

На правах рукописи



Лященко Сергей Александрович

**Морфология, магнитные и магнитооптические свойства
низкоразмерных структур Fe-Si**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева» и 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, профессор
кафедры Фотоники и лазерных технологий
Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»
Слабко Виталий Васильевич

доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук
Терещенко Олег Евгеньевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский национальный
исследовательский государственный университет»
г. Новосибирск

Защита состоится:

«__» _____ 2015 г. в __:__ 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 «__» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.055.02
доктор физико-математических наук, профессор



Втюрин Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время наблюдается значительный прикладной интерес к сплошным поликристаллическим и эпитаксиальным плёнкам нанометровых толщин, которые используются в роли проводников и изоляторов в микро- и нанoeлектронике. Особую ценность для таких сплошных плёнок имеют ферромагнитные материалы в связи с потенциалом их применения в различных устройствах спинтроники [1, 2]. Например, многослойные структуры с интерфейсом ферромагнетик/полупроводник могут использоваться для создания спинового вентиля, в котором возможно изменять спиновый ток, управляя состояниями намагниченности ферромагнитных слоёв [3].

Высокий коэффициент спиновой инжекции в таких устройствах наблюдается в случае высокой степени спиновой поляризации ферромагнетика и резкого интерфейса между ферромагнетиком и полупроводником [4], причем такой интерфейс достаточно затруднительно реализовать на практике. Как правило, проблема создания подобного интерфейса решается эпитаксиальным ростом тонких плёнок ферромагнетика на полупроводнике. В роли полупроводника в устройствах спинтроники хорошо зарекомендовал себя кремний в связи с малой величиной его спин-орбитального взаимодействия и большой длиной спиновой диффузии [5]. Учитывая доминирующие позиции в современной микроэлектронике кремниевых технологий, актуальным является как создание ферромагнитных материалов на основе силицидов 3d-металлов, производство которых требует минимальных изменений существующих технологических процессов, так и формирование плёнок этих силицидов на полупроводнике с резкой границей раздела. Особый интерес представляют магнитные системы Fe/Si, в том числе богатые железом ферромагнитные силициды Fe_5Si_3 и Fe_3Si . Силицид Fe_5Si_3 , имплантированный в кремний, демонстрирует эффект гигантского магнетосопротивления 2400% [4], но в объёмном состоянии существует только при температурах от 825 до 1060 °C. Однако известны работы, в которых с помощью высокочастотного распыления

сплава Fe-Si на кварцевую подложку при 250 °C удалось сформировать стабильный при комнатной температуре силицид Fe_5Si_3 в виде поликристаллических плёнок [6] и нанонитей с помощью химического осаждения из газовой фазы [7]. В свою очередь, силицид Fe_3Si обладает высоким коэффициентом спиновой поляризации электронов [8] и может быть выращен эпитаксиально на монокристалле Si(111) [9].

Для данных силицидов проведено большое количество исследований по определению структурных, магнитных, транспортных и оптических свойств на различных типах подложек [4, 6, 10, 11], но по-прежнему невыясненными остаются их спектральные магнитооптические свойства.

Обычно для проведения исследований физико-химических свойств данных силицидов образцы извлекаются на воздух и проходят специальную подготовку, которая может существенно изменить их свойства. Для анализа электронных и магнитных свойств чаще всего применяют оптическую спектроскопию, магнитометрию, ядерный магнитный резонанс и измерение магнитотранспортных свойств. Такой комплекс измерений может занимать много времени и не всегда удобен для тонкоплёночных образцов с развитой поверхностью или малым количеством ферромагнитного материала. Особые трудности появляются при попытке проведения *in situ* анализа электронных свойств перечисленными методами, что крайне важно с точки зрения чистоты эксперимента и повторяемости результатов. В связи с этим важное практическое значение имеют *in situ* методы анализа, которые непосредственно в процессе формирования структуры позволяют получить количественную информацию о строении её поверхности и магнитных свойствах.

В последние десятилетия в роли неразрушающего *in situ* метода анализа поверхности зарекомендовала себя отражательная спектральная эллипсометрия [12], которая обладает такими преимуществами, как быстрое действие и поверхностная чувствительность. При аппаратной доработке и развитии алгоритмов анализа появляется возможность применения данного метода для измерения спектральных оптических и магнитооптических свойств, контроля морфологии поверхности и магнитного состояния ферромагнитной структуры.

Таким образом, анализ морфологии поверхности, магнитных и спектральных магнитооптических свойств перспективных низкоразмерных систем Fe-Si методом отражательной спектральной магнитоэллипсометрии является достаточно актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является получение плёнок метастабильной при комнатной температуре фазы силицида Fe_5Si_3 , исследование оптических и магнитооптических свойств силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si .

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

1. Определить технологические условия формирования метастабильной при комнатной температуре фазы силицида Fe_5Si_3 и исследовать её структурные свойства;

2. Установить влияние эффективной толщины исходной композиционной структуры Fe-Si в стехиометрическом соотношении 5:3 на морфологию формирующейся структуры;

3. Измерить дисперсии коэффициентов преломления и поглощения фазы силицида Fe_5Si_3 в диапазоне длин волн $250 \div 1000$ нм при комнатной температуре. Определить магнитные характеристики силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si методом магнитоэллипсометрии;

4. Измерить дисперсии магнитного кругового дихроизма для силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si методом магнитоэллипсометрии в диапазоне длин волн $250 \div 825$ нм.

Научная новизна

Работа содержит новые экспериментальные и методологические результаты:

1. Методом термического испарения в сверхвысоком вакууме получены сплошные и островковые плёнки Fe_5Si_3 . Для поликристаллической плёнки Fe_5Si_3 исследованы структурные свойства и впервые измерена дисперсия оптических постоянных в диапазоне длин волн $250 \div 1000$ нм методом спектральной эллипсометрии.

2. Создана оптическая модель случайно-распределённых дисков на поглощающей подложке, позволяющая методом *in situ* спектральной эллипсометрии контролировать морфологию формирующихся структур.

3. Впервые измерены спектральные зависимости магнитного кругового дихроизма и полевые зависимости эллипсометрических параметров для плёнок Fe_5Si_3 и Fe_3Si методом спектральной магнитоэллипсометрии.

Практическая значимость работы

Предложенный способ получения сплошной поликристаллической плёнки и островковых структур силицида железа Fe_5Si_3 на слое SiO_2 может быть использован для создания устройств спинтроники.

Показана возможность применения *ex situ* и *in situ* спектральной магнитоэллипсометрии для проведения фундаментальных исследований структурных и магнитных свойств, анализа недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости ферромагнитных материалов.

Впервые определены дисперсии коэффициентов преломления и поглощения поликристаллической пленки Fe_5Si_3 в диапазоне длин волн $250 \div 1000$ нм и впервые измерены дисперсии магнитного кругового дихроизма для поликристаллической плёнки Fe_5Si_3 толщиной 27 нм на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и эпитаксиальной монокристаллической плёнки Fe_3Si на подложке $\text{Si}(111)$ в диапазоне длин волн $250 \div 825$ нм. Полученные данные могут использоваться в дальнейшем для контроля процессов формирования силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si .

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты определения технологических условий сверхвысоковакуумного термического напыления для образования сплошной поликристаллической плёнки метастабильной при комнатной температуре фазы силицида Fe_5Si_3 .

2. Результаты исследования влияния эффективной толщины исходной композиционной структуры Fe-Si в стехиометрическом соотношении 5:3 на морфологию формирующейся структуры с применением методов атомно-силовой микроскопии, растровой электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии.

3. Результаты измерения дисперсии коэффициентов преломления и поглощения силицида Fe_5Si_3 в диапазоне длин волн $250 \div 1000$ нм при комнатной температуре методом спектральной эллипсометрии.

4. Результаты исследования спектральных зависимостей магнитного кругового дихроизма и полевых зависимостей эллипсометрических параметров плёнок $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ методом магнитоэллипсометрии.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на всероссийских и международных конференциях: V-м Европейско-азиатском симпозиуме «Trends in magnetism», EASTMAG-2013 (г. Владивосток, Россия, 15-21 сентября 2013 г.); I-ой азиатской школе-конференции по физике и технологии наноструктурированных материалов, ASCO-NANOMAT 2011 (г. Владивосток, Россия, 21-27 августа 2011 г.); XIX-м Международном симпозиуме «Нанозифика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2015 г.); 6-ой Байкальской международной конференции «Magnetic Materials. New Technologies», VICMM-2014 (д. Большое Голоустное, Иркутская область, Россия, 19-23 августа 2014 г.); II-ой Всероссийской научной конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов», МИССФМ-2 (г. Новосибирск, Россия, 21-25 октября 2013 г.); X-м Сибирском семинаре по сверхпроводимости и физике наноструктур ОКНО-2014 (г. Новосибирск, 13-14 ноября 2014 г.); Международной научной конференции «Решетневские чтения» (г. Красноярск, Россия, 2009, 2010 и 2011 гг.).

Личный вклад автора состоит в определении технологических условий формирования сплошной поликристаллической плёнки и островковых структур Fe_5Si_3 . Автором проведены все эллипсометрические и магнитоэллипсометрические измерения, представленные в работе, а также все этапы статистической обработки и моделирования. Автор принимал активное участие на всех этапах получения и анализа экспериментальных данных, создания экспериментальных образцов и написании статей совместно с сотрудниками лабораторий физики магнитных явлений, кристаллофизики, когерентной оптики ИФ СО РАН.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка используемой литературы. Общий объём диссертации составляет 149 страниц, включая 65 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 108 наименований.

Основное содержание работы

Во введении сформулированы цель и задачи работы, обозначены актуальность исследования, научная новизна и практическая значимость результатов, обоснованы выносимые на защиту положения, определена структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору основных результатов и известных разработок по методу отражательной спектральной магнитоэллипсометрии для исследования оптических и магнитооптических свойств силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si . В данном разделе приводятся традиционные модели анализа эллипсометрических данных для получения информации об оптических свойствах образца. В главе даётся широкий обзор методов и подходов при измерении магнитооптических характеристик непрозрачных ферромагнитных структур. Показаны потенциальные возможности спектральной эллипсометрии для анализа магнитооптических данных в *in situ* исследованиях.

Во второй главе представлены основные аппаратные средства и методы исследования экспериментальных образцов. Кратко изложены физические основы, а также достоинства и недостатки таких методов, как магнитоэллипсометрия, атомно-силовая и растровая электронная микроскопии, рентгеновская спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, дифракция отраженных быстрых электронов. Приведено краткое описание экспериментальной установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара», на которой были синтезированы экспериментальные образцы.

Представлены результаты разработки эллипсометрической модели случайно-распределённых дисков на поглощающей подложке для анализа морфологии исследуемых структур методом спектральной эллипсометрии. В основе модели лежит статистический метод описания двумерных распределений островков. Были найдены выражения для доли заполнения η поверхности образца кластерами, представляющими собой группы пересекающихся дисков, и для количества парциальных волн m при отражении света от таких кластеров в приближении геометрической оптики:

$$\eta = 1 - \exp(-\pi R^2 n), \quad m = \left\lfloor \frac{\pi R \sqrt{1-\gamma}}{8 \cdot d \cdot \gamma \cdot (1-\eta)} \right\rfloor, \quad \gamma = \frac{N_0}{N_1} \sin \varphi_0 \quad (1)$$

где n – поверхностная концентрация пересекающихся дисков, R и d – их средние радиус и высота, N_0 и N_1 – соответственно коэффициенты преломления окружающей среды и вещества дисков, φ_0 – угол падения света относительно нормали к поверхности образца.

Было установлено, что для протяжённых сильно-поглощающих дисков модель не позволяет достоверно определить их размеры и концентрацию на поверхности. Качественный анализ в этом случае возможен только для доли поверхности, занимаемой островками. Тем не менее, разработанная оптическая модель имеет преимущества перед электростатическими моделями среды при анализе островковой пленки, когда размеры островков и/или расстояния между ними более 10 % от длины волны зондирующего излучения.

Для расчёта магнитооптических параметров по данным спектральной магнитоэллипсометрии была проведена модификация алгоритма, разработанного авторами работы [13]. Проведённая модификация позволила значительно сократить время измерений и уменьшить суммарную статистическую погрешность за счёт использования спектральной зависимости комплексного коэффициента преломления ферромагнетика, которая измеряется обычной эллипсометрической методикой. Особое внимание было уделено статистической обработке и расчёту погрешностей магнитоэллипсометрических измерений.

В данной главе был также предложен алгоритм поиска множества решений обратной задачи эллипсометрии методом симплекс-оптимизации Нелдера-Мида, использующий сетку из прямых и отражённых начальных симплексов в пространстве искомых параметров оптимизации.

Третья глава посвящена результатам исследования влияния технологических условий на формирование метастабильной при комнатной температуре фазы силицида Fe_5Si_3 . Было установлено, что метод поочередного осаждения тридцати шести субнанометровых слоёв Fe и Si на холодную поверхность $\text{SiO}_2(\sim 14 \text{ нм})/\text{Si}(100)$ с последующим отжигом образца при температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет получить поликристаллическую плёнку Fe_5Si_3 с двумя преимущественными ориентациями кристаллитов в плоскостях (002) и (112). Для такой плёнки были впервые определены дисперсии коэффициентов преломления и поглощения в приближении объёмной среды методом многоугловой спектральной эллипсометрии (рисунок 1).

При уменьшении эффективной толщины исходной композиционной структуры Fe-Si вплоть до 8 нм, технологический регламент получения фазы Fe_5Si_3 не меняется, однако структура формировалась в виде островков. Дальнейшее уменьшение эффективной толщины (до 6 и 4 нм) композиционной структуры Fe-Si в стехиометрическом соотношении 5:3 также приводит к формированию островковых структур.

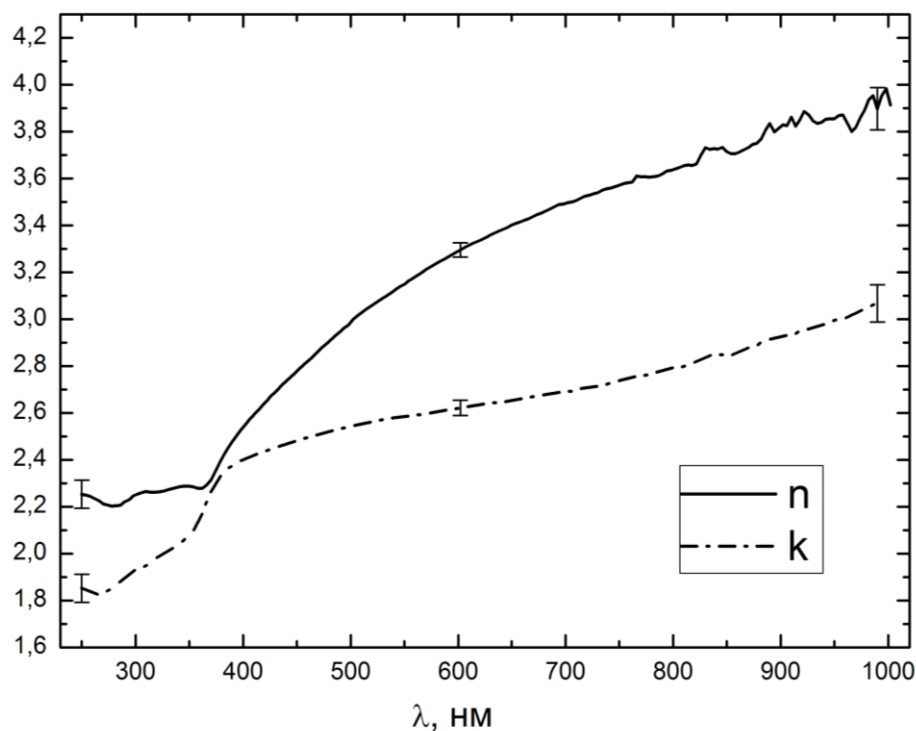


Рисунок 1 – Измеренная дисперсия комплексного коэффициента преломления Fe_5Si_3

Результаты анализа атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии показали, что размер, концентрация на поверхности и форма островков зависят от количества осажденного Fe-Si и температуры отжига. Полученные результаты микроскопических исследований согласуются с результатами моделирования по данным спектральной эллипсометрии.

В четвёртой главе представлены результаты исследования магнитооптических свойств структур $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ методом спектральной магнитоэллипсометрии в конфигурации экваториального эффекта Керра. На примере плёнки $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ была отработана методика *in situ* исследований магнитных свойств. Найденные для образца $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ коэрцитивная сила и поле насыщения составили 129 ± 6 Э и 450 Э соответственно. Полученные значения близки к значениям для аналогичных структур железа, найденных другими исследователями [14]. Исследования магнитных свойств пленок $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ позволили определить величины коэрцитивной силы и поля насыщения для каждого из образцов. Для $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ величина коэрцитивной

силы и поле насыщения образца составили 41 ± 11 Э и 200 ± 50 Э. Анализ магнитных свойств структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ показал величину коэрцитивной силы 39 ± 12 Э и поле насыщения 100 Э.

Методами *ex situ* спектральной магнитоэллипсометрии впервые измерена энергетическая зависимость магнитооптического параметра Фогта и магнитного кругового дихроизма (МКД) для структур $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ в диапазоне 1.5 ÷ 4.9 эВ (рисунок 2с и 2д).

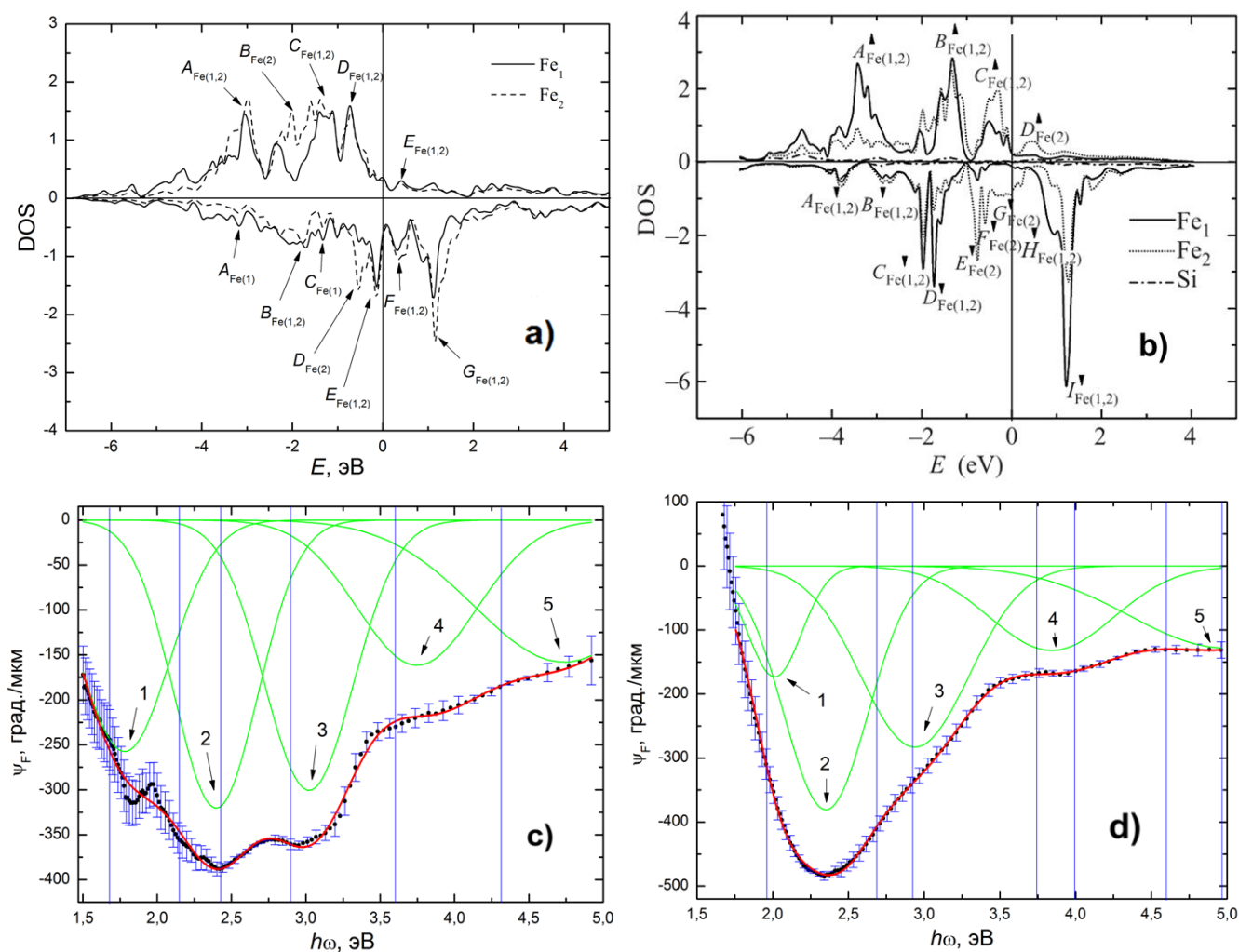


Рисунок 2 – а) и б) – ab initio расчёты спин-поляризованной плотности электронных состояний для Fe_5Si_3 и Fe_3Si [15] соответственно; с) и д) – спектры МКД для Fe_3Si_3 и Fe_3Si с разложением на серию гауссианов (вертикальными линиями показаны вероятные межзонные переходы электронов по данным плотности электронных состояний)

Разложением дисперсионных зависимостей МКД на гауссовы пики и сравнением полученных данных с результатами расчётов спин-зависимой плотности электронных состояний (рисунок 2а и 2b) были выявлены наиболее вероятные межзонные переходы электронов в обоих силицидах. Лучшее совпадение пиков МКД с вероятными межзонными переходами по DOS качественно указывает на более высокую концентрацию поверхностных атомов в плёнке $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$, чем в $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$.

В заключении сформулированы основные результаты исследования:

1. Предложен способ получения метастабильной при комнатной температуре фазы силицида Fe_5Si_3 в виде плёнки на подложке $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$. Методом рентгеноструктурного анализа определены параметры гексагональной кристаллической решетки Fe_5Si_3 : пространственная группа $P6_3/mc$; параметры ячейки $a = 0.743$ нм; $c = 0.4683$ нм; объем элементарной ячейки 0.224 нм³. Поликристаллическая плёнка Fe_5Si_3 толщиной 27 нм имеет размер кристаллитов 13.7 нм и преимущественную ориентацию кристаллитов в плоскостях (002) и (112).

2. Методами рентгеноструктурного анализа, атомно-силовой микроскопии, растровой электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии с применением предложенной оптической модели случайно-распределённых дисков на поглощающей подложке установлено, что уменьшение эффективной толщины исходной композиционной структуры Fe-Si вплоть до 8 нм не меняет технологический регламент получения фазы Fe_5Si_3 , которая теперь формируется в виде островков. Дальнейшее уменьшение эффективной толщины (до 6 и 4 нм) композиционной структуры Fe-Si в стехиометрическом соотношении 5:3 также приводит к формированию островковых структур со средним диаметром кластеров 98 и 66 нм и концентрацией поверхностного распределения пересекающихся кластеров 57 и 170 $\mu\text{км}^{-2}$ соответственно, однако в этом случае подтвердить формирование фазы Fe_5Si_3 не удалось.

3. Впервые определены дисперсии коэффициентов преломления и поглощения поликристаллической пленки Fe_5Si_3 (толщиной 27 нм) в диапазоне длин волн $250 \div 1000$ нм при комнатной температуре с помощью метода спектральной эллипсометрии. Методом магнитоэллипсометрии измерена петля гистерезиса и определены магнитные характеристики структуры $\text{Fe}_5\text{Si}_3(27 \text{ нм})/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$, такие как величина коэрцитивной силы $H_C = 41 \pm 11$ Э и поле насыщения $H_S = 200 \pm 50$ Э.

4. Впервые измерена дисперсия магнитного кругового дихроизма для поликристаллической плёнки Fe_5Si_3 толщиной 27 нм на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ и эпитаксиальной монокристаллической плёнки Fe_3Si на подложке $\text{Si}(111)$ методом спектральной магнитоэллипсометрии в диапазоне длин волн $250 \div 825$ нм. Установлено соответствие выявленных пиков дихроизма и энергий межзонных переходов электронов в этих соединениях, полученных из *ab initio* расчётов спин-зависимой плотности состояний.

Публикации автора по теме диссертации

1. Лященко, С.А. Исследование оптических и магнитооптических спектров магнитных силицидов Fe_5Si_3 и Fe_3Si методом спектральной магнитоэллипсометрии / С.А. Лященко, З.И. Попов, С.Н. Варнаков, Е.А. Попов, М.С. Молокеев, И.А. Яковлев, А.А. Кузубов, С.Г. Овчинников, Т.С. Шамирзаев, А.В. Латышев, А.А. Саранин // **ЖЭТФ**. – Т. 147, № 5. – 2015. – С. 1-9.

2. Лященко, С.А. Исследования магнитооптических свойств тонких слоев Fe *in situ* методами / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, С.Н. Варнаков, Д.В. Шевцов, В.А. Швец, В.Н. Заблуда, С.Г. Овчинников, Н.Н. Косырев, Г.В. Бондаренко, С.В. Рыхлицкий // **ЖТФ**. – Т. 83, № 10. – 2013. – С. 139-142.

3. Lyaschenko, S.A. Determination of structural parameters of the Fe-Si-system by spectral ellipsometry method / S.A. Lyaschenko, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov, E.P. Berezitskaya, G.A. Alexandrova, O.P. Vaituzin // **Physics Procedia**. – Vol. 23. – 2012. – P. 49-52.

4. Лященко, С.А. Автоматизация магнитоэллипсометрических *in situ* измерений на сверхвысоковакуумном комплексе для синтеза и исследования материалов спинтроники / С.А. Лященко, С.Н. Варнаков, И.А. Тарасов, Д.В. Шевцов, С.Г. Овчинников // **Вестник СибГАУ**. – Т. 44, Вып. 4. – 2012. – С. 162-167.

5. 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**. – Т. 30. – Вып. 4. – 2010. – С. 45-51.

6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610242 «Градиент SE» / С.А. Лященко, Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников, И.А. Яковлев. – Зарегистрировано 11 января 2011 г.

7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618677 «Система регистрации и анализа магнитоэллипсометрических данных (Valnadin)» / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков, В.Н. Заблуда, С.Г. Овчинников, Д.В. Шевцов. – Зарегистрировано 24 сентября 2012 г.

8. Свидетельство о гос. регистрации **программы для ЭВМ № 2013617818** «Автоматизированный комплекс для управления технологическими процессами получения тонких структур металла на полупроводнике, используя измерение и анализ магнитоэллипсометрических данных (Valnadin Auto)» / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, Д.В. Шевцов, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников. – Зарегистрировано 23 августа 2013 г.

9. Lyaschenko, S.A. The *in situ* magneto ellipsometry method in the study magneto optical properties of the iron thin films / S.A. Lyaschenko, I.A. Tarasov, S.N. Varnakov, D.V. Shevtsov, V.A. Shvets, V.N. Zabluda, S.G. Ovchinnikov, N.N. Kosyrev, G.V. Bondarenko, S.V. Rykhlytskii, A.V. Latyshev, A.A. Saranin // V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism (EASTMAG-2013): Abstracts. – Vladivostok: Directorate of publishing activities of Far Eastern Federal University, 2013. – P. 105.

10. Лященко, С.А. Метод *in situ* магнитоэллипсометрии в исследовании магнитооптических свойств тонких слоев железа / С.А. Лященко, С.Г. Овчинников, С.Н. Варнаков, Д.В. Шевцов // 2-ая Всероссийская конференция «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов» (МИССФМ-2013), г. Новосибирск, 21-25 октября 2013. – С. 179-180.

11. Лященко, С.А. Магнитооптические свойства плёнок $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ и $\text{Fe}_5\text{Si}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ / С.А. Лященко, З.И. Попов, С.Н. Варнаков, М.С. Молокеев, И.А. Яковлев, С.Г. Овчинников // Тезисы докладов VI Байкальской Международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (ВМСММ-2014), г. Иркутск, 19-23 августа 2014 г. – С. 141.

12. Лященко, С.А. Многократное отражение света в тонком слое для дисков и однородной пленки, имеющей случайные цилиндрические включения / С.А. Лященко, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников // Материалы XV Международной научной конференции «Решетневские чтения», (г. Красноярск, Россия, 2011 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2011. – С. 469-470.

13. Лященко, С.А. Метод спектральной эллипсометрии при элементно-градиентном сканировании поверхности монокристаллического кремния с

эпитаксиальным слоем железа / С.А. Лященко, С.Н. Варнаков, О.П. Вайтузин, Г.А. Александрова, Е.П. Березицкая // Материалы XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения», (г. Красноярск, Россия, 2009 г.). – Красноярск: СибГАУ. – 2009. – С. 683-684.

Список цитируемой литературы

1. Prinz, G.A. Spin-polarized transport // *Physics Today*. – Vol. 48. No. 4. – 1995. – P. 353.
2. Bader, S.D. Spintronics / S.D. Bader, S.S.P. Parkin // *Annual Review of Condensed Matter Physics*. – Vol. 1. – 2010. – P. 71-88.
3. Monsma, D.J. Perpendicular Hot Electron Spin-Valve Effect in a New Magnetic Field Sensor: The Spin-Valve Transistor / D.J. Monsma, J.C. Lodder, Th. J.A. Popma et al. // *Phys. Rev. Lett.* – Vol. 74, No. 26. – 1995. – P. 5260-5263.
4. Srivastava, P.C. Giant magnetoresistance (GMR) in swift heavy ion irradiated Fe films on c-silicon (Fe_c-Si) / P.C. Srivastava, J.K. Tripathi // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – Vol. 39. – 2006. – P. 1465-1471.
5. Appelbaum, I. Electronic measurement and control of spin transport in silicon / I. Appelbaum, B. Huang, D.J. Monsma // *Nature*. – Vol. 447. – 2007. – P. 295-298.
6. Sawatzky, E. Magnetic and magnetooptical properties of sputtered Fe₅Si₃ films / E. Sawatzky // *IEEE Trans. Magn.* – Vol. 7. – 1971. – P. 374-376.
7. Varadwaj, K.S.K. Phase-controlled growth of metastable Fe₅Si₃ nanowires by a vapor transport method / K.S.K. Varadwaj, K. Seo, J. In // *J. Am. Chem. Soc.* – Vol. 129. – 2007. – P. 8594-8599.
8. Maeda, Y. Magneto-optical properties of iron based Heusler alloy epitaxial films on Ge(111) / Y. Maeda, T. Ikeda, T. Ichikawa et al. // *Physics Procedia*. – Vol. 11. – 2011. – P. 200–203.
9. Яковлев, И.А. Исследование структурных и магнитных характеристик эпитаксиальных пленок Fe₃Si/Si(111) / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков, Б.А. Беляев и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – Т. 99, вып. 9. – 2014. – С. 610- 613.

10. Nakane, R. Preparation and characterization of ferromagnetic DO_3 -phase Fe_3Si thin films on silicon-on-insulator substrates for Si-based spin-electronic device applications / R. Nakane, M. Tanaka, S. Sugahara // *Appl. Phys. Lett.* – Vol. 89. – 2006. – P. 192503.

11. Noor, S. Surface morphology and atomic structure of thin layers of Fe_3Si on $\text{GaAs}(001)$ and their magnetic properties / S. Noor, I. Barsukov, M.S. Özkan et al. // *J. Appl. Phys.* – Vol. 113. – 2013. – P. 103908.

12. Ржанов, А.В. Основы эллипсометрии / А.В. Ржанов, К.К. Свиташев, А.И. Семенов и др. – Новосибирск: Наука, 1979. – 419 с.

13. Rauer, R. Temperature-dependent spectral generalized magneto-optical ellipsometry for ferromagnetic compounds / R. Rauer, G. Neuber, J. Kunze et al. // *Rev. Sci. Instrum.* – Vol. 76. – 2005. – P. 023910.

14. Яковлев, И.А. Получение, структура и магнитные свойства тонкоплёночных силицидов железа: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Яковлев Иван Александрович. – Красноярск, 2014. – 139 с.

15. Тарасов, И.А. Оптические свойства эпитаксиальной пленки силицида железа $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ / И.А. Тарасов, З.И. Попов, С.Н. Варнаков и др. // *Письма в ЖЭТФ.* – Т. 99, вып. 10. – 2014. – С. 651-655.

Лященко Сергей Александрович

МОРФОЛОГИЯ, МАГНИТНЫЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР Fe-Si

автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 24.03.2015. Заказ № 2

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 60 экз.

Типография ФГБУН Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50