

На правах рукописи



Яковлев Иван Александрович

**Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных  
силицидов железа**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН)

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент  
Варнаков Сергей Николаевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, доцент  
Артемьев Евгений Михайлович  
профессор кафедры физики №2  
Института инженерной физики и радиоэлектроники  
Федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»,

доктор физико-математических наук  
Коробцов Владимир Викторович  
заведующий лабораторией технологии гомоэпитаксии  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного  
отделения Российской академии наук

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук  
г. Новосибирск

**Защита состоится**

«03» октября 2014 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 003.055.02  
в ИФ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.055.02

доктор физико-математических наук, профессор

Втюрин Александр Николаевич

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Спинтроника является сейчас весьма важной областью исследования с большой перспективой использования полученных результатов в ряде технологий. Главная идея спинтроники – создание и управление спин-поляризованным током, в отличие от обычной электроники, в которой состояние спина электрона не учитывается. В свою очередь, учет степени свободы спина обеспечивает появление новых эффектов, новых возможностей и новых применений.

Для создания спинтронного устройства необходимо наличие двух основных компонентов: источника спин-поляризованных электронов (т.е. источника, генерирующего электроны со спинами преимущественно одного направления) и принимающей системы, чувствительной к спину поляризованных электронов (спинового детектора). В настоящее время исследователи прикладывают множество усилий для поиска новых материалов и структур, на основе которых можно будет создавать спинтронные устройства. Особенно их внимание привлекают сверхтонкие гибридные гетероструктуры (ферромагнитный металл/полупроводник), где в роли полупроводника используется кремний [1], который обладает слабым спин-орбитальным взаимодействием. Данное качество обеспечивает продолжительное время жизни спинового состояния и, соответственно, большую длину спиновой диффузии (с сохранением когерентного спинового состояния). На роль ферромагнетика очень хорошо подходит железо, спиновая поляризация которого достигает 44 % [2]. В таких гибридных структурах носители тока в ферромагнетике оказываются поляризованными по спину и при распространении их в полупроводниковую часть сохраняют свою поляризацию. Однако вследствие несовершенства интерфейса или присутствия примеси немагнитных соединений, образующихся на границе раздела, спиновая поляризация может разрушиться. Известно, что в процессе осаждения слоя Fe на монокристаллическую поверхность Si на

начальных этапах даже при комнатной температуре неконтролируемо образуются несколько фаз немагнитных силицидов [3]. Поэтому при создании гибридных структур достаточно часто формируют дополнительный слой диэлектрика, оксид  $\text{SiO}_2$ , который позволяет увеличить потенциальный барьер на границе раздела «ферромагнетик/полупроводник», а также служит преградой для образования нежелательных силицидов. Под большим сомнением остается вопрос о сохранении спиновой поляризации носителей при туннелировании через  $\text{SiO}_2$ , который обычно оказывается в аморфном состоянии.

Решением возникающих проблем может являться использование в качестве ферромагнитного слоя силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$ . Так, при особых технологических условиях в системе Fe-Si могут сформироваться однородные слои магнитного силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$  [4], который имеет высокую спиновую поляризацию электронов – порядка 43 % [5].

Таким образом, создание гибридных структур «ферромагнетик/полупроводник» на основе кремния и силицидов железа с резкой границей раздела является задачей достаточно актуальной, хотя и непростой.

**Целью диссертационной работы** является определение влияния различных технологических условий на формирование наноструктур Fe-Si на подложках кремния Si(001) и Si(111) и выявление их структурных и магнитных характеристик.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. определить влияние различных технологических условий на процессы формирования наноструктур при напылении слоя Fe эффективной толщиной  $1.5 \div 2.0$  нм на поверхность Si(001)  $2 \times 1$ ;
2. установить влияние взаимного расположения оси потока напыляемого Fe и кристаллографических осей подложек Si(001) и Si(111) на формирование магнитного состояния пленок Fe, выращенных на атомарно чистых и покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  поверхностях Si(001)  $2 \times 1$ , Si(111)  $7 \times 7$ ;

3. определить технологические условия формирования сплошных, однородных пленок ферромагнитного  $\text{Fe}_3\text{Si}$  с резкими границами раздела и полупроводникового  $\beta\text{-FeSi}_2$  силицидов толщиной более 20 нм и исследовать их основные магнитные и структурные характеристики.

### **Научная новизна**

Работа содержит новые экспериментальные и методологические результаты.

Ниже перечислены основные из них:

1. Отработана технология синтеза наноструктур железа различной толщины на атомарно чистых поверхностях  $\text{Si}(001) 2\times 1$  при разных температурных условиях. Определены технологические условия формирования характерных силицидов железа.
2. Изучена магнитная анизотропия пленок Fe, полученных при напылении под углом к поверхности на различных подложках:  $\text{Si}(001)$ ,  $\text{Si}(111)$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  и  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ . Установлено критическое влияние данной геометрии напыления на магнитные свойства структур. Предложен механизм формирования магнитной анизотропии пленок железа на  $\text{Si}(001)$  и  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ . Отмечено влияние вицинальных ступеней на характер магнитной анизотропии пленок Fe на подложках  $\text{Si}(111)$ .
3. Проведено систематическое исследование магнитных и структурных свойств пленок, полученных совместным осаждением Fe и Si в широком диапазоне соотношений потоков напыляемых материалов и температур.
4. Получена эпитаксиальная пленка ферромагнитного силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  с резкой границей раздела и сравнительно узкой линией ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 11.57$  Э.
5. Исследованы структурные характеристики пленок силицида  $\beta\text{-FeSi}_2$ , полученных совместным осаждением при различных соотношениях скоростей потоков Fe и Si.

## Практическая значимость работы

В ходе работы были определены технологические условия для формирования пленок Fe и различных силицидов Fe-Si на подложках Si(001) и Si(111). Установлено влияние напыления Fe под углом к поверхности подложки на магнитные свойства получаемых структур на Si(001) и Si(111), покрытых слоем оксида SiO<sub>2</sub> и без него. Эти результаты позволяют создавать структуры с заданным магнитным упорядочением.

Получена эпитаксиальная пленка ферромагнитного силицида Fe<sub>3</sub>Si на подложке Si(111), при комнатной температуре обладающая магнитной одноосной анизотропией ( $H_a = 26$  Э) и имеющая сравнительно узкую линию однородного ферромагнитного резонанса ( $\Delta H = 11.57$  Э), измеренную на частоте накачки 2.274 ГГц. Пленки с такими характеристиками имеют перспективы применения в качестве активного материала в различных электрически управляемых устройствах микроволнового (СВЧ) диапазона, например, в фильтрах, амплитудных и фазовых модуляторах, в ограничителях мощности.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Формирование поликристаллической структуры Fe происходит при напылении на нагретую до 150 °С подложку Si(001) 2×1, а также при отжиге до 300 °С. При напылении Fe при 300 °С образуется структура из смеси Fe с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой и силицида  $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>, а при  $T = 450$  °С формируется структура, состоящая из смеси двух силицидов  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub> и  $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>. Отжиг слоя железа при температуре 450 °С приводит к формированию структуры из плоских островков силицида  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> и поликристаллического Fe.
2. На формирование магнитного состояния структур Fe влияет взаимное расположение оси потока материала и подложки, а также выбор подложки: Si(001) или Si(111).
3. Направление магнитной анизотропии структуры Fe на поверхности SiO<sub>2</sub>/Si(001) в основном определяется морфологией пленки, которая, в свою очередь, задается взаимной ориентацией потока атомов Fe в молекулярном пучке

и кристаллографических осей подложки. Значение поля анизотропии  $H_a$  также зависит от взаимного расположения потока напыляемого Fe и кристаллографических осей подложки. В случае, когда ось потока напыляемого Fe сонаправлена с осью  $\langle 100 \rangle_{\text{Si}}$  подложки, полученная структура Fe имеет 2 оси легкого намагничивания (ОЛН), которые ориентированы по главным кристаллографическим осям  $[110]_{\text{Si}}$  и  $[\bar{1}10]_{\text{Si}}$ .

4. Поликристаллическая пленка  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , обладающая магнитными свойствами, которые изотропны относительно поворота в плоскости пленки, формируется на поверхности  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  при совместном осаждении Fe и Si в соотношении 3:1 и температуре подложки равной  $150^\circ\text{C}$ . Эпитаксиальная пленка  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , обладающая одноосной магнитной анизотропией в плоскости пленки (коэрцитивная сила пленки  $H_c = 12.3$  Э, поле анизотропии  $H_a = 26$  Э) формируется на атомарно чистой поверхности  $\text{Si}(111) 7 \times 7$  при совместном осаждении Fe и Si в соотношении 3:1 и температуре подложки равной  $150^\circ\text{C}$ .

5. Структуры полупроводникового  $\beta\text{-FeSi}_2$ , состоящие из монокристаллических разориентированных на поверхности кремния островков, формируются при совместном напылении Fe и Si в соотношениях Fe:Si = 3:1 и 1:2 при температуре подложки  $\text{Si}(001) 2 \times 1$  равной  $500^\circ\text{C}$ .

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на конференциях и научных симпозиумах всероссийского и международного уровня: Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (г. Красноярск, Россия, 2008 и 2009 гг.), Международной научной конференции «Решетневские чтения» (г. Красноярск, Россия, 2008, 2009 и 2010 гг.), Азиатской школе-конференции по физике и технологии наноструктурированных материалов, ASCO-NANOMAT (г. Владивосток, Россия, 2011 и 2013 гг.), Евро-азиатском симпозиуме «Trends in magnetism», EASTMAG-2013 (г. Владивосток, Россия, 2013 г.).

**Личный вклад автора заключается в** проведении всех экспериментов по созданию наноструктур при различных температурных условиях, пленок ферромагнитного силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и полупроводникового  $\beta\text{-FeSi}_2$ ; изучении *in situ* структурных свойств полученных пленок методами дифракции отраженных быстрых электронов и электронной спектроскопии; измерении магнитного гистерезиса *ex situ*. Представленные в диссертационной работе результаты отражают итоги исследовательской деятельности автора в ИФ СО РАН совместно с сотрудниками лабораторий физики магнитных явлений, физики магнитных пленок, кристаллофизики, электродинамики и СВЧ электроники, когерентной оптики.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 68 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 152 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить. Изложены актуальность работы, научная новизна и практическая значимость результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, и структура диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору результатов и разработок, относящихся к теме исследования. В данном разделе приводится обзор структурных, оптических, магнитных свойств силицидов железа и отражена актуальность их практического

применения. Показано, что синтез силицида одного типа ( $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\alpha\text{-FeSi}_2$  или  $\beta\text{-FeSi}_2$ ) крайне затруднителен в связи с тем, что в одном технологическом цикле обычно образуется смесь различных соединений Fe-Si.

**Во второй главе** представлено описание основных методов исследования полученных структур, таких как дифракция отраженных быстрых электронов (ДОБЭ), отражательная лазерная эллипсометрия, методы электронной и рентгеновской спектроскопии, рентгеновского структурного анализа и электронной просвечивающей микроскопии, а также методики измерения ферромагнитного резонанса и магнитного гистерезиса. В данной главе также приведено описание экспериментальной установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара», где сделан акцент на геометрию напылительной системы, которая образует напыление под углом к поверхности образца (рисунок 1). Описана технология подготовки подложек Si(001) и Si(111) для напыления структур Fe-Si и технология осаждения этих пленок.

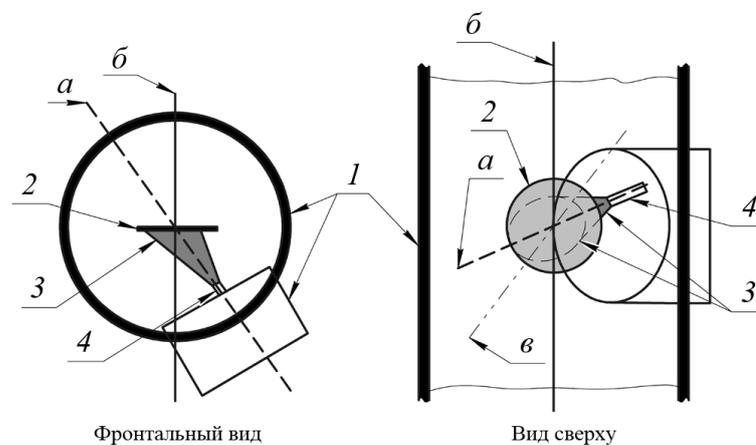


Рисунок 1 – Расположение и геометрия напылительных элементов в технологической камере установки МЛЭ «Ангара». Сверхвысоковакуумная камера – (1); подложка – (2); поток Fe – (3); источник Fe – (4); ось потока Fe – (а); ось камеры – (б); ось ДОБЭ – (в)

**Третья глава** посвящена исследованию слоев Fe эффективной толщиной  $1.5 \div 2.0$  нм на подложках Si(100)  $2 \times 1$ , полученных методами твердофазной и реактивной эпитаксии при различных температурных режимах. *In situ*

исследования структурных свойств осуществлялись методами дифракции отраженных быстрых электронов, электронной оже-спектроскопии (ЭОС) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ).

Из анализа картин ДОБЭ было установлено, что: при напылении Fe на подложку Si(001)  $2 \times 1$ , нагретую до  $T = 150$  °C, образуется поликристаллическая структура ОЦК Fe, где размер кристаллитов порядка единиц нанометров; напыление при  $T = 300$  °C приводит к образованию эпитаксиальных островков  $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>, где по-прежнему на поверхности присутствует поликристаллическое ОЦК Fe; напыление при  $T = 450$  °C приводит к формированию эпитаксиальной островковой структуры из смеси  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub> и  $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>. Для расшифровки экспериментальных дифракционных данных и определения фазового состава полученных структур были проведены расчеты межплоскостных расстояний  $d$  для соответствующих рефлексов по формуле  $rd = L\lambda$ , где расстояние от центрального рефлекса до расчетного –  $r$ , выраженное в миллиметрах, и  $L\lambda$  – постоянная прибора. Результаты расчета были сопоставлены с теоретическими картинками ДОБЭ [6,7].

Проведено исследование структурных характеристик пленок Fe, полученных напылением при комнатной температуре с последующим отжигом в течение 60 минут при температурах 150, 300, 450 °C методом ДОБЭ. Анализ ДОБЭ картин показал, что в результате синтеза были сформированы поликристаллическое ОЦК Fe (до температур отжига 300 °C) и эпитаксиальная пленка силицида  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> с присутствием поликристаллического ОЦК Fe (при температуре отжига в 450 °C).

Анализ данных о содержании железа, кремния и углерода методами ЭОС и СХПЭЭ позволяет говорить о том, что в процессе реактивной эпитаксии в химическую реакцию с кремнием вступает большее количество железа, чем при твердофазной эпитаксии, образуя при этом различные силициды железа. Реактивная эпитаксия приводит также к более сильному перемешиванию Fe и Si.

**Четвертая глава** посвящена исследованию магнитной анизотропии пленок Fe толщиной 10 нм, напыленных на различные поверхности Si, в случае, когда поток материала направлен под углом к поверхности подложки. В данном

исследовании были использованы атомарно чистые поверхности Si(001)  $2 \times 1$  и Si(111)  $7 \times 7$ , а также покрытые слоем SiO<sub>2</sub> толщиной  $\sim 1$  нм и  $\sim 4$  нм. Для всех образцов показано, что напыление слоев Fe под углом к поверхности подложки задает морфологию поверхности структур Fe, а полученная морфология определяет магнитную анизотропию в плоскости пленок Fe и величину поля анизотропии  $H_a$  и коэрцитивной силы  $H_c$ . Так, для пленок Fe, напыленных на SiO<sub>2</sub>( $\sim 1$  нм)/Si(001), наблюдается одноосная магнитная анизотропия. Причем прослеживается прямая зависимость положения оси трудного намагничивания (ОТН) от направления потока Fe: ОТН всегда перпендикулярна потоку железа (рисунок 2).

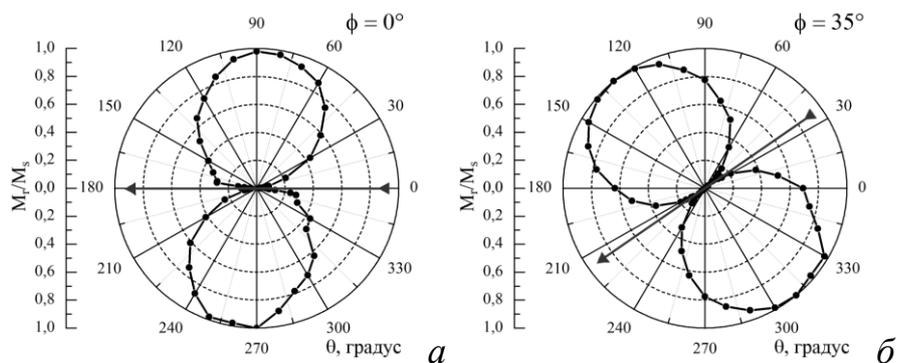


Рисунок 2 – Полярные диаграммы приведенной остаточной намагниченности для пленок Fe на SiO<sub>2</sub>( $\sim 1$  нм)/Si(001), полученных при различных азимутальных углах напыления (отсчет от  $[110]_{\text{Si}}$ ): (а) –  $0^\circ$  (поток Fe  $\parallel [110]_{\text{Si}}$ ); (б) –  $35^\circ$  (стрелкой показано направление потока Fe)

При напылении слоя Fe на Si(001)  $2 \times 1$  полученная структура характеризуется изотропным поведением намагниченности в плоскости (рисунок 3, а), но в случае, когда поток Fe сонаправлен (или близок) с главной кристаллографической осью  $\langle 100 \rangle_{\text{Si}}$ , то структура характеризуется магнитной анизотропией с двумя осями легкого намагничивания (ОЛН) (рисунок 3, б).

При напылении слоя Fe на Si(111)  $7 \times 7$  полученная структура характеризуется одноосной магнитной анизотропией, где также прослеживается влияние напыления под углом к поверхности подложки, но ОТН следует за направлением потока Fe неявно. Установлено, что при некоторых азимутальных углах

напыления ОТН перпендикулярна главным кристаллографическим осям поверхности Si(111) (рисунок 4).

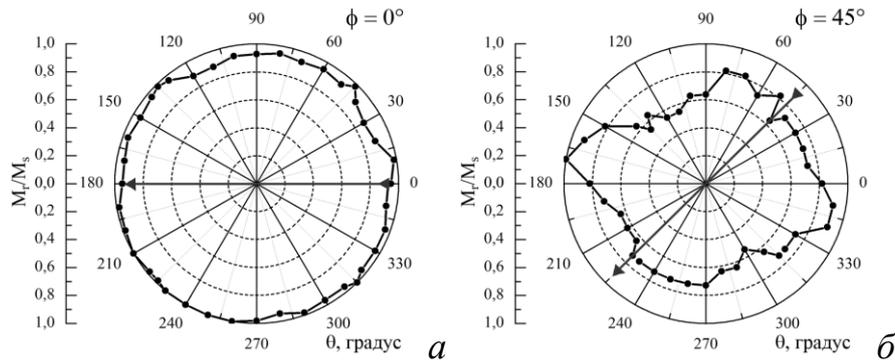


Рисунок 3 – Полярные диаграммы приведенной остаточной намагниченности для пленок Fe на Si(001)  $2 \times 1$ , полученных при различных азимутальных углах напыления (отсчет от  $[110]_{\text{Si}}$ ): (а) –  $0^\circ$  (поток Fe  $\parallel [110]_{\text{Si}}$ ); (б) –  $45^\circ$

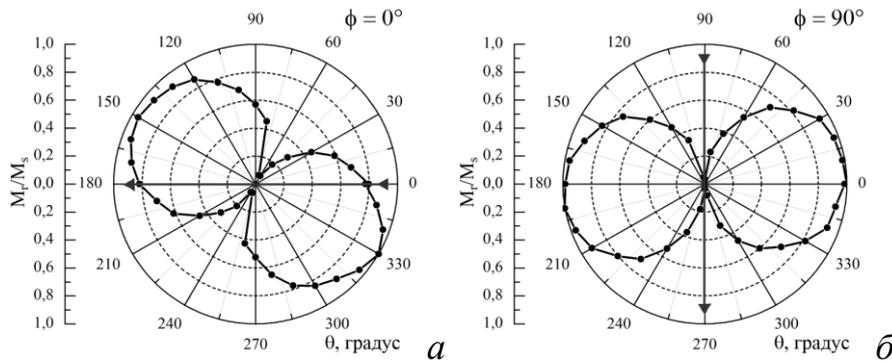


Рисунок 4 – Полярные диаграммы приведенной остаточной намагниченности для пленок Fe на Si(111)  $7 \times 7$ , полученных при различных азимутальных углах напыления (отсчет от  $[1\bar{1}0]_{\text{Si}}$ ): (а) –  $0^\circ$  (поток Fe  $\parallel [1\bar{1}0]_{\text{Si}}$ ); (б) –  $90^\circ$

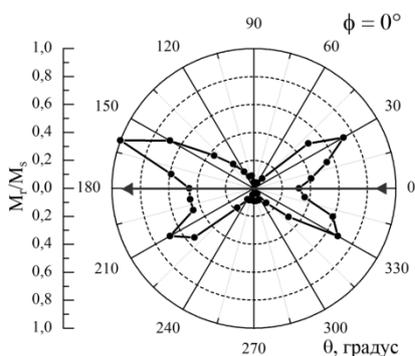


Рисунок 5 – Полярная диаграмма  $M_r/M_s$  для пленок Fe на SiO<sub>2</sub>(~4 нм)/Si(111)

Для структур Fe, напыленных на SiO<sub>2</sub>(~1 нм)/Si(111), наблюдается одноосная магнитная анизотропия, причем имеется прямое следование ОТН за направлением потока Fe, схожее с тем, что наблюдается в случае SiO<sub>2</sub>(~1 нм)/Si(001).

Для пленок Fe, напыленных на SiO<sub>2</sub>(~4 нм)/Si(111), наблюдается более сложная зависимость с несколькими осями легкого и

трудного намагничивания (рисунок 5). Здесь обнаружена зависимость нескольких характеристик: оси легкого намагничивания лежат на кристаллографических осях поверхности Si(111); ОН с бóльшей остаточной намагниченностью перпендикулярна оси напыления и обе оси трудного намагничивания взаимно перпендикулярны.

В данной главе проведен также тщательный анализ магнитной анизотропии пленок железа на SiO<sub>2</sub>(~1 нм)/Si(001) и Si(001) 2×1. Так, при напылении на SiO<sub>2</sub>(~1 нм)/Si(001) магнитную анизотропию определяет особая морфология поверхности синтезируемой структуры, образующаяся при напылении под углом к поверхности, а именно формирование на поверхности групп островков, упорядоченных в ряды. Причем такие ряды перпендикулярны направлению потока напыляемого железа. Обнаружено, что при напылении на Si(001) 2×1, когда поток Fe сонаправлен с  $\langle 100 \rangle_{\text{Si}}$ , магнитная анизотропия является суперпозицией магнитокристаллической анизотропии эпитаксиальных кластеров ОЦК Fe и одноосной анизотропии, вызванной «косым» напылением. Были рассчитаны константа одноосной анизотропии для структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(001) ( $K_{\text{одн.осн}} = 4.3 \times 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>) и константа кубической магнитной анизотропии для структуры Fe/Si(001) ( $K_{\text{кубич}} = 7.9 \times 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>).

В пятой главе приведены результаты исследования структурных и магнитных свойств пленок толщиной менее 5 нм, полученных совместным осаждением Fe и Si в различных соотношениях потоков на нагретые подложки Si(001) 2×1. Температурный диапазон задавался в пределах 20–450 °С. Установлено, что при температурах до 300 °С образуются аморфные немагнитные пленки Fe-Si в широком диапазоне соотношений потоков.

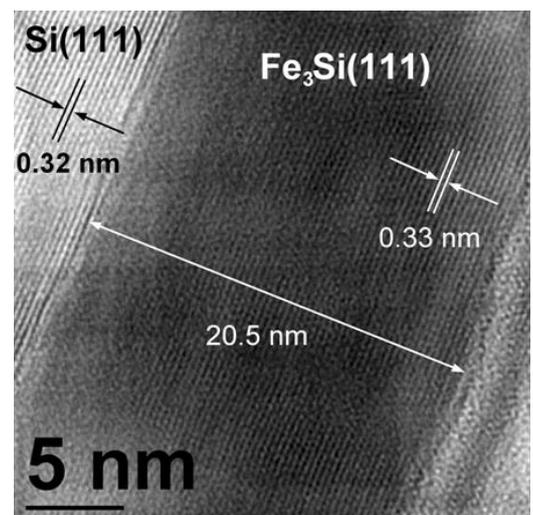


Рисунок 6 – Электронно-микроскопическое изображение высокого разрешения (поперечное сечение) структуры Fe<sub>3</sub>Si/Si(111)

Ферромагнетизм был обнаружен только в пленках, синтезированных при комнатной температуре при соотношении потоков Fe:Si равном 5:1 и 2:1. Во второй части пятой главы представлены результаты исследования структурных и магнитных свойств толстых пленок заданных силицидов железа:  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и  $\beta\text{-FeSi}_2$ , полученных методом совместного осаждения на подложках Si(111) и Si(001) соответственно.

Так, совместное осаждение Fe и Si в соотношении потоков Fe:Si 3:1 при температуре подложки  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  равной  $150^\circ\text{C}$  приводит к формированию поликристаллической пленки ферромагнитного силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , которая обладает изотропными магнитными свойствами в плоскости пленки. В свою очередь, напыление при таких же условиях, но на атомарно чистую поверхность Si(111)  $7\times 7$ , приводит к формированию эпитаксиальной пленки ферромагнитного  $\text{Fe}_3\text{Si}$  с резкой границей раздела между пленкой и подложкой Si(111) (рисунок 6). Данная структура проявляет ферромагнитный резонанс с шириной линии  $\Delta H = 11.57$  Э, также для нее определены некоторые магнитные характеристики:  $M_S = 875$  Гс,  $H_c = 12.3$  Э,  $H_a = 26$  Э,  $\Delta H = 11.57$  Э.

Установлено, что пленка силицида  $\beta\text{-FeSi}_2$  толщиной около 50 нм образуется при совместном напылении Fe и Si на атомарно чистую поверхность Si(001)  $2\times 1$  при температуре подложки  $500^\circ\text{C}$  в стехиометрическом для данного силицида соотношении Fe:Si = 1:2, а также в стехиометрическом соотношении для  $\text{Fe}_3\text{Si}$  (Fe:Si = 3:1).

**В заключении сформулированы основные результаты исследования:**

1. Отработана технология напыления слоев Fe эффективной толщиной  $1.5\div 2.0$  нм на Si(001)  $2\times 1$  при температурах подложки  $150, 300, 450^\circ\text{C}$ , а также при комнатной температуре с последующим отжигом покрытия при  $T = 150, 300, 450^\circ\text{C}$ . Получены пленочные структуры толщиной 10 нм при напылении Fe под углом к поверхности на атомарно чистые и покрытые слоем  $\text{SiO}_2$  подложки Si(001) и Si(111). Отработаны технологические режимы совместного напыления Fe и Si в различных соотношениях потоков материалов при температурах подложки от  $20$  до  $500^\circ\text{C}$ . Получены эпитаксиальные пленки ферромагнитного

силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$  толщиной  $10\div 50$  нм с резкими границами раздела и полупроводникового силицида  $\beta\text{-FeSi}_2$  толщиной  $10\div 50$  нм.

2. Установлено, что фазовый состав и атомная структура, образующиеся при напылении Fe эффективной толщиной  $1.5\div 2.0$  нм на поверхность  $\text{Si}(001) 2\times 1$ , определяются температурой подложки и условиями послеростового отжига:

(а) при температурах подложки от  $20$  до  $150$  °С атомная структура слоя представляет собой гранулы ОЦК-Fe. Фазовый состав пленки, напыленной при комнатной температуре, сохраняется при 60-минутном отжиге при температурах вплоть до  $300$  °С, однако размер кристаллитов с ростом температуры отжига увеличивается. Отжиг структуры при  $T = 450$  °С приводит к образованию смеси поликристаллического ОЦК-Fe и плоских островков силицида  $\beta\text{-FeSi}_2$ ;

(б) при температуре подложки  $300$  °С формируется структура, состоящая из смеси поликристаллического ОЦК-Fe и силицида  $\gamma\text{-FeSi}_2$ ;

(в) при температуре подложки  $450$  °С формируется структура, состоящая из смеси силицидов  $\alpha\text{-FeSi}_2$  и  $\gamma\text{-FeSi}_2$ .

3. Установлено, что ориентация потока атомов Fe в молекулярном пучке относительно плоскости и кристаллографических осей подложек  $\text{Si}(001)$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ ,  $\text{Si}(111)$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  задает морфологию атомной структуры Fe. Показано, что заданная морфология островковой пленки формирует магнитную анизотропию в плоскости подложки и определяет величину поля анизотропии  $H_a$  и коэрцитивной силы  $H_c$ .

4. Показано, что эпитаксиальные пленки  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  с резкими границами раздела обладают одноосной магнитной анизотропией в плоскости пленки. Магнитные характеристики, измеренные методом ферромагнитного резонанса, заданы величинами: коэрцитивная сила  $H_c = 12.3$  Э, поле анизотропии  $H_a = 26$  Э. В то же время магнитная структура поликристаллических пленок  $\text{Fe}_3\text{Si}$  на  $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$  изотропна относительно поворота в плоскости пленки (коэрцитивная сила структуры  $H_c = 48$  Э).

**Публикации автора по теме диссертации**

1. Яковлев, И.А. Исследование структурных и магнитных характеристик эпитаксиальных пленок  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков, Б.А. Беляев, С.М. Жарков, М.С. Молокеев, И.А. Тарасов, С.Г. Овчинников // **Письма в ЖЭТФ**. – 2014. – Т. 99. – Вып. 9. – С. 610.
2. Komogortsev, S.V. Magnetic anisotropy in Fe films deposited on  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  and  $\text{Si}(001)$  substrates / S.V. Komogortsev, S.N. Varnakov, S.A. Satsuk, I.A. Yakovlev, S.G. Ovchinnikov // **JMMM**. – 2014. – Vol. 351. – P. 104.
3. Косырев, Н.Н. Эллипсометрическая методика определения показателя поглощения полупроводниковых нанослоев *in situ* / Н.Н. Косырев, В.А. Швец, Н.Н. Михайлов, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников, С.В. Рыхлицкий, И.А. Яковлев // **ЖТФ**. – 2014. – Т. 84. – Вып. 5. – С. 109.
4. Варнаков, С.Н. Сравнение силицидов железа, полученных методами молекулярно-лучевой и твердофазной эпитаксии / С.Н. Варнаков, И.А. Яковлев, С.А. Лященко, С.Г. Овчинников, Г.В. Бондаренко // **Вестник СибГАУ**. – 2010. – Т. 30. – Вып. 4. – С. 45.
5. Свидетельство об официальной регистрации **программы для ЭВМ** 2013660341 «Комплекс виртуальных лабораторных работ (КЛР 1.0)» / С.А. Лященко, И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков, Р.В. Мосин. – Зарегистрировано 31 октября 2013 г.
6. Яковлева, Е.В. Получение тонкопленочных покрытий термическим испарением на установке ВУП-5: [**Методические указания к вып. лаб. работы**] / Е.В. Яковлева, С.Н. Варнаков, И.А. Яковлев. – Красноярск: СибГАУ, 2010. – 14 с.
7. Яковлев, И.А. Исследование начальных стадий эпитаксии на  $\text{Si}(100)$  методом дифракции отраженных быстрых электронов / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков // Тезисы докладов XII Международной научной конференции «Решетневские чтения», (г. Красноярск, Россия, 2009 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2008. – С. 245–246.

8. Яковлев, И.А. Исследование начальных этапов роста Fe на поверхности Si(100) методом дифракции отраженных быстрых электронов / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков // Тезисы докладов V Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», (г. Красноярск, Россия, 2009 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2009. – С. 144–145.
9. Яковлев, И.А. Исследование формирования структуры Fe на Si(100) в зависимости от температуры образца методом дифракции отраженных быстрых электронов / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков // Тезисы докладов XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения», (г. Красноярск, Россия, 2009 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2009. – С. 704–705.
10. Яковлев, И.А. Особенности образования силицидов железа при реактивной и твердофазной эпитаксии / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков // Материалы XIV Международной научной конференции «Решетневские чтения», (г. Красноярск, Россия, 2010 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2010. – С. 598–599.
11. Yakovlev, I.A. Investigation of Fe silicides formation on Si (100) by molecular-beam epitaxy and solid-phase epitaxy / I.A. Yakovlev, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov // Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2011): Proceedings. – Vladivostok. – 2011. – P. 127–128.
12. Komogortsev, S.V. Magnetic anisotropy of Fe films on Si(001) with and without SiO<sub>2</sub> buffer layer / S.V. Komogortsev, S.N. Varnakov, S.A. Satsuk, I.A. Yakovlev, S.G. Ovchinnikov // Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2013): Proceedings. – Vladivostok. – 2013. – P. 75–76.
13. Komogortsev, S.V. Magnetic anisotropy in Fe films deposited on SiO<sub>2</sub>/Si(001) and Si(001) substrates / S.V. Komogortsev, S.N. Varnakov, S.A. Satsuk, I.A. Yakovlev, I.A. Tarasov, G.V. Bondarenko, S.G. Ovchinnikov // V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism (EASTMAG-2013): Abstracts. –

Vladivostok: Directorate of publishing activities of Far Eastern Federal University, 2013. – P. 310.

### Список цитируемой литературы

1. Odkhuu, D. Magnetocrystalline anisotropy energy and spin polarization of  $\text{Fe}_3\text{Si}$  in bulk and on Si(001) and Si(111) substrates / D. Odkhuu, W.S. Yun, S.C. Hong // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519. – P. 8218–8222.
2. Meservey, R. Spin polarization of tunneling electrons from films of Fe, Co, Ni, and Gd / R. Meservey, P.M. Tedrow // *Solid State Communications*. – 1972. – Vol. 11. – Iss. 2. – P. 333–336.
3. Varnakov, S.N. Magnetic properties and nonmagnetic phases formation in  $(\text{Fe}/\text{Si})_n$  films / S.N. Varnakov, S.V. Komogortsev, S.G. Ovchinnikov, J. Bartolomé, J. Sesé // *J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 104. – P. 104.
4. Hamaya, K. Epitaxial ferromagnetic  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  structures with high-quality heterointerfaces / K. Hamaya, K. Ueda, Y. Kishi, Y. Ando, T. Sadoh, M. Miyao // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 93. – P. 132117.
5. Асташенок, А.В. Магнитно-резонансные свойства тонкопленочных структур  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{MgO}$  / А.В. Асташенок, Г.С. Куприянова, А.Ю. Гойхман и др. // *Вестник БалтГУ*. – 2011. – Вып. 5. – С. 60–68.
6. Балашев, В.В. Исследование сверхтонких пленок силицида железа, выращенных твердофазной эпитаксией на поверхности Si(001) / В.В. Балашев, В.В. Коробцов, Т.А. Писаренко и др. // *ФТТ*. – 2010. – Т. 52. – Вып. 2. – С. 370.
7. Балашев, В.В. Влияние дефектов тонкого слоя оксида кремния на процессы силицидообразования в системе  $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  / В.В. Балашев, В.В. Коробцов, Т.А. Писаренко, Е.А. Чусовитин // *ФТТ*. – 2009. – Т. 51. – Вып. 3. – С. 565–571.

Яковлев Иван Александрович

ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИЛИЦИДОВ ЖЕЛЕЗА

автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать 27.05.2014. Заказ № 12  
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 60 экз.  
Типография ФГБУН Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50

