

ОТЗЫВ

научного консультанта 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 С.Н. Варнакова «*Закономерности формирования фаз и свойства магнитных силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний*» выполнена в лаборатории физики магнитных явлений в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН).

Вручая в 2007 г. Нобелевскую премию по физике П. Грюнбергу и А. Ферту за открытие в 1988 г. эффекта гигантского магнитосопротивления в магнитных наноструктурах с немагнитными металлическими прослойками, Нобелевский комитет объявил, что «гигантское магнитосопротивление может рассматриваться как первое значительное применение нанотехнологий, столь популярных в настоящее время в различных областях». Развитие и применение гигантского магнитосопротивления дает также первый пример нового направления в электронных технологиях, получившего название «спинтроники», поскольку оно предполагает использование спина электрона наряду с его зарядом, для хранения и обработки информации. Первые применения этих материалов были основаны непосредственно на использовании эффекта гигантского магнитосопротивления для создания датчиков слабых магнитных полей. Дальнейшее развитие технологий гигантского магнитосопротивления привело к современному прорыву в росте компьютерной памяти, что позволяет в настоящее время хранить гигабиты музыкальной, фото-, видео- и другой информации в самых различных портативных устройствах.

Несмотря на очевидные успехи в данной области многие исследователи в настоящее время полагают, что применение магнитных наноструктур с полупроводниковыми прослойками наиболее актуально в настоящее время. Это связано, прежде всего, с возможностью интегрирования материалов спинтроники в хорошо развитые полупроводниковые технологии. В свою очередь, постоянный прогресс в течение нескольких последних десятилетий привел, как указано в технологической дорожной карте для полупроводников 2005 г. (The International Technology Roadmap for Semiconductors, www.itrs.net), к необходимости поиска новых идей и направлений. Одним из таких новых направлений дорожная карта указывает как раз спинтронику. Для реализации устройств спинтроники, интегрированных в полупроводниковую технологию, в первую очередь, представляют интерес магнитные наноструктуры с полупроводниковыми прослойками, особенно из кремния. Для эффективной работы устройств с переносом спин-поляризованного тока через полупроводниковую прослойку необходимо обеспечить большое время жизни T_s спин-поляризованных электронов в полупроводнике и эффективную инжекцию спин-поляризованных носителей из ферромагнитного металлического слоя в полупроводник. Первое условие нетрудно выполнить, учитывая малое спин-орбитальное взаимодействие в Si и преобладание в природном Si изотопа ^{28}Si с нулевым ядерным спином, для которого отсутствует сверхтонкое взаимодействие.

Второе условие реализовать оказалось гораздо сложнее. Во-первых, даже для идеальной границы раздела металл/полупроводник, большое различие электросопротивления слоев резко понижает величину спиновой инжекции. Во-вторых, на границе раздела, как правило, формируются металлосилициды, что также подавляет величину спиновой инжекции. Решение первой проблемы было предложено А. Фертом и заключается в создании

туннельного барьера между металлом и полупроводником. Вторую проблему можно решить, только совершенствуя технологию.

Получение планарных наноструктур систем Fe/Si и Mn/Si в сверхвысоком вакууме методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является на сегодня наиболее перспективным, так как позволяет контролировать кинетику процесса роста. Однако здесь нужно учитывать, что технологические аспекты могут кардинально влиять на структуру растущих плёнок, а вследствие этого и на физические свойства структур в целом. Поэтому проблема контролируемой *in situ* технологии и установление закономерностей формирования фаз силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний с остается важной и до конца не решённой проблемой физики конденсированного состояния. Вследствие этого установление закономерностей формирования фаз силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний, разработка эффективных методов создания пленок магнитных силицидов и исследование их физических свойств и возможностей их использования в устройствах спинтроники имеет не только практическое, но и фундаментальное значение. Решению в том числе и этих задач посвящена диссертация С.Н. Варнакова

При выполнении работы соискателем для исследования закономерностей формирования фаз и определения свойств магнитных силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний был использован достаточно большой инструментарий. Так *in situ* методы исследования включали: масс-спектрометрию; дифракцию отраженных быстрых электронов; оже-спектроскопию и спектроскопию характеристических энергий электронов; лазерную эллипсометрию и Керр-магнитометрию, а также достаточно широкий набор *ex situ* методов исследования, в том числе: рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию; спектральную эллипсометрию; СКВИД магнитометрию; магнитооптические методы исследования, технику исследования транспортных свойств; атомно-силовую микроскопию; сканирующую трансмиссионную электронную микроскопию; рентгеновскую рефлектометрию; рентгеновский магнитный круговой дихроизм; фотоэлектронную спектроскопию в жёстком рентгене с использованием синхротронного излучения и другие. Им проведена модернизация технологического оборудования и проведены экспериментальные работы по созданию большинства однослойных и многослойных наноструктур Fe-Si, в том числе и с изотопом ^{57}Fe , и Mn-Si. Изучены *in situ* структурные свойства полученных пленок методами дифракции отраженных быстрых электронов, оже-спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов, одноволновой эллипсометрии. Получены и исследованы отдельные ферромагнитные силициды Fe_3Si и Fe_5Si_3 . Установлены особенности технологических способов синтеза отдельных фаз силицидов переходных металлов в планарных наноструктурах металл/кремний. В частности, С.Н. Варнаковым были получены следующие основные результаты, включенные в диссертацию:

1. Проведена модернизация технологическо-аналитического комплекса на базе многомодульной установки «Ангара» позволяющая в едином технологическом цикле проводить синтез низкоразмерных структур и их *in situ* исследования методом спектральной магнитоэллипсометрии в температурном диапазоне 85–900 К.

2. Установлено, что плёнки Fe толщиной 10 нм, осаждённые в сверхвысоком вакууме на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ характеризуются одноосной магнитной анизотропией в плоскости образца, сформированной наклонным напылением и вызванная неоднородностями рельефа плёнки, возникающими в процессе напыления. Плёнка Fe, полученная напылением на атомарно-чистой поверхности $\text{Si}(001)2\times 1$, имеет две оси легкого намагничивания, указывающие на эпитаксиальный рост плёнки Fe на Si.

3. *In situ* методами исследования: дифракцией отражённых быстрых электронов, электронной оже-спектроскопией, спектроскопией характеристических потерь энергии электронами, одноволновой и спектральной эллипсометрией и магнитоэллипсометрией обнаружено, что формирование плёнок Fe на подложке Si(100) происходит согласно механизму роста Вольмера-Вебера с характерными высотами островков 5–9 нм. Выявлено,

что процессы взаимодиффузии в плёночных наноструктурах (Fe/Si) при твердофазном синтезе происходят медленнее, чем при реактивной эпитаксии.

4. В плёночных наноструктурах $(Fe/Si)_n$ со слоями толщиной в единицы нанометров установлена зависимость намагниченности и её температурного изменения от толщины индивидуального слоя Fe . Необратимые изменения намагниченности происходят при температурах выше 400 К являясь следствием образования парамагнитных силицидов железа на границах раздела $Fe-Si$. Анализ необратимого изменения намагниченности от времени и температуры в многослойных наноструктурах Fe/Si с различной толщиной слоёв Fe позволяет оценить энергию активации E_a реакции синтеза немагнитного силицида.

5. Определено пространственное распределение магнитных и парамагнитных фаз в интерфейсах Si -на- Fe и Fe -на- Si с помощью поверхностно-чувствительного метода рентгеновского магнитного кругового дихроизма вблизи $L_{3,2}$ -краёв поглощения Fe в наноструктурах $(Fe/Si)_n$.

6. В плёночных наноструктурах $(Fe/Si)_n$ с различным расположением слоя изотопа ^{57}Fe методом электронной мёссбауэровской спектроскопии обнаружено, что на интерфейсах Fe -на- Si и Si -на- Fe образуются одинаковые парамагнитные слои $c-Fe_{1-x}Si$, примыкающие к слою Si . В обоих интерфейсах имеется различающийся по толщине ферромагнитный слой, представляющий собой ряд твёрдых растворов общей формулы $Fe_{1-x}Si_x$ с x в диапазоне 0.18–0.20 для интерфейса Si -на- Fe и $x \leq 0.18$ для интерфейса Fe -на- Si . Данные фазы остаются термостабильными вплоть до 400 К. Выше этой температуры начинаются необратимые химические реакции, которые изменяют фазовый состав слоёв до немагнитной фазы при температуре 800 К.

7. Показано, что в эпитаксиально-сформированной ферромагнитной пленке силицида $Fe_3Si/Si(111)$ толщиной 20 нм реализуется узкая линия однородного ферромагнитного резонанса ($\Delta H = 11.57$ Э), измеренная на частоте накачки 2.274 ГГц при комнатной температуре. Продемонстрирована возможность синтеза метастабильной при комнатной температуре ферромагнитной фазы силицида Fe_5Si_3 на подложке $SiO_2/Si(100)$ с температурой Кюри 390 К.

8. Для плёнок эпитаксиального силицида $Fe_3Si/Si(111)$ и поликристаллического силицида Fe_5Si_3 обнаружено соответствие энергии резонансных пиков на спектральной зависимости магнитного кругового дихроизма, энергиям межзонных переходов электронов в кристаллах Fe_3Si и Fe_5Si_3 . Сравнение измеренных *in situ* методом спектральной эллипсометрии спектров поглощения пленки $Fe_3Si(20 \text{ нм})/Si(111)$ и рассчитанных из первых принципов в трёх вариантах микроскопической теории: приближении GGA теории функционала плотности, в несамосогласованном приближении G_0W_0 для массового оператора и самосогласованном приближении scGW показало качественное согласие теории и эксперимента.

9. Установлено, что на начальных стадиях роста плёнок марганца на поверхности кремния последовательно образуются силицид $MnSi$ и плёнка твёрдого раствора кремния в марганце. Рост металлической плёнки марганца начинается после нанесения ~ 0.9 нм Mn. Показано, что при твердофазном синтезе силицидов марганца на поверхности $Si(100)2 \times 1$, покрытой при комнатной температуре плёнкой марганца толщиной 2 нм, с ростом температуры последовательно формируются твёрдый раствор кремния в марганце, металлический моносилицид $MnSi$ и полупроводниковый силицид $MnSi_{1.7}$.

10. Для планарного устройства Fe_3Si/Si определены длина спиновой диффузии 400 нм и время жизни спинового состояния 150 пс в кремнии при 300 К. Для диода Шоттки на основе $Mn/SiO_2/p-Si$ установлено, что приложенное внешнего магнитное поле приводит к увеличению магнитосопротивления на шесть порядков.

Проделанная соискателем работа характеризует С.Н. Варнакова как высококвалифицированного специалиста в области физики конденсированного состояния и, в частности, физики наноматериалов. Он отлично владеет сверхвысоковакуумной экспериментальной техникой получения и исследования планарных наноструктур методами

электронной и дифракционной спектроскопии, одноволновой и спектральной эллипсометрии, а также магнитными и магнитооптическими методами.

Результаты проведенных исследований докладывались лично С.Н. Варнаковым на многочисленных Всероссийских и Международных конференциях, его работа поддерживалась проектами РФФИ и грантом Президента, где С.Н. Варнаков являлся руководителем, а также грантами РНФ и ФЦП, в которых он участвовал как исполнитель.

Материалы диссертационной работы изложены в 47 статьях, причем 34 из них опубликованы в журналах входящих в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемый ВАК РФ для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и индексируемых системой цитирования Web of Science.

Во время выполнения работы С.Н. Варнакова проявил себя очень целеустремленным, активным и грамотным специалистом. Он самостоятельно выполняет технологические и экспериментальные исследования, руководит студентами, активно взаимодействует со многими группами экспериментаторов из разных стран. Под его руководством защищены три кандидатские диссертации. Считаю, что Сергей Николаевич Варнаков заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Научный консультант:

Руководитель научного направления

"Магнетизм" ИФ СО РАН

доктор технических наук, профессор

С.Г. Овчинников

Подпись Овчинникова С.Г. удостоверяю:

Ученый секретарь ИФ СО РАН, к.ф.-м.н.

А.О. Злотников

«08» декабря 2017 года

