

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Яковлева Ивана Александровича «Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07-физика конденсированного состояния

Гибридные структуры ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник и ферромагнетик/полупроводник рассматриваются в настоящее время как базовые элементы нового направления в физике конденсированного состояния – полупроводниковой спинтронике. В этой связи, диссертационная работа Яковлева И.А., посвященная экспериментальному исследованию условий получения пленок железа и ряда его силицидов на атомарно-чистых и покрытых туннельно-тонким слоем оксида кремния кремниевых поверхностях с ориентацией (001) и (111), несомненно, является актуальной.

Диссертационная работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, ее актуальность, изложены научная новизна и практическая значимость результатов и приведены основные защищаемые положения.

В первой главе приводится литературный обзор структурных, оптических, магнитных свойств силицидов железа, показаны возможные пути их практического применения. Особое внимание уделено силицидам Fe_3Si и $\beta\text{-FeSi}_2$, рассматриваемым в настоящее время научным сообществом как перспективные материалы для кремниевой спинтроники и оптоэлектроники, соответственно. Обзор свидетельствует о хорошем знакомстве автора с научной литературой по тематике диссертации, умении критически анализировать и обобщать результаты исследования. Отмечается, что на текущий момент фазовая диаграмма для тонкопленочной системы Fe-Si не имеет законченного вида из-за многопараметрической зависимости состава пленок и требует более детального исследования процессов формирования силицидов. Продемонстрировано, что на формирование состава пленок системы Fe-Si, помимо концентрации элементов, влияют такие факторы как тип подложки, количество материала, скорость осаждения. Проведенный анализ позволил автору сформулировать и обосновать основные задачи диссертационной работы.

Диссертационная работа Яковлева И.А. посвящена исследованию формирования наноструктур Fe-Si на подложках кремния Si(111) и Si(001) и выявлению их структурных и магнитных характеристик в зависимости от технологических условий синтеза. К решению поставленных задач автор привлек целый комплекс взаимодополняющих *in situ* и *ex situ* методов исследования поверхности и структуры твердых тел, таких как дифракция быстрых электронов, лазерная эллипсометрия, электронная оже-спектроскопия, спектроскопия характеристических потерь энергии электронами, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская спектроскопия. Магнитные свойства выращенных пленок были охарактеризованы с помощью методов магнитного гистерезиса и ферромагнитного резонанса. Такая методология является характерной для современного материаловедения. Краткое описание перечисленных методов, а также методики подготовки подложек и синтеза пленок приведены во второй главе.

Результаты исследования методами дифракции быстрых электронов, электронной оже-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами влияния температуры подложки на формирование сверхтонких (эффективная толщина 1.5–2.0 нм) слоев железа на атомарно-чистой поверхности Si(100) методами твердофазной и реактивной эпитаксии приведены в третьей главе. Основным результатом этой части исследования является вывод о более сильном эффекте перемешивания атомов железа и кремния на границе раздела Fe/Si(100) при реактивной эпитаксии по сравнению с твердофазной, что является принципиальным при выборе метода формирования сверхтонких слоев железа для создания спинзависимых магнитных вентиляей.

По данной главе у меня имеется одно замечание.

1. На основании анализа картин дифракции быстрых электронов, автор утверждает, что при твердофазной эпитаксии формируется поликристаллическая пленка ОЦК-железа вплоть до 300 °С, тогда как при молекулярно-лучевой эпитаксии при 300 °С формируется структура из поликристаллического ОЦК-Fe и островков силицида железа γ -FeSi₂. С другой стороны, на стр 74 говорится что во время процессов реактивной и твердофазной эпитаксии при 150 °С формируются идентичные структуры, оже-спектры которых по виду похожи на оже-спектры Fe₃Si. Тогда как межплоскостные расстояния, определенные из картин ДБЭ (стр.67 и 70), хорошо соответствуют структуре ОЦК-Fe. Так как межплоскостные расстояния в решетках ОЦК-Fe и Fe₃Si отличаются незначительно, то при их определении из диффузных колец картин ДБЭ из-за невысокой точности легко сделать неверный вывод.

Четвертая глава посвящена описанию результатов исследования влияния взаимного расположения оси потока напыляемого железа и кристаллографических осей подложек на формирование магнитного состояния пленок железа толщиной 10 нм осаждаемых на атомарно-чистые и химически окисленные поверхности Si(111) и Si(001) под углом 37° к нормали подложки. Из анализа полученных данных делается вывод о том, что в случае «косого» осаждения пленок железа на окисленные поверхности кремния их магнитная анизотропия задается, в основном, углом между осью потока железа и нормалью к поверхности подложки и практически не зависит от ее кристаллографической ориентации. В случае осаждения железа на атомарно-чистые поверхности кремния, автором показано, что имеет место корреляция магнитных свойств пленок (величина поля анизотропии и коэрцитивной силы) с взаимным расположением потока атомов железа и кристаллографических осей подложки. Несомненный интерес представляет использование результатов расчета константы магнито-кристаллической анизотропии эпитаксиальных островков железа на Si(001)2x1 для оценки степени загрязнения их атомами кремния.

По данной главе у меня имеются следующие вопросы и замечания:

1. Тонкий слой SiO₂ (примерно 1 нм) получали химическим окислением, а каким образом получали соли толщиной 4 нм? (стр. 78)
2. Почему от пленки Fe на Si(001)2x1 толщиной 10 нм, напыленной при комнатной температуре, наблюдается точечная картина ДБЭ (стр.92, рис.38), тогда как от пленки толщиной 1.5–2.0 нм (стр.67, рис.24) видны лишь диффузные кольца?
3. В диссертационной работе много говорится о размерах кристаллитов в синтезируемых пленках, определенных из диффузности колец Дебая на картинах ДБЭ, но не указана методика их определения. Например, на стр.92 говорится, что размер частиц для пленок первой серии ($d_{\text{SiO}_2} \sim 1$ нм) меньше

чем для пленок второй серии ($d_{\text{SiO}_2} \sim 4$ нм) и не превышает 60 нм со ссылкой на [99, с. 109]. На этой странице речь идет о совершенно других вещах!

В пятой главе приводятся результаты исследования получения силицидов железа $\beta\text{-FeSi}_2$ и Fe_3Si методом соосаждения на $\text{Si}(001)$ и $\text{Si}(111)$ поверхностях, соответственно. Автором обнаружено, что на $\text{Si}(100) 2 \times 1$ пленка $\beta\text{-FeSi}_2$ растет эпитаксиально, с одной ориентацией, при температуре подложки равной 500°C и при соотношении потоков $\text{Fe}:\text{Si} = 3:1$, тогда как при стехиометрическом соотношении потоков $\text{Fe}:\text{Si} = 3:1$, формируются монокристаллические островки $\beta\text{-FeSi}_2$ различной ориентации. *В этой связи возникает вопрос о причинах срыва эпитаксиального монокристаллического роста $\beta\text{-FeSi}_2$ при изменении соотношения потоков $\text{Fe}:\text{Si}$ от 3:1 к 2:1.*

И замечание. На стр. 116 говорится, что пленки толщиной 50 нм были получены соосаждением $\text{Fe}:\text{Si}$ при температуре подложки 500°C , а в подписи к рис.67 на стр. 117 указана 450°C . Почему?

Бесспорно, важным результатом этой части исследования является получение автором пленок Fe_3Si на атомарно-чистой поверхности $\text{Si}(111)$ и покрытой туннельно-тонким слоем оксида кремния и определение их магнитных свойств (поле анизотропии, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и ширина линии ферромагнитного резонанса). Сопоставление измеренных величин с литературными данными указывает на то, что автору удалось вырастить на кремнии достаточно хорошего качества ферромагнетик.

Высказанные замечания никоим образом не затрагивают основных результатов диссертационной работы и ценность ее бесспорна. Она состоит в том, что Яковлев И.А. выявил закономерности изменения структуры пленок железа на атомарно-чистой поверхности кремния и покрытой туннельно-тонким слоем оксида кремния при реактивной и твердофазной эпитаксии в зависимости от температуры синтеза. Им установлена корреляция между магнитной анизотропией тонких пленок железа и условиями их синтеза. Впервые Яковлевым И.А. получены пленки ферромагнитного силицида железа Fe_3Si толщиной и магнитными свойствами, пригодными для их использования в качестве активного материала в датчиках слабых магнитных полей, СВЧ-фильтрах и модуляторах.

Достоверность полученных в диссертации основных результатов несомненна, так как она гарантируется применением совокупности современных экспериментальных методов исследования, высоким экспериментальным уровнем исследований и применением корректных аналитических и численных методов расчета.

Проведенный выше анализ содержания и основных положений диссертации И.А. Яковлева показывает, что полученные в работе новые и достоверные результаты представляют ценность для науки и практики, поскольку они приводят к расширению и углублению существующих представлений о структурных и фазовых превращениях в тонких пленках железа на кремнии и их связи с магнитными свойствами. Результаты диссертации могут быть использованы при выращивании слоев субмикронной толщины и гибридных структур ферромагнетик/диэлектрик/кремний, сочетающих различные режимы роста.

В целом диссертация Яковлева И.А. является законченным исследованием, содержащим важные результаты для физики конденсированного состояния. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК и написана хорошим научным языком. Основное содержание диссертации опубликовано в центральных и международных научных журналах и неоднократно обсуждалось на всероссийских и

международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

На основании всего изложенного выше, считаю, что работа И.А. Яковлева выполнена на высоком научном уровне, по актуальности, новизне и достоверности полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Яковлев Иван Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент
Заведующий лабораторией технологии
гомоэпитаксии ИАПУ ДВО РАН,
доктор физико-математических наук

Коробцов В.В.

Коробцов Владимир Викторович, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5, ФГБУН ИАПУ ДВО РАН, т.(423)-2310696, e-mail: korobtsov@iacp.dvo.ru

Подпись Коробцова В.В. заверяю
Ученый секретарь ИАПУ ДВО РАН,
Кандидат технических наук, доцент



Змей С.Б.

СПИСОК

опубликованных научных и учебно-методических работ

Коробцова Владимира Викторовича

Фамилия, имя, отчество

№ п/п	Наименование работы	Вид работы	Выходные данные	Соавторы
1	2	3	4	5
1	Electrical transport features in Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ /n-Si hybrid structures	статья	Solid State Phenomena 213 , 2014, pp.56-59	V.A. Vikulov, A.A. Dimitriev, V.V. Balashev, T.A. Pisarenko, A.M. Maslov,
2	The influence of seed layer on growth of magnetite films on the SiO ₂ /Si(001) surface	статья	Solid State Phenomena 213 , 2014, pp.51-55	T.A. Pisarenko, V.A. Vikulov, A.A. Dimitriev, V.V. Balashev.
3	The bias-controlled giant magnetoimpedance effect caused by the interface states in a metal-insulator-semiconductor structure with the Schottky barrier	статья	Applied Physics Letters 104 , 2014, pp.222406-22410	N. V. Volkov, A. S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, V. V. Balashev,
4	Влияние температуры синтеза на структурные и магнитные свойства пленок Fe ₃ O ₄ на поверхности SiO ₂ /Si(001)	статья	Письма в Журнал технической физики 38 , в.7. 2012, с.73-80	В.А.Викулов, В.В.Балашев, Т.А.Писаренко, А.А.Димитриев,
5	Тонкие пленки магнетита на окисленной поверхности кремния: исследование методом комбинационного рассеяния света.	статья	Письма в Журнал технической физики 38 , в.16. 2012, с.87-94	В.А.Викулов, В.В.Балашев, Т.А.Писаренко, А.А.Димитриев,
6	Особенности формирования пленки Fe ₃ O ₄ на поверхности Si(111), покрытой тонким слоем SiO ₂	статья	Журнал технической физики 81 , в.10. 2011, с.122-128	Балашев В.В., Писаренко Т.А., Чеботкевич Л.А
7	Исследование сверхтонких пленок силицида железа, выращенных твердофазной эпитаксией на поверхности Si(001)	статья	Физика твердого тела 2010, 52 , №2, с.370-376.	В.В. Балашев, Т.А. Писаренко, Е.А Чусовитин, К.Н. Галкин.
8	Thickness Dependent Formation of Iron Silicides on Clean and Boron Modified Si(001) Surface	статья	e-J. Surf. Sci. Nanotech. Vol. 7 (2009) 577-585.	V.V. Balashev, T.A. Pisarenko, E.A. Chusovitin
9	Comparative study of electro-physical properties of heterostructures containing PECVD nanocrystalline and anodic porous silicon layers	статья	Thin Solid Films, Vol. 517 , 2009, pp.3912-3915	V.A. Vikulov, A.A. Dimitriev, K. Kim, S. Jung, J. Yi.
10	Влияние дефектов тонкого слоя оксида кремния на	статья	Физика твердого тела 2009, 51 , №3, с.565-	Балашев В.В., Писаренко Т.А.,

	процессы силицидообразования в системе Fe/SiO ₂ /Si(001)		571	Чусовитин Е.А
11	Соосаждение Fe и Si на поверхность SiO ₂ /Si(001)	статья	Известия Вузов: Материалы электронной техники, №1, 2008 с.41-47	Балашев В.В., Писаренко Т.А., Чусовитин Е.А
12	Investigation of multilayer silicon structures with buried iron silicide nanocrystallites: growth, structure and properties	статья	Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 8, 2008, p.527-534.	N.G. Galkin, D.L. Goroshko, V.O. Polyarnyi, E. A. Chusovitin, V.V. Balashev, Y. Khang, L. Dozsa, A.K. Gutakovsky, A.V. Latyshev, T.S. Shamirzaev, K.S. Zhuravlev
13	A study of the temperature dependence of adsorption and silicidation kinetics at the Mg/Si(111)	статья	Thin Solid Films, Vol. 515, 2007, p. 8192-8196	K.N. Galkin, Mahesh Kumar, Govind, S.M. Shivaprasad, N.G. Galkin
14	Codeposition of Fe and Si on SiO ₂ /Si(001): RHEED study	статья	e-J. Surf. Sci. Nanotech. Vol. 5, 2007, p.136-142	V.V.Balashev, T.A.Pisarenko, E.A.Chusovitin, V.A.Vikulov
15	Fe interaction with native SiO ₂ on Si(001) studied by RHEED	статья	e-J. Surf. Sci. Nanotech. Vol. 5, 2007, p.45-50.	V.V.Balashev, T.A.Pisarenko, E.A.Chusovitin, E.V.Markidonov

Официальный оппонент _____ *РШ* _____

Список верен:
Зам. директора Института
член-корр РАН

Саранин А.А. _____
Подпись с расшифровкой

Змеу С.Б. _____
Подпись с расшифровкой



Ученый секретарь Института
К.И.Н.

Печать организации