

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXIV Международного  
симпозиума**

*10–13 марта 2020 г., Нижний Новгород*

*Том 1*

*Секции 1, 2, 4*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
2020

УДК 538.9  
ББК 22.37; 22.33  
Н-25

Н-25 **Нанофизика и наноэлектроника. Труды XXIV Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2020. — 469 с.

ISBN 978-5-91326-587-6

#### Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;  
Отделение физических наук РАН;  
Научный совет РАН по физике полупроводников;  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;  
Институт физики микроструктур РАН;  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;  
ОАО «Санаторий «Автомобилист»;  
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

#### Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН  
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

#### Учёный секретарь Симпозиума

В.В. Румянцев, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

#### Программный комитет

В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногоровка;
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	ООО «НТ-МДТ», Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М.Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черногоровка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногоровка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногоровка
Н.Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н.Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногоровка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород

#### Организационный комитет

В.Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников, к.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов, к.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова	ИФМ РАН, Н. Новгород
П.М. Марычев	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.А. Архипова	ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-587-6

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет  
им. Н.И. Лобачевского, 2020  
© Институт физики микроструктур  
РАН, 2020

# Сверхпроводящий спиновый клапан S1/F1/S2/F2 с неидеальными интерфейсами

Р.Р. Гайфуллин<sup>1,\*</sup>, В.Н. Кушнир<sup>2,3</sup>, Р.Г. Деминов<sup>1</sup>, М.Ю. Куприянов<sup>1,5,6</sup>,  
А.А. Голубов<sup>6,7</sup>, Л.Р. Тагиров<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. Петруся Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь.

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, Минск, 220013, Республика Беларусь.

<sup>4</sup> КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, ул. Сибирский Тракт, 10/7, Казань, 420029.

<sup>5</sup> НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, ул. Ленинские Горы, 1-2, Москва, 119992.

<sup>6</sup> МФТИ, Институтский пер., 9, Долгопрудный, 141700.

<sup>7</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  $T_c$  многослойной структуры S1/F1/S2/F2 (S1 – синглетный сверхпроводник Nb, F1 и F2 – ферромагнитные металлы Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>, S2 – немагнитный металл с нормальной проводимостью (нп) нп-Nb, который служит для разделения F1 и F2) с неидеальными границами, в которой дальнедействующая триплетная компонента сверхпроводящего спаривания образуется при неколлинеарной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. Изучено влияние дополнительного слоя S2 на различные режимы спинового клапана S1/F1/F2 – прямой и триплетный – с учетом зависимости параметров материалов слоев от толщин этих слоев, и с параметрами интерфейсов, близкими по значениям к параметрам реальных систем.

## Введение

Исследована критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  многослойной структуры S1/F1/S2/F2 (S1 – синглетный сверхпроводник Nb, F1 и F2 – ферромагнитные металлы Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>, S2 – немагнитный металл с нормальной проводимостью (нп) нп-Nb, который служит для разделения F1 и F2) с неидеальными границами, в которой дальнедействующая триплетная компонента сверхпроводящего спаривания образуется при неколлинеарной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев [1].

Ранее было показано, что  $T_c$  трехслойной структуры S/F1/F2 [2] и многослойной структуры S/F1/N/F2 [3] (N – нормальный металл) может быть немонойтонной функцией угла  $\alpha$  между намагниченностями ферромагнитных слоев, в противоположность монотонному поведению  $T_c(\alpha)$  в трехслойной гетероструктуре F1/S/F2 [4].

В работе [5] нами было рассмотрено влияние дополнительного сверхпроводящего слоя S2 и нормального слоя N на прямой и триплетный режим спинового клапана при изменении толщин слоев в приближении идеальных границ: границы контактов прозрачны ( $\gamma_b = 0$ ), константы диффузии и удельные сопротивления одинаковы ( $\gamma = 1$ ).

В настоящей работе рассмотрено влияние дополнительного слоя S2 из сверхпроводящего металла, но с толщиной, при которой сверхпроводимость не возникает даже в уединенной пленке, и сравнивается с дополнительным слоем N из несверхпроводящего нормального металла с неидеальными границами.

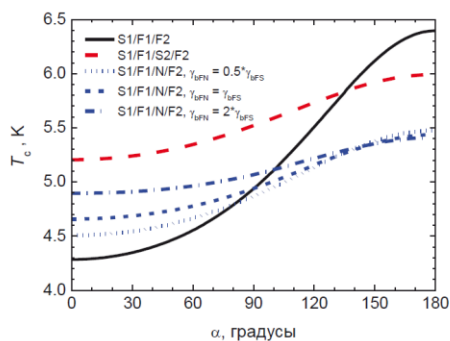
## Результаты и обсуждение

Для вычисления критической температуры  $T_c$  как функции параметров спинового клапана, который в грязном пределе описывается с помощью уравнений Узалея, был применен матричный метод [6].

При моделировании использовались параметры материалов:  $T_{cNb}(14 \text{ нм}) = 7.41 \text{ К}$ , удельные сопротивления  $\rho_{Nb} = 17 \text{ мкОмсм}$ ,  $\rho_{Pd_{81}Ni_{19}} = 64 \text{ мкОмсм}$ , длины когерентности  $\xi_{Nb} = 5.8 \text{ нм}$ ,  $\xi_{Pd_{81}Ni_{19}} = 6.2 \text{ нм}$ , обменная энергия  $E_{ex} = 230 \text{ К}$ ,  $d_{nn-Nb} = 2.9 \text{ нм}$ ,  $\gamma_{bFS} = 0.13$  [7]. В качестве нормального металла N рассматривалась медь:  $\xi_{Cu}(T_{cS} = 7.41 \text{ К}) = 29 \text{ нм}$ ,  $\rho_{Cu} = 1.3 \text{ мкОмсм}$  [8], абсолютные значения обменных полей в обоих ферромагнитных слоях совпадают,  $\gamma_{bFN}$  варьировалась:  $0.5 * \gamma_{bFS}$ ,  $\gamma_{bFS}$ ,  $2 * \gamma_{bFS}$ .

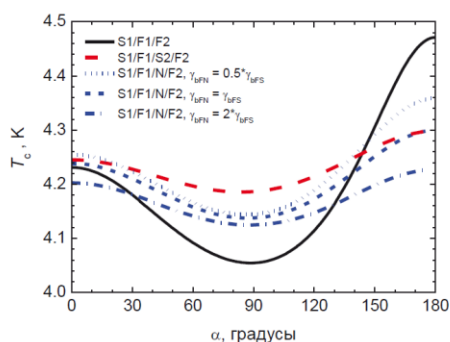
Результаты численного моделирования для прямого режима переключения спинового вентиля, когда температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  при

параллельной ориентации меньше чем при антипараллельной ( $T_c^{\text{II}} < T_c^{\text{API}}$ ), представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость критической температуры  $T_c$  от угла  $\alpha$  между намагниченностями ферромагнитных слоев S1/F1/F2, S1/F1/S2/F2 и S1/F1/N/F2 структур. Прямой режим переключения спинового вентиля.  $d_{S1} = 14$  нм,  $d_{F1} = 1$  нм,  $d_{F2} = 1$  нм,  $d_{S2} = 2.9$  нм,  $d_N = 2.9$  нм

Результаты численного расчета для триплетного режима переключения спинового вентиля, когда минимум критической температуры  $T_c$  достигается при неколлинеарной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев, представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость критической температуры  $T_c$  от угла  $\alpha$  между намагниченностями ферромагнитных слоев S1/F1/F2, S1/F1/S2/F2 и S1/F1/N/F2 структур. Триплетный режим переключения спинового вентиля.  $d_{S1} = 14$  нм,  $d_{F1} = 3.3$  нм,  $d_{F2} = 3.3$  нм,  $d_{S2} = 2.9$  нм,  $d_N = 2.9$  нм

Параметры режимов структур представлены в таблице 1.  $T_{C\_np} = (T_c^{\text{II}} + T_c^{\text{API}})/2$ ,  $\Delta T_C^{\text{API-II}} = T_c^{\text{API}} - T_c^{\text{II}}$ ,  $T_{C\_тр} = (T_c^{\text{II}} + T_c^{\text{III}})/2$ ,  $\Delta T_C^{\text{II-III}} = T_c^{\text{II}} - T_c^{\text{III}}$ ,  $T_c^{\text{III}} = T_c(\alpha = 90^\circ)$ . Видно, что дополнительный N или S2 слой уменьшает амплитуду изменения тем-

ператур спинового вентиля в сравнении с трехслойной структурой S1/F1/F2. Дополнительный S2 слой может увеличить критическую температуру режимов спинового клапана в сравнении с дополнительным N слоем. Однако изменение  $\Delta T_C$  для триплетного режима в S1/F1/N/F2 структуре больше чем в S1/F1/S2/F2 для исследованного диапазона значений параметров.

**Таблица 1.** Параметры режимов структур. ( $\gamma_{\text{BFN}} = \gamma_{\text{BFS}}$ ).

	Прямой режим, рис 1		Триплетный, рис 2	
	$T_{C\_np}$ , К	$\Delta T_C^{\text{API-II}}$ , К	$T_{C\_тр}$ , К	$\Delta T_C^{\text{II-III}}$ , мК
S1/F1/F2	5.34	2.11	4.14	176
S1/F1/S2/F2	5.6	0.78	4.21	58
S1/F1/N/F2	5.05	0.78	4.19	100

### Благодарности

Работа поддержана проектом РФФ № 18-12-00459. В.Н.К. благодарит за поддержку проект ГПНИ Республики Беларусь “Физическое материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограмма “Нанотех” (2016–2020).

### Литература

1. F.S. Bergeret, A.F. Volkov, K.B. Efetov // Reviews of Modern Physics, V. 77, 1321°–°1373 (2005).
2. 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).
3. R.R. Gaifullin, R.G. Deminov, L.R. Tagirov, M.Yu. Kupriyanov, Ya.V. Fominov, A.A. Golubov, to be submitted.
4. Ya.V. Fominov, A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov // JETP Letters, V. 77, 510°–°515 (2003).
5. R.R. Gaifullin, V.N. Kushnir, R.G. Deminov, L.R. Tagirov, M.Yu. Kupriyanov, A.A. Golubov // Phys. Solid State, V. 61, 1535°–°1538 (2019).
6. Kushnir V.N.: DSc dissertation, Minsk 2014.
7. C. Cirillo, A. Rusanov, C. Bell, J. Aarts // Phys. Rev. B, V. 75, 174510 (2007).
8. A. Tesauro, A. Aurigemma, C. Cirillo, S.L. Prischepa, M. Salvato, C. Attanasio // Supercond. Sci. Technol., V. 18, 1 (2005).