

Отзыв 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

Синтезу и исследованиям многослойных магнитных наноматериалов уделяется в настоящее время значительное внимание. Это обусловлено возможностью изменения в широких пределах их физических свойств, а также перспективами применения таких магниточувствительных материалов в различных устройствах магнитоэлектроники. Металлические спиновые клапаны являются одним из активно исследуемых типов наноструктур, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления. Их отличительной особенностью является резкое изменение электросопротивления в слабых магнитных полях. Функциональные характеристики спиновых клапанов определяются не только композицией многослойных структур и типами использованных в них материалов, но в значительной степени определяются также особенностями наведенной магнитной анизотропии, формируемой в процессе напыления наноструктуры в магнитном поле, либо с помощью термомагнитной обработки. Диссертационная работа Т.А. Чернышовой посвящена исследованию разновидности спиновых клапанов, наиболее часто используемой в практических приложениях, а именно, спиновых клапанов с синтетическими ферритмагнетиками. В работе исследованы как образцы макроскопических размеров, так и микрообъекты в форме полос и меандров, которые являются типичными элементами магнитных сенсоров. Рассмотренные в диссертации вопросы, касающиеся исследований структурных, магнитных и магнитотранспортных свойств спиновых клапанов различных композиций, разработки методов изменения анизотропии и целенаправленного получения функциональных характеристик, представляющих интерес для практических приложений, несомненно, **являются актуальными.**

Структура и основное содержание работы

Диссертация Чернышовой Т.А. состоит из введения, пяти глав и заключения.

Первая глава посвящена обзору, в основном, экспериментальных исследований свойств многослойных наноструктур с гигантским магниторезистивным эффектом, в том числе спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком и синтетическим антиферромагнетиком.

Вторая глава диссертации содержит описание установки магнетронного напыления многослойных наноструктур и технологических операций, используемых для подготовки экспериментальных образцов, описаны литографические процессы формирования микрообъектов. Также приведено описание измерительных установок, предназначенных для исследования магнитных и магнитотранспортных свойств пленочных образцов. Важной особенностью указанных установок является возможность изучения анизотропии в плоскости пленок, а также возможность проведения термомагнитной обработки образцов спиновых клапанов непосредственно в измерительной установке при произвольном направлении магнитного поля в плоскости образца. Данная функция используемого оборудования дает возможность в едином цикле изменять свойства спиновых клапанов и проводить исследования их магнитотранспортных свойств при различных температурах.

Третья глава посвящена исследованию транспортных свойств спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком, состоящим из обменно-связанной пары слоев CoFe/Gd. Ввиду того, что магнитный момент слоя Gd противоположен по направлению магнитному моменту слоя CoFe и сильно изменяется от температуры, результирующий магнитный момент пары слоев при понижении температуры изменяется как по величине, так и по направлению. В спиновых клапанах с составным свободным слоем CoFe/Gd в области температуры компенсации наблюдаются аномалии на полевых и температурных зависимостях сопротивления. Изучению указанных особенностей в зависимости от толщины слоя Gd, а также исследованию микроструктуры слоя Gd в главе уделено основное внимание.

В четвертой главе представлены результаты исследования спиновых клапанов с синтетическим антиферримагнетиком CoFe/Ru/CoFe и синтетическим ферримагнетиком NiFe/Ru/NiFe в свободном слое. Значительное внимание уделено вопросам уменьшения низкополевого гистерезиса магнитосопротивления в зависимости от режимов

термомагнитной обработки и от направления осей анизотропии в ферромагнитных слоях. Уделено внимание вопросам повышения магниторезистивной чувствительности и получения симметричной относительно нулевого поля полевой зависимости магнитосопротивления спинового клапана.

В пятой главе на основе результатов и подходов, описанных в четвертой главе для макроскопических полосок спиновых клапанов, рассмотрены вопросы оптимизации функциональных характеристик микрообъектов (полосок и меандров), изготовленных литографическими методами. Отмечено, что оптимальное взаимное расположение осей анизотропии, при котором наблюдается минимальный гистерезис на кривой магнитосопротивления в малых полях для случая микрообъектов сложной формы (меандров), значительно отличается от такового для случая полосок макроскопических размеров. Приведены варианты изготовленных из спиновых клапанов сенсорных микрообъектов с оптимизированными функциональными характеристиками.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Показано, что при использовании в спиновых клапанах свободного слоя в виде синтетического ферримагнетика CoFe/Gd вблизи температуры компенсации наблюдается переключение между магнитными состояниями с различным электросопротивлением, что, в частности, проявляется в изменении обычной П-образной формы полевой зависимости магнитосопротивления, на инвертированную. Необычным для спиновых клапанов также является возможность перемагничивания свободного слоя за счет изменения температуры при фиксированном значении напряженности магнитного поля.
2. Установлено, что управление спин-флоп состоянием в синтетическом антиферромагнетике CoFe/Ru/CoFe , входящем в состав спиновых клапанов, позволяет изменять в широких пределах направление оси однонаправленной анизотропии с помощью специально разработанной термомагнитной обработки. Данный подход дает возможность целенаправленно изменять функциональные характеристики спиновых клапанов различных композиций.
3. Показано, что включение обменно-связанной структуры NiFe/Ru/NiFe в состав свободного слоя спинового клапана и изменение в ней магнитного порядка с антиферромагнитного на ферромагнитный за счет изменения толщины слоя Ru приводит к

уменьшению поля сдвига низкополевой петли гистерезиса.

4. При изучении магниторезистивных свойств спиновых клапанов в виде меандров различной формы установлены варианты микрообъектов и режим термомагнитной обработки, при которых в них реализуется практически безгистерезисный режим перемагничивания свободного слоя.

Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывает сомнений. В работе использовано современное технологическое и аналитическое оборудование, стандартные и разработанные методики измерений, апробированные на большом количестве образцов. Выводы базируются на основе многочисленных экспериментальных данных, полученных с использованием взаимно дополняющих методов. Представленные в работе результаты и выводы не противоречат опубликованным результатам других исследователей.

Практическая значимость полученных результатов

Предложены методы управления наведенной анизотропией, температурной и магниторезистивной чувствительностью, сдвигом и шириной низкополевой петли гистерезиса спиновых клапанов различных композиций. Разработаны режимы термомагнитной обработки, необходимые для получения практически безгистерезисного изменения магнитосопротивления, и приготовлены варианты спиновых клапанов, сочетающих малый гистерезис с большой величиной магнитосопротивления и высокой чувствительностью в слабых магнитных полях ($-10 \div 10$ Э). Полученные варианты спиновых клапанов с оптимизированными характеристиками могут быть использованы для изготовления высокочувствительных магнитных сенсоров.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

- 1 В работе приведено, что для напыления наноструктур использовались, в том числе пластины монокристаллического кремния ориентации (100), покрытого слоем SiO_2 (стр. 71), причем напыление проводили в магнитном поле 80 Э, приложенном в плоскости пленки (стр. 71).

Вопросы: Измерялось ли толщина оксида? Влияет ли толщина оксида на условия роста всех структур? Влияет ли разные соотношения разных направлений внешнего поля и кристаллографии подложки Si?

2 На странице 28 написано «Для спиновых клапанов применяют также другой метод закрепления ферромагнитного слоя - с помощью искусственной антиферромагнитной структуры или синтетического антиферромагнетика [61, 62]. САФ представляет собой трехслойную структуру с сильной антиферромагнитной обменной связью (рисунок 16), например, Co/Ru/Co».

Вопрос: Где на рисунке 16 (стр. 29) закрепленный слой? Так как из текста понятно, что САФ должен находиться в прямом контакте с антиферромагнетиком.

3 Некоторые толщины рутения составляли 8 ангстрем (стр. 103).

Вопрос к сплошности пленок Ru? Наличие перемычек через рутений, чем и как устанавливали?

4 В работе для формирования неколлинеарной или скрещенной конфигурации осей ООА и ОЛН была применена термомагнитная обработка.

Вопрос: Проводились ли дополнительные структурные исследования после ТМО? Так как некоторые слои Ru в структурах были толщиной менее 1 нм и могли быть активированы механизмы взаимодиффузии.

5 Работа написана, в целом, хорошим ясным языком, содержит минимальное количество опечаток, тем не менее, имеются некоторые погрешности стилистического характера по ошибки, обозначения и жаргонная терминология.

Так, например, достаточно часто применяется жаргонное словосочетание немагнитный слой (см., например, стр. 14, 18, 19). Хотя тот же хром ниже температуры 38 °С является антиферромагнетиком, а выше переходит в парамагнитное состояние, и медь – диамагнетик. В работе достаточно вольно использование размерности одного и того же физического параметра, а именно толщины слоев, как в нанометрах, так и в ангстремах, что усложняет понимание текста. В подписи к рисунку 8 (стр. 19) неправильной буквой определена толщина немагнитного слоя. На странице 115 приведены значения ширины исследуемых полосок $w = 4, 8, 16, 20, 60$ и 80 мкм, а на рисунках 85 и 86 (стр. 117) приведены совершенно другие значения ($w = 4, 8, 12, 16, 40$ и 80 мкм.). На странице 71 написано слово «эсовпадало».

Указанные замечания носят преимущественно характер уточнений и не снижают положительного впечатления от диссертации.

Заключение (выводы о работе)

В целом диссертация Т.А. Чернышовой производит хорошее впечатление и представляет собой законченную научную работу, результаты которой представляют интерес для физики магнитных явлений и физики магнитных наноструктур. По теме диссертационной опубликовано 9 статей в ведущих российских и зарубежных журналах, 6 из которых входят в Перечень ВАК и индексируются в системе Web of Science. Диссертация соответствует всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чернышова Т.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Варнаков Сергей Николаевич

доктор физико-математических наук, доцент, специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Заместитель директора по научной работе, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38

Телефон: (391) 249-42-94

E-mail: vsn@iph.krasn.ru

«04» марта 2019 г.

С.Н. Варнаков

Подпись заместителя директора по научной работе Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН д.ф.-м.н., доцента, Варнакова Сергея Николаевича заверяю

Ученый секретарь ИФ СО РАН

кандидат физ.-мат. наук

А.О. Злотников



С отзовом ознакомлена
11.03.19 Т.А. Чернышова

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Варнаков Сергей Николаевич

Ученая степень, звание: доктор физ.-мат. наук, доцент, специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Полное наименование организации: Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Занимаемая должность: заместитель директора по научной работе

Почтовый адрес: 660036, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38

Телефон: (391) 249-42-94

E-mail: vsn@iph.krasn.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация:

- 1 Komogortsev S.V. Magnetic anisotropy in Fe films deposited on SiO₂/Si(001) and Si(001) substrates / S.V. Komogortsev, S.N. Varnakov, S.A. Satsuk, I.A. Yakovlev, S.G. Ovchinnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – V. – P. 104-108 (DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.09.058) (Impact Factor 3.046, Q1)
- 2 Badia -Romano L. Thermomagnetic behavior and compositional irreversibility on (Fe/Si)₃ multilayer films / L Badia -Romano, J Rubin, C Magen, F Bartolome, J Sese, M R Ibarra, J Bartolome, A Hierro-Rodriguez, J I Martin, J M Alameda, D E Burgler, S N Varnakov, S V Komogortsev, S G Ovchinnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – V.364. – P. 24-33 (DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.04.029) (Impact Factor 3.046, Q1)
- 3 Badía-Romano L., Morphology of the asymmetric iron-silicon interfaces / L. Badía-Romano, J. Rubín, F. Bartolomé, C. Magén, J. Bartolomé, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov, J. Rubio-Zuazo, G.R. Castro // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 627. – P.136–145. (doi:10.1016/j.jallcom.2014.12.019) (Impact Factor 3.779, Q1)
- 4 Volkov N.V. Bias-voltage-controlled ac and dc magnetotransport phenomena in hybrid structures / N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 383. – P.69–72. (DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.014) (Impact Factor 3.046, Q1)
- 5 Sandalov I. Effect of electron correlations on the Fe₃Si and $\bar{1}$ – FeSi₂ band structure and optical properties / Igor Sandalov, Natalia Zamkova, Vyacheslav Zhandun, Ivan Tarasov, Sergey Varnakov, Ivan Yakovlev, Leonid Solovyev, and Sergey Ovchinnikov // Phys. Rev. B 92, 205129 (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.205129) (Impact Factor 3.813, Q1)

6 Bartolome J. Magnetic properties, morphology and interfaces of (Fe/Si)_n nanostructures / Bartolome J., L.Badía-Romano, J.Rubín, F.Bartolomé, S.N.Varnakov, S.G. Ovchinnikov, D.E.Bürgler // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 400. – P.271–275. (DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.046) (Impact Factor 3.046, Q1)

7 Tarasov I.A. Si/Fe flux ratio influence on growth and physical properties of polycrystalline β -FeSi₂ thin films on Si(100) surface / I.A. Tarasov, M.A. Visotin, A.S. Aleksandrovsky, N.N. Kosyrev, I.A. Yakovlev, M.S. Molokeevev, A.V. Lukyanenko, A.S. Krylov, A.S. Fedorov, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 440. – P.144–152. (DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.084) (Impact Factor 3.046, Q1)

8 Volkov N.V. Magnetic field-driven lateral photovoltaic effect in the Fe/SiO₂/p-Si hybrid structure with the Schottky barrier / N.V. Volkov, M.V. Rautskii, A.S. Tarasov, I.A. Yakovlev, I.A. Bondarev, A.V. Lukyanenko, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2018. – №101. – C.201-207. (DOI: 10.1016/j.physe.2018.03.027) (Impact Factor 2.399)

9 Volkov N.V. Magneto-transport phenomena in metal/SiO₂/n(p)-Si hybrid structures / N.V. Volkov, A.S. Tarasov, M.V. Rautskii, A.V. Lukyanenko, I.A. Bondarev, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Vol. 451. – P. 143-158. (DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.11.008) (Impact Factor 3.046, Q1)

10 Tarasov I.A. Selective synthesis of higher manganese silicides: a new Mn₁₇Si₃₀ phase, its electronic, transport, and optical properties in comparison with Mn₄Si₇ / I.A. Tarasov, M.A. Visotin, T.V. Kuznetzova, A.S. Aleksandrovsky, L.A. Solovyov, A.A. Kuzubov, K.M. Nikolaeva, A.S. Fedorov, A.S. Tarasov, F.N. Tomilin, M.N. Volochaev, I.A. Yakovlev, T.E. Smolyarova, A.A. Ivanenko, V.I. Pryahina, A.A. Esin, Y.M. Yarmoshenko, V.Ya Shur, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Journal of materials science. – 2018. – Vol. 53. – Iss. 10. – P. 7571-7594. (DOI: 10.1007/s10853-018-2105-y) (Impact Factor 2.993, Q1)

не является членом экспертного совета ВАК.

Ученый секретарь ИФ СО РАН

кандидат физ.-мат. наук

«04» марта 2019 г.

А.О. Злотников

