

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу КАМАШЕВА Андрея Андреевича на тему: “Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в эффекте сверхпроводящего спинового клапана”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

**Оппонент:** Пугач Наталия Григорьевна, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, старший научный сотрудник Научно-Исследовательского Института Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 119991, Москва; тел. 915-2611184, e-mail: pugach@magn.phys.msu.ru.

Диссертационная работа А. А. Камашева посвящена исследованию эффекта сверхпроводящего спинового клапана (сверхпроводниковому спинвентильному эффекту) в искусственно созданных слоистых гетероструктурах, состоящих из двух слоев ферромагнитного (F), слоя сверхпроводящего (S) металлов, и дополнительных слоев, в конфигурации SFF.

**Актуальность** темы обусловлена возникновением в течение последних нескольких лет новой перспективной дисциплины – сверхпроводящей спинтроники, и выделением ее в самостоятельное направление исследований. Сверхпроводящие спиновые вентили являются основным элементом сверхпроводящей спинтроники.

В качестве основных достижений обсуждаемой диссертационной работы можно выделить следующие результаты.

Отработана технология создания сверхпроводящих спиновых вентилей SFF типа, подобраны материалы и параметры структур, а также дополнительные технологические слои, улучшающие и стабилизирующие их свойства.

Тщательно проведена характеристика образцов, включая микрофотографию с помощью просвечивающего электронного микроскопа, и магнитометрические измерения.

Проведены исследования критической температуры SFF спиновых вентилей от угла разориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. Достигнуто полное переключение между сверхпроводящим и нормальным со-



стоянием при изменении взаимной ориентации намагниченности во внешнем магнитном поле. Последнее реализуется при ширине сверхпроводящего перехода меньше величины эффекта спинового переключения, что было достигнуто тщательной обработкой технологии приготовления, выбором материалов и толщин слоев.

Выявлена роль дальнедействующих триплетных сверхпроводящих компонент. Продемонстрирован изолированный триплетный спинвентильный эффект, что подтверждает наличие сверхпроводящих корреляций между электронами с одинаковой проекцией спина на ось намагниченности (триплетного спаривания) в таких структурах при неколлинеарной магнитной конфигурации.

Эти нетривиальные результаты тщательно проанализированы и поняты в рамках теории сверхпроводящих спиновых вентилях в «грязном» пределе.

Особенно хочется подчеркнуть тщательность подготовки и проведения экспериментов по измерению, изготовлению, характеристике, и оптимизации спинвентильных структур.

Таким образом **новизна, достоверность, а также обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**, не вызывает сомнений.

Диссертация написана хорошим русским языком и хорошо проиллюстрирована. Явным достоинством работы является также большое число публикаций в международных журналах высокого научного уровня.

Однако по диссертационной работе имеется несколько замечаний:

1. Положение 4, выносимое на защиту «Триплетный вклад в эффект спинового клапана зависит от параметров структуры ...» кажется очевидным.
2. Использование теории Фоминова и др., для структур SFF в «грязном» пределе необоснованно для описания проведенных экспериментов с чистыми структурами, включающими «сильные» ферромагнетики, такие как железо и пермаллой. Критерии применимости «грязного» предела квазиклассического приближения на с. 78 сформулированы неверно. На самом деле, критерии для ферромагнитных слоев более строгие:  $l_F \ll \xi_h, d_F$ , в описанных экспериментах, по оценкам автора  $l_F = 1$  nm,  $\xi_h = 0.8$  nm, и  $d_{F1} = 0.5-1$  nm для железа (с.77, 84), и  $l_F = 3$  nm,  $\xi_h = 1.5$  nm, и  $d_{F1} = 0.5-3$  nm для пермаллоя (с. 107,109,112). Очевидно, эти кри-



- теории не выполняются, что позволило бы ожидать лишь качественного совпадения теории Фоминова и др. с описанными экспериментами.
3. Изолированный триплетный вклад в эффект спинового вентиля был обнаружен не впервые. Ранее он наблюдался в SFF спиновых вентилях, описанных в экспериментальных работах: A. A. Jara, C. Safranski, I. N. Krivorotov, C.-T. Wu, A. N. Malmi-Kakkada, O. T. Valls, and K. Halterman, Angular dependence of superconductivity in superconductor / spin valve heterostructures, *Phys. Rev. B* 89, 184502 (2014); M. G. Flokstra, T. C. Cunningham, J. Kim, N. Satchell, G. Burnell, P. J. Curran, S. J. Bending, C. J. Kinane, J. F. K. Cooper, S. Langridge, A. Isidori, N. Pugach, M. Eschrig, and S. L. Lee, *Phys. Rev. B*. 91(6), 060501 (2015).
  4. Хотелось бы видеть более тщательный анализ литературы по сверхпроводящей спинтронике, и, в частности, сверхпроводящим спиновым вентилям. Ряд работ не был упомянут в обзоре, среди них хотелось бы отметить следующие: M. Eschrig, Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress, *Progress in Physics* 78, N10, 104501 (2015); Robinson, J. W. A. & Linder, J. Superconducting Spintronics. *Nature Phys.* 11, 307 (2015); M. G. Blamire and J. W. A. Robinson, The interface between superconductivity and magnetism: understanding and device prospects, *J. Phys.: Condens. Matter* 26, 453201 (2014); C. T. Wu, O. T. Valls, and K. Halterman, Proximity effects and triplet correlations in Ferromagnet/Ferromagnet/Superconductor nanostructures, *Phys. Rev. B* 86, 014523 (2012).

Сделанные замечания относятся, в основном, к теоретической интерпретации, и не уменьшают ценности полученных в диссертационной работе экспериментальных результатов. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование. Все основные результаты, полученные в диссертации, своевременно опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и доложены на международных и российских конференциях. Полученные в диссертационном исследовании результаты могут быть использованы в лабораториях, занимающихся исследованием свойств слоистых гетероструктур ферромагнетик/сверхпроводник. Ценной является также большая работа по поиску оптимальной технологии приготовления, подбору материалов и параметров исследуемых структур, что может существенно помочь в дальнейших экспериментах по изучению и стабилизации работы спинового переключателя.

Автореферат полностью отражает структуру и содержание диссертации.

По своему содержанию и полученным научным и практическим результатам диссертационная работа Андрея Андреевича Камашева удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

1 ноября 2016 г.

С.н.с. отдела Микроэлектроники  
Научно-Исследовательского Института  
Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского Государственного Университета  
Имени М. В. Ломоносова,  
кандидат физ-мат. наук

Н.Г. Пугач

Подпись официального оппонента заверяю

Директор Научно-Исследовательского Института  
Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского Государственного Университета  
Имени М. В. Ломоносова  
Профессор

ич Панасюк

ября 2016 г.

