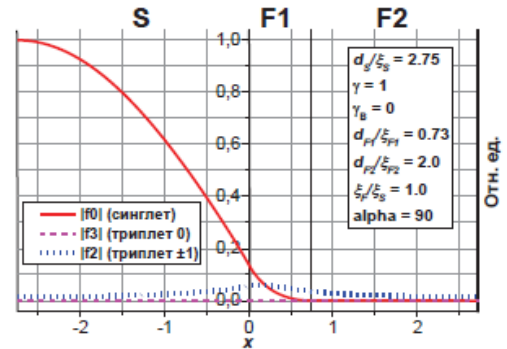


Рис. 3. Распределение спин-синглетной и спин-триплетных компонент сверхпроводящего спаривания

Исследованы также другие режимы переключения спинового вентиля: прямой — температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  при параллельной ориентации меньше чем при антипараллельной, и инверсный — температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  при параллельной ориентации больше чем при антипараллельной. Проведен анализ распределения по слоям спин-синглетной и спин-триплетных компонент сверхпроводящего спаривания в этих режимах при различных ориентациях намагниченностей ферромагнитных слоев.

## Благодарности

Работа была поддержана проектами РФФИ 16-02-01171-а, 14-02-31002-mol\_a, 15-32-20362-bel\_a\_ved, DFG HO 955/9-1 и Программой повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета.

## Литература

1. F.S. Bergeret, A.F. Volkov, K.B. Efetov // *Reviews of Modern Physics*, V. 77, 1321°–°1373 (2005).
2. Ya.V. Fominov, N.M. Chtchelkatchev, A.A. Golubov // *Physical Review B*, V. 66, 014507 (2002).
3. Ya.V. Fominov, A.A. Golubov, T.Yu. Karminskaya, M.Yu. Kupriyanov, R.G. Deminov, L.R. Tagirov // *JETP Letters*, V. 91, 308°–°313 (2010).
4. Ya.V. Fominov, A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov // *JETP Letters*, V. 77, 510°–°515 (2003).
5. T.Yu. Karminskaya, A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov // *Physical Review B*, V. 84, 064531 (2011).