

УТВЕРЖДАЮ

Директор Ярославского филиала  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Физико-технологического  
института им. К.А. Валиева  
Российской академии наук  
(ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)

Доктор физико-математических наук,

А.С. Рудый

2019 г.

ИЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Чернышовой Татьяны Александровны **«Магнитные и магниторезистивные свойства спиновых клапанов с синтетическим ферритмагнетиком и микрообъектов на их основе»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

#### **Актуальность темы диссертации**

Магнитные металлические спиновые клапаны - искусственные синтезируемые наноматериалы, обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления. Среди многослойных магниточувствительных материалов, в которых реализуется спин-зависимое рассеяние электронов проводимости, спиновые клапаны выделяются уникальным набором характеристик, удобным для практических приложений. Включение синтетического ферритмагнетика в состав спинового клапана позволяет увеличить по сравнению с обычными спиновыми клапанами поле обменного сдвига, расширить диапазон рабочих температур, повысить магниторезистивную чувствительность. Интересной возможностью, расширяющей область практического применения спиновых клапанов, является введение в его состав слоя редкоземельного металла.

Понимание физических свойств спиновых клапанов важно для создания на их основе перспективных магниточувствительных элементов. Для использования спиновых

клапанов в аналоговых измерительных устройствах необходимо получить сочетание однозначной (безгистерезисной) зависимости их сопротивления от магнитного поля и высокой чувствительности. Важную роль в процессе оптимизации характеристик играют особенности наведенной магнитной анизотропии, сформированной в различных ферромагнитных слоях спиновых клапанов. В связи с этим тема диссертационной работы Т.А. Чернышовой, которая посвящена изучению влияния анизотропии на свойства спиновых клапанов с различными синтетическими ферримагнетиками, несомненно, является актуальной.

В качестве значимых достоинств данной работы необходимо отметить большой объем экспериментальных исследований выполненных в ходе ее выполнения. При этом для получения и исследования образцов использовано высококлассное современное оборудование и исчерпывающий набор стендов и экспериментальных установок для их анализа.

### **Структура и основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав – три из них являются оригинальными, заключения, списка используемой литературы.

Во введении сформулирована актуальность работы, цели и конкретные задачи исследований. Первая глава представляет собой литературный обзор. В ней освещено современное состояние дел в исследуемой области, описаны основные экспериментальные методы и подходы, используемые при изучении свойств обычных спиновых клапанов и спиновых клапанов с различными синтетическими ферримагнетиками и антиферромагнетиками. Вторая глава посвящена описанию использованных в работе магнетронной технологий приготовления многослойных наноструктур, методов исследования их свойств. В третьей главе представлены результаты исследования магнитных, магниторезистивных, структурных свойств спиновых клапанов с композитным слоем Gd/CoFe. Основное внимание уделено изучению изменения магнитного состояния композитного свободного слоя вблизи температуры компенсации и связанным с этим изменением магнитотранспортных свойств. В четвертой главе приведены результаты исследований спиновых клапанов с синтетическими ферримагнетиками CoFe/Cu/CoFe и NiFe/Cu/NiFe. Основное внимание уделено разработке подходов для создания спиновых клапанов с безгистерезисным изменением магнитосопротивления в области слабых



магнитных полей с помощью термомагнитной обработки, позволяющей изменять взаимное расположение осей анизотропии в ферромагнитных слоях спинового клапана. В пятой главе разработанные для макроскопических образцов подходы оптимизации их функциональных характеристик применены для микрополосок и меандров, изготовленных из пленок спиновых клапанов литографическими методами. В заключении сделаны основные выводы по диссертации.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Среди полученных результатов, отражающих научную новизну диссертационной работы следует выделить следующие:

1. Для спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком Gd/CoFe установлено, что переключение между магнитными состояниями, характеризуемыми различным электросопротивлением, может происходить как при изменении напряженности магнитного поля, так и при изменении температуры вблизи температуры компенсации.
2. Показано, что управление спин-флоп состоянием в синтетическом антиферромагнетике CoFe/Ru/CoFe, входящем в состав спиновых клапанов, позволяет изменять взаимное расположение оси однонаправленной анизотропии в закрепленном слое по отношению к оси легкого намагничивания в свободном слое. Данный подход дает возможность формировать конфигурацию осей анизотропии, при которой реализуется безгистерезисная полевая зависимость магнитосопротивления вблизи поля  $H=0$ .
3. Установлено, что путем изменения толщины слоя Ru в обменно-связанной структуре NiFe/Ru/NiFe в составе свободного слоя спинового клапана возможно управлять сдвигом низкополевой петли гистерезиса относительно нулевого магнитного поля.

### **Достоверность результатов и обоснованность выводов**

Достоверность полученных и представленных автором результатов исследований подтверждается отработанными методиками изготовления образцов, поверенными приборами и оборудованием используемых экспериментальных установок, согласием полученных в работе результатов с литературными данными. Обоснованность выводов базируется на всестороннем изучении свойств синтезированных пленочных материалов с использованием взаимно дополняющих экспериментальных методов, включающих, в том числе, визуализацию их микроструктуры.

### **Полнота опубликованных работ**

Основные результаты и выводы диссертационной работы в полной мере отражены в научных изданиях и представлены на Российских и Международных конференциях и научных семинарах. По результатам диссертации опубликованы 9 работ в научных журналах (из них - 6 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов)

### **Практическая значимость полученных результатов**

Полученные результаты, несомненно, имеют непосредственное отношение к вопросам разработки современных магниточувствительных наноматериалов на основе многослойных наноструктур с эффектом гигантского магнитосопротивления, к которым относятся исследованные спиновые клапаны. В работе предложен способ управления практически значимыми характеристиками наноструктур с помощью специальной термомагнитной обработки, а также продемонстрированы разработанные варианты спиновых клапанов, обладающие сочетанием функциональных характеристик, представляющим интерес для разработки на их основе высокочувствительных магнитных сенсоров и других устройств магнитоэлектроники.

### **Замечания по диссертационной работе**

К диссертации есть ряд замечаний:

1. В тексте литературного обзора одинаково часто встречаются термины синтетический ферромагнетик(СФ) и синтетический антиферромагнетик(САФ) при описании одной и той же структуры. Это усложняет восприятие текста, так как нет четкого описания различий этих терминов.

2. В описании методики эксперимента не приводятся данные по воспроизводимости свойств образцов напыленных в одних и тех же условиях, но в разное время. Кроме того, желательным был бы анализ разброса параметров пленочных структур по площади пластины.

3. В тексте встречаются мелкие опечатки и ошибки, например, рис.26 стр.41, формула 17 стр. 61.

Однако, сделанные замечания не затрагивают основного содержания диссертационной работы и не убавляют ее общей положительной оценки.



### Заключение (выводы о работе)

Диссертационная работа Т.А. Чернышовой является законченным, актуальным и важным научным исследованием. Ее содержание изложено хорошим языком, достаточно последовательно и четко, автор корректно ссылается на результаты, полученные другими исследователями. Содержание автореферата хорошо отражает основные результаты работы. Тема диссертации полностью соответствует заявленной специальности. Работа отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чернышова Т.А., несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Трушин Олег Станиславович,  
кандидат физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
заведующий лабораторией исследования процессов  
формирования многослойных структур  
Ярославского филиала ФГБУН Физико-  
технологического института  
им. К.А. Валиева Российской академии наук  
(ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)  
150007, г. Ярославль, ул. Университетская, 21  
Тел.: (4852) 24-65-52  
E-mail: [otrushin@gmail.com](mailto:otrushin@gmail.com)  
“ 14 ” февраля 2019 г.



О.С. Трушин

Подпись  
удостоверяю.

*Трушина О.С.*

Руководитель отдела кадров

ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

Т.Ю. Руженцова



*Согласен  
/Чернышова Т.А./  
18.02.2019г*

### Сведения об официальном оппоненте

**ФИО:** Трушин Олег Станиславович,

**Ученая степень:** кандидат физ.-мат. наук., специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**Полное наименование организации:** Ярославский филиал ФГБУН Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук

**Занимаемая должность:** ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией исследования процессов формирования многослойных структур

**Почтовый адрес:** 150007, г. Ярославль, ул. Университетская, 21

**Тел.ефон:** (4852) 24-65-52

**E-mail:** [otrushin@gmail.com](mailto:otrushin@gmail.com)

### Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. О.С. Трушин, В. В. Наумов, Н. И. Барабанова, В. Ф. Бочкарев «Влияние технологических факторов на микромагнитные состояния магнитных наноструктур» // Известия РАН. сер. Физическая. 2014, т.78, № 1, с.32-35
2. O.S. Trushin, Mazaletskiy L.A., Rudy A.S., Naumov V.V., Mironenko A.A., Vasilev S V. «Problems of the experimental implementation of MTJ» // Journal of Physics: Conference Series, 2015, v. 643 p. 012105
3. О.С. Трушин, Н.И. Барабанова «Особенности энергетического рельефа прямоугольного магнитного nanoострова», // Микроэлектроника, 2017, т.46, № 5, с.332-339.
4. О.С. Трушин, С.Г. Симакин, С.В. Васильев, Е.А. Смирнов «Контроль качества многослойной спин-туннельной структуры с использованием комбинации методов анализа». // Микроэлектроника, 2018, т.47, № 6, с.18-22.

Ученый секретарь

Ученого совета

ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

кандидат физ.-мат. наук

В.В. Наумов

ПОДПИСЬ

*Наумова В.В.*

ДЕЛА КАДРОВ

К.А. ВАЛИЕВА РАН

Т.Ю. РУЖЕНЦОВА