Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Варнакова Сергея Николаевича «Закономерности формирования фаз и свойства магнитных силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Варнакова С.Н. посвящена экспериментальному исследованию особенностей формирования различных фаз в однослойных и многослойных тонкопленочных системах переходной металл/кремний, разработке методов создания и контроля параметров таких пленок и исследованию их физических свойств. Тема работы актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Тонкие магнитные пленки являются основой современной микроэлектроники, спинтроники, оптоэлектроники, сверхплотной магнитной записи, магнитных сенсоров и др. Управление свойствами пленок является ключевым фактором развития технологии, причем, очевидно, что искусственно создаваемые многослойные структуры обладают практически неисчерпаемыми перспективами в силу возможности комбинирования различными магнитными и немагнитными материалами, структурным состоянием, состоянием интерфейсов. При этом многослойные системы с чередованием магнитных металлов и полупроводников особенно привлекательны, так как они могут обладать совокупностью достоинств как магнитных материалов, так и полупроводников, а также принципиально новыми свойствами, перспективными для применений. Однако, многие вопросы физики систем металл/полупроводник остаются неясными, и актуальная задача получения многослойных структур этого типа с хорошо контролируемыми и воспроизводимыми свойствами, далека от решения. Очевидно, что решение этой задачи невозможно без детального исследования закономерностей формирования различных фаз в процессе роста планарных структур, что требует применения комплексного подхода с использованием самых современных прецизионных методик. Из вышесказанного следует, что тема диссертации Варнакова С.Н. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 307 страниц, в том числе 122 рисунка и 15 таблиц.

Первая глава носит обзорный характер. Во второй главе приводится описание использованных экспериментальных методик. Третья глава посвящена детальному изложению модернизированного автором технологического комплекса молекулярно-лучевой эпитаксии и развитым оригинальным методикам контроля синтеза пленок Fe-Si и Mn-Si. В четвертой главе приводятся результаты исследования однослойных и многослойных пленок Fe-Si, а в пятой – магнитных силицидов Fe_3Si и Fe_5Si_3. Шестая глава содержит описание результатов исследования начальных стадий роста Mn на поверхности Si(100) 2x1 и диода Шоттки $Mn/SiO_2/p$-Si.

Прежде всего, следует подчеркнуть, что во многом новизну и значимость работы определяет то, что все исследуемые образцы оригинальны, получены лично Варнаковым С.Н., причем на им модернизированном современном технологическом оборудовании с прецизионным контролем параметров in situ. Второй важной отличительной особенностью является использование комплекса разнообразных современных экспериментальных методик, простое перечисление которых заняло бы более полстраницы. Третьим достоинством работы является детальный анализ всех без исключения экспериментальных данных,

ФИЦ КНЦ СО РАН Обособленное подразделение
Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФ СО РАН)
«19» февраля 2018 г.
Вход. № 356-03/6215-09

с обсуждением разных моделей и концепций, с привлечением математической обработки и теоретических расчетов из первых принципов. Все это и обусловливает новизну диссертационной работы Варнакова С.Н.

В отзыве невозможно перечислить все многочисленные новые результаты, полученные в диссертации, поэтому приведу только несколько из них, имеющих, по моему мнению, наибольший интерес и значение:

1. Путем сравнения магнитной анизотропии пленок Fe на подложках SiO_2/Si(001) и на атомарно чистых поверхностях кремния сделан важный вывод о механизмах формирования магнитной анизотропии при наклонном напылении. В первом случае магнитная анизотропия одноосна и формируется за счет шероховатостей, которые возникают на поверхности SiO_2 за счет наклонного напыления Fe и малой скорости синтеза (десятые доли нанометров в минуту). Во втором случае магнитная анизотропия двухосна, что является следствием и индикатором эпитаксиального роста, но она несколько меньше чем у объемного Fe, так как атомы кремния из подложки диффундируют в слой железа.
2. Найдено, что формирование плёнок Fe на подложке Si(100) происходит согласно механизму роста Вольмера-Вебера с характерными высотами островков 5–9 нм, а процессы взаимодиффузии Fe и Si при твердофазном синтезе происходят медленнее, чем при реактивной эпитаксии
3. Намагниченность в тонких слоях Fe/Si, сильно зависит от толщины слоя железа в силу образования силицидов на интерфейсах. Причем имеет место асимметрия в образованных силицидах в зависимости от того напыляются слои – железо на кремний или наоборот кремний на железо. Согласно данным по XMCD толщина парамагнитного силицида в интерфейсе Si-на-Fe составила 0.23 нм, а толщина ферромагнитного твёрдого раствора – 1.17 нм. На интерфейсе же Fe-на-Si толщина парамагнитного силицида составила 0.15 нм, а толщина ферромагнитного слоя – 0.55 нм. Наличие подобного рода асимметрии подтверждено и изящным экспериментом с использованием мессбауэровской спектроскопии.
4. Отработана технология формирования магнитных плёнок силицидов железа Fe_3Si и Fe_5Si_3, исследованы их структурные и магнитные свойства, выполнено измерение их оптических и магнитооптических свойств и сравнение полученных спектров с теоретически рассчитанными из первых принципов. Надо сказать, что, по сути, эта материаловедческая часть работы открыла новые магнитные материалы с достаточно интересными и практически важными свойствами. Так, узкая ширина линии ФМР в Fe_3Si позволяет надеяться на применение этого материала в магнонике.
5. Исследован процесс роста пленок Mn на поверхности Si. Этот важный вопрос связан как с поиском магнитных полупроводников с высокой температурой Кюри в системе Si-Mn, так и с образованием скирмионов в эквиатомном соединении, так и с множеством магнитных фаз силицидов и марганца. Методом фотоэлектронной спектроскопии высокого энергетического разрешения с использованием синхротронного излучения показано, что на начальных стадиях роста плёнок марганца на поверхности Si(100) сначала образуется силицид MnSi, затем плёнка твёрдого раствора кремния в марганце, а формирование металлической плёнки марганца начинается после нанесения ~ 0.9 нм Mn.
6. Получено, что транспортные свойства диода Шоттки на основе Mn/SiO_2/p-Si как в режиме постоянного тока, так и в режиме переменного тока имеют сильную зависимость от внешнего магнитного поля. Магнитосопротивление может достигать 6 порядков величины.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методик, большим представленным в работе фактическим материалом, тщательным анализом полученных данных и их сопоставлением с результатами независимых исследований.

По сути сделанных в работе выводов замечаний у рецензента нет. Однако, работа не свободна от недостатков:

1. При анализе магнитных свойств многослойных структур Fe/Si и магнитного состояния отдельных слоев Fe в мультислоях возможность межслойного обмена ферромагнитного или антиферромагнитного типа через содержащие силициды полупроводниковую прослойку, не принимается во внимание. О возможности, и даже наличии в образцах, антиферромагнитного обмена упоминается только на стр.127. Хотя, строго говоря, вопрос о природе такого обмена выходит за рамки данной диссертации, обсудить его при наличии тонких слоев Si было бы целесообразно.
2. На стр. 102 делается оценка величины константы кристаллической анизотропии эпитаксиальных пленок Fe на поверхности пленок Si. При этом предполагается, что константа наведенной одноосной анизотропии такая же как у пленок $Fe/SiO_2/Si$. Но в первом случае происходит проникновение атомов кремния в слой железо, а во втором нет. Это может повлиять на приведенную оценку.
3. Значения температур Кюри при малых толщинах пленок железа на подложках Si(100) и Si(111) отличаются (Рис.4.17), тогда как температур T_s и T_f нет. Возможно, это связано с приближенным характером определения температуры Кюри по поведению намагниченности в спин-волновой области (стр. 132)
4. Обнаруженные неожиданно гигантские изменения сопротивления и импеданса в магнитном поле диодов Шоттки $Mn/SiO_2/p\text{-}Si$ связываются с влиянием магнитного поля на процессы ударной ионизации. Это выявлено в ходе экспериментов. Но микроскопический механизм этого интересного явления остается неясным, так как поле невелико (всего сотни эрстед). Безусловно, экспериментатор в праве ограничиться изложением полученных фактов и предложить только гипотезу, но все-таки хотелось бы видеть и обсуждение этой гипотезы.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и ни в коей мере не затрагивают основного содержания диссертационной работы, а носят скорее пожеланий.

Полученные в работе результаты имеют большое научное значение для физики конденсированного состояния и физики магнитных явлений, а также практическое значение для различных областей микроэлектроники, особенно связанных с созданием элементной базы. Можно сказать, что данная работа является ярким примером технологического и методического прорыва в области синтеза и исследования тонкопленочных структур. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых тонкопленочных материалов, так и ведущих исследования в области материаловедения, магнитной памяти, магнитных сенсоров, тонкопленочных элементов и др., как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургский, Уральский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург),

РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г.Красноярск), Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН (Москва) и др.

Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора в престижных научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что диссертация Варнакова С.Н. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание структурных особенностей в планарных структурах переходной металл/кремний. Диссертационная работа Варнакова С.Н. является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное достижение в области физики конденсированного состояния.

В целом диссертационная работа «Закономерности формирования фаз и свойства магнитных силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний», соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявленной специальности и требованиям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней" в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335), а её автор, Варнаков С.Н. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: Грановский Александр Борисович
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений
профессор,
Физический Факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор кафедры магнетизма,
Адрес: 119991, Москва, Ленинские Горы, дом 1, стр.2
Тел. 8 495 939 47 87; Факс 8 495 939 47 87; E-mail: granov@magn.ru

« 7 » февраля 2018 г.

Грановский Александр Борисович

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н., проф. Грановского А.Б. заверяю

Декан
физического факультета МГУ им. М.В.
профессор Сысоев Н.Н.

Сведения об официальном оппоненте

Грановский Александр Борисович, профессор, доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.11 – «физика магнитных явлений», профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова Дом 1, строение 2, Физический Факультет; тел.: +7 (495) 939-47-87, E-mail:granov@magn.ru

Грановский А.Б. является специалистом в области физики конденсированного состояния вещества, физики магнитных явлений, физики полупроводников, и имеет следующие публикации в сфере физики конденсированного состояния вещества :

1. A. Semisalova, A. Orlov, A. Smekhova, E. Gan'shina,N. Perov, W. Anwand, K. Potzger, E. Lahderanta, A. Granovsky, Above room temperature magnetism in dilute magnetic oxide semiconductors, in Novel Functional Magnetic Materials, Springer Series in Materials Science, Ed. A. Zhukov, 2016, pp. 187-220.
2. К. Ю. Черноглазов, С. Н. Николаев, В. В. Рыльков, А. С. Семисалова, А. В. Зенкевич, В. В. Тугушев, А. Л. Васильев, Ю. М. Чесноков, Э. М. Пашаев, Ю. А. Матвеев, А. Б. Грановский, О. А. Новодворский, А. С. Веденеев, А. С. Бугаев, А. Драченко, Ш. Жоу, Аномальный эффект Холла в поликристаллических пленках $Si_{1-x}Mn_x$ с ($x \approx 0.5$) самоорганизованным распределением кристаллитов по форме и размерам, Письма ЖЭТФ 103 (7) 539-548 (2016).
3. A. Semisalova, Y.Mikhailovskiy, A. Smekhova, A. Orlov, N. Perov, E. Gan'shina, A. Lashkul, E. Lahderanta, K. Potzger, O. Yildirim, B. Aronzon, A.Granovsky, Above Room Temperature Ferromagnetism in Co- and V-Doped TiO_2 – Revealing the Different Contributions of Defects and Impurities, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 28 (3), 805-811 (2015).
4. V.V. Rylkov, A.S. Bugaev, O.A. Novodvorskii, V.V. Tugushev, E.T.Kulatov, A.V. Zenkevich, A.S. Semisalova, S.N. Nikolaev, A.S. Vedeneev, A.V. Shorokhova, D.V. Aver'yanov, K.Yu. Chernoglazov, E.A. Gan'shina, A.B. Granovsky,Y. Wang , V.Ya. Panchenko, S. Zhou, High-temperature ferromagnetism of nonstoichiometric $Si_{1-x}Mn_x$ ($x \approx 0.5$) alloys, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 383, 39–43 (2015).
5. O. Yildirim, S. Cornelius, A. Smekhova, G. Zhukov, E.A. Gan`shina, A.B. Granovsky, R. Huebner, C. Baehtz, and K. Potzger, The local environment of cobalt in amorphous, polycrystalline and epitaxial anatase TiO2:Co films produced by cobalt ion implantation, Journal of Applied Physics 117, 183901-6 (2015).

6. V.V. Rylkov, S.N. Nikolaev, K.Yu. Chernoglazov ,V.A. Demin, A.V. Sitnikov, M.Yu. Presnyakov, A.L. Vasiliev, N.S. Perov, A.S. Vedeneev, Yu.E. Kalinin, V.V. Tugushev, A.B. Granovsky, Tunneling anomalous Hall effect in the nanogranular CoFe-B-Al--O films near the metal-insulator transition, Phys. Rev. B 95, 144202-144202 (2017).
7. Sudip Pandey (corr-auth) , Abdiel Quetz , Anil Aryal , Igor S. Dubenko , Mikhail Blinov, Igor Rodionov , Valerii Prudnikov , Dipanjan Mazumdar , Alexander B. Granovsky , Shane Stadler , Naushad Ali Giant field-induced adiabatic temperature changes in In-based off-stoichiometric Heusler alloys, Journal of Applied Physics **121**, 133901 (2017).
8. А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, Д.В. Колмаков, В.В. Рыльков, А.В. Ситников, С.А. Вызулин, Е. Ганьшина, А.Н. Талденков Динамическая магнитная проницаемость гетерогенных наносистем на основе композитов $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$, ЖЭТФ, 152, вып. 2 (8), 363–371 (2017)

Не является членом экспертного совета ВАК.

Ученый секретарь физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Профессор [redacted] В. А. Караваев