

На правах рукописи

Иванченко Максим Викторович

**РОСТ ПЛЁНОК ЖЕЛЕЗА И СИЛИЦИДОВ ЖЕЛЕЗА
НА АТОМАРНО-ЧИСТОЙ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ БОРОМ
ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ Si(111)**

Специальность - 01.04.07
Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Владивосток
2006

Работа выполнена в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Зотов Андрей Вадимович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Осуховский Валерий Эдуардович

кандидат физико-математических наук
Огнев Алексей Вячеславович

Ведущая организация: **Институт материаловедения Хабаровского
научного центра ДВО РАН (ИМХНЦ ДВО
РАН), г. Хабаровск**

Защита состоится «6» сентября 2006 г. в «13» часов на заседании
регионального диссертационного совета Д 212.056.08 по защите диссертаций на
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук при
Дальневосточном государственном университете (ДВГУ) по адресу:
690950, г. Владивосток, ГСП, ул. Суханова, 8.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале №2 библиотеки
Дальневосточного государственного университета по адресу:
690950, г. Владивосток, ГСП, ул. Суханова, 8.

Автореферат разослан «4» сентября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



Соппа И.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интерес к эпитаксиальным плёнкам металла на кремнии, проявившийся в последние годы, вызван вполне понятными объективными причинами. Хорошо известен закон Мура, согласно которому «количество транзисторов, которое может быть помещено на квадратный дюйм кремниевой поверхности, удваивается каждые 12 месяцев» [1]. Постоянное уменьшение размеров устройств микроэлектроники необходимо, чтобы повысить их быстродействие и увеличить плотность размещения элементов на кристалле при производстве интегральных схем (ИС). Это вызывает также спрос на поиск новых материалов, в том числе на исследования сверхтонких слоёв металла на полупроводнике.

Важность создания тонких монокристаллических (или эпитаксиальных) плёнок металла с минимальным числом дефектов на кремниевой подложке очевидна – например, это путь к созданию металлических шин с высокой проводимостью и теплопроводностью, малыми временами задержки для ИС, путь к формированию надёжных многослойных нано-ИС. Существуют также другие возможности применения, часть из которых упомянута ниже.

Эпитаксия металлов реализуется достаточно редко. Это обусловлено необходимостью сочетания нескольких факторов. Во-первых, нужно чтобы параметры решётки у металла хотя бы в одной из плоскостей были бы близки к параметрам решётки поверхности кремния. Во-вторых, атомы таких металлов должны иметь подвижность на поверхности, достаточную для встраивания в регулярные положения кристаллической решётки и образования упорядоченных слоёв уже при комнатной температуре. Если температуру подложки во время осаждения плёнки (либо температуру отжига после осаждения плёнки) сделать выше некоторой критической температуры, происходит диффузия кремния и образование различных силицидов металлов. Хорошо изучены лишь несколько металлов, напыление которых на кремний уже при комнатной температуре приводит к эпитаксии – это марганец, железо, кобальт и медь.

Плёнки Fe привлекли наше внимание как объект исследования в силу нескольких весьма полезных с точки зрения технологии факторов.

- 1) Эпитаксиальные блочные плёнки железа на Si(111) могут иметь толщину более 30 нм [2]. При этом проводимость чистого железа только в два раза ниже, чем у чистой меди. Поэтому есть потенциальная возможность использования таких плёнок в качестве электрических проводников.
- 2) Чистое железо – ферромагнетик с большим магнитным моментом. Коэрцитивная сила эпитаксиальных плёнок Fe на Si(111) составляет около 8 Э, что примерно в 6 раз меньше коэрцитивной силы поликристаллических плёнок железа, сформированных на стекле или оксиде кремния [3]. Это даёт возможность интегрировать

чувствительные датчики магнитного поля вместе с электронными усилителями и другими устройствами в единой ИС на основе кремниевой технологии.

3) Дисульфид железа $\beta\text{-FeSi}_2$ является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны около 0,85 эВ (соответствует длине волны 1,46 мкм) при комнатной температуре, что близко к минимуму поглощения в оптоволокне на основе кремниевых соединений. Помимо этого, благодаря более высокому коэффициенту преломления $\beta\text{-FeSi}_2$ (5,6) по сравнению с кремнием (3,5), двойные гетероструктуры $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2/n\text{-Si}$ представляют огромный интерес в качестве светонизлучающих приборов[4].

Таким образом, структуры, образуемые железом на поверхности кремния, обладают огромным спектром потенциального применения в наиболее современных микроэлектронных отраслях и поэтому, несомненно, должны быть подробно исследованы. Это явным образом указывает на актуальность и своевременность данного исследования.

Целью диссертационной работы является исследование влияния условий роста на формирование плёнок железа и кластеров силицида железа на атомарно-чистой и модифицированной бором поверхностях $\text{Si}(111)$.

Для достижения указанной цели предполагалось решить следующие задачи:

1) Экспериментально исследовать процессы формирования границы раздела $\text{Fe}/\text{Si}(111)$ при осаждении плёнки Fe на подложку, нагретую до температуры, при которой происходит упорядочение атомов на межфазовой границе;

2) Изучить влияние условий осаждения на коэрцитивную силу плёнок Fe и на формирование границы раздела в системе $\text{Fe}/\text{Si}(111)$;

3) Исследовать возможность формирования резкой границы раздела между плёнкой железа и подложкой кремния с помощью пассивирования поверхности подложки бором;

4) Исследовать возможность формирования дисульфида железа на поверхностной фазе $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-B}$.

Научная новизна работы состоит в том, что:

-оптимизированы технологические условия получения эпитаксиальных плёнок железа с низкой коэрцитивной силой на чистом кремнии;

-показано, что поверхностная фаза $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-B}$ блокирует активное перемешивание на межфазовой границе железо – кремний, возникающее уже при комнатной температуре;

-впервые с помощью реактивной твердофазной эпитаксии железа на поверхностной фазе $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-B}$ получены островки дисульфида железа $\beta\text{-FeSi}_2$, плотность которых значительно превышает плотность островков на поверхности $\text{Si}(111)7\times7$, выращенных при аналогичных температурах и покрытиях;

-обнаружено формирование новых типов нанокластеров атомного масштаба при взаимодействии атомов Fe с поверхностями $\text{Si}(111)7\times7$ и $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-B}$;

-исследована третья оптическая гармоника на эпитаксиальных плёнках Fe на Si(111)7x7.

Практическая ценность исследования:

1. В ходе выполнения диссертационной работы были исследованы условия формирования эпитаксиальных плёнок железа с низкой коэрцитивной силой 6,2 Э на Si(111) при 150 °С. Результаты данного исследования могут быть использованы для создания датчиков магнитного поля, магнитных головок жёстких дисков.
2. В результате исследования адсорбции железа на поверхность Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В установлено, что модифицирование поверхности Si(111) бором блокирует реактивное взаимодействие на границе Fe/Si(111). Результаты исследования могут быть использованы для получения резкой межфазовой границы между кремниевой подложкой и осаждаемой плёнкой железа в спинтронике.
3. Показано, что размеры и плотность островков β -FeSi₂ на Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В варьируются при изменении количества железа и температуры. Данный результат представляет интерес для оптической нанoeлектроники.

Основные защищаемые положения:

1. В интервале скоростей осаждения Fe от 0,05 до 0,1 нм/мин и при температуре подложки Si(111)7x7 150 °С выращенные плёнки железа имеют эпитаксиальную структуру и характеризуются низкой коэрцитивной силой.
2. Формирование на поверхности Si(111) поверхностной фазы Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В приводит к блокированию реактивного взаимодействия осаждаемой плёнки Fe с поверхностью кремния.
3. В результате реактивной твердофазной эпитаксии покрытий Fe 0,05-0,5 моноатомных слоя при температурах 600-700 °С на поверхностной фазе Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В формируются только островки дисилицида железа β -FeSi₂.
4. На поверхности Si(111)7x7 в результате реактивной твердофазной эпитаксии в области покрытий Fe 0,05-0,5 моноатомных слоя при температурах 450-700 °С формируются кластеры силицида железа атомного масштаба - тримеры.
5. На поверхности Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В в результате реактивной твердофазной эпитаксии покрытий Fe 0,05-0,5 моноатомных слоя при температурах 450 °С получены кластеры силицида железа атомного масштаба, которые на СТМ изображениях выглядят как упорядоченная группа из девяти максимумов.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на Международном симпозиуме «Принципы и процессы создания неорганических материалов» (Вторые Самсоновские чтения) (г. Хабаровск, Россия, 4-6 ноября 2002 г.), Всероссийском совещании Кремний-2004 (г. Иркутск, Россия, 5-9 июля 2004 г.), X Международном семинаре «Дислокационная структура и

механические свойства металлов и сплавов» (ДСМСМС-2005), (г. Екатеринбург, Россия, 18-22 марта 2005 г.), Седьмой всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. Санкт-Петербург, Россия, 5-9 декабря 2005 г.), V и VI Международной очно - заочной научно - практической конференции студентов, аспирантов и молодых исследователей «Интеллектуальный потенциал ВУЗОВ на развитие Дальневосточного региона России» (г., Владивосток, Россия, 2003-2004 гг.), IX и X Конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (ПДММ – 2005, ПДММ – 2006, г., Владивосток, Россия, 2005-2006 гг.), а также 6th Российско-Японском семинаре по поверхностям полупроводников JRSS-6 (г. Тоёма, Япония, 10-17 октября 2004 г.). Доклады на конференциях неоднократно были отмечены почётными грамотами.

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликованы 8 статей в рецензируемых научных журналах.

Личный вклад автора заключается в участии в определении способов решения поставленных задач, приготовлении всех экспериментальных образцов с адсорбированными атомами железа, пересчитанных в экспериментальной части работы, проведении большей части экспериментов с использованием методов дифракции медленных электронов (ДМЭ), электронной оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ). Автор принимал активное участие в интерпретации полученных результатов, а также производил корректировку процедуры приготовления образцов при работе в соавторстве с исследовательскими группами, проводившими по просьбе автора исследования магнитоиндуцированных оптических гармоник и исследования поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Автором была получена часть изображений СТМ с атомарным разрешением, а также все кривые магнитного гистерезиса и значения коэрцитивной силы плёнок. Во всех совместных экспериментах и расчётах автор принимал активное личное участие вместе с коллективом сотрудников ИАПУ ДВО РАН, а также сотрудниками других организаций – соавторами совместных публикаций.

Участие соавторов публикаций заключалось в следующем: профессор, чл.-корр. РАН Лифшиц В.Г., а затем д.ф.-м.н. Зотов А.В. осуществляли руководство работой и внесли большой вклад в интерпретацию и представление для опубликования полученных результатов. Профессор, чл.-корр. РАН Саранин А.А., а также д.ф.-м.н., профессор Чеботкевич Л.А. участвовали в обсуждении результатов, а также внесли ряд ценных замечаний по оформлению публикаций и представлению результатов в печать. Д.ф.-м.н., профессор Акципетров О.А. осуществлял руководство при исследовании процессов генерации магнитоиндуцированных оптических гармоник, а также проводил их теоретическое исследование. Соавторы д.ф.-м.н. Астапова Е.С. и

к.ф.-м.н. Пивченко Е.Б. осуществляли рентгеновские исследования полученных плёнок. Соавторы д.ф.-м.н. Котляр В.Г., Утас О.А. участвовали в проведении исследований СТМ. Соавторы к.ф.-м.н. Чурусов Б.К. и Потапов С.В. участвовали в техническом оформлении экспериментов. Соавторы профессор, чл.-корр. РАН Устинов В.В., д.ф.-м.н. Солин Н.И., д.ф.-м.н. Гаврилюк Ю.Л., д.ф.-м.н. Коробцов В.В., д.ф.-м.н. Гриценко В.А., к.ф.-м.н. Ромашев Л.Н., Бехтерева О.В., а также коллега из Японии профессор Ино М. участвовали в обсуждении результатов. Соавторы к.ф.-м.н. Мурзина Т.В., к.ф.-м.н. Кузнецова С.В., к.ф.-м.н. Федянин А.М., Ким Е.М., Капра Р.В., Кравец А.Ф., участвовали в проведении экспериментов по генерации оптических гармоник и обсуждению результатов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Она содержит 163 страницы, в том числе 75 рисунков, список литературы на 9 листах, включающий 124 наименований, и 7 листов приложения.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, а также новизна и практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, структура диссертации.

Первая глава носит обзорный характер.

В первом параграфе рассматриваются условия формирования тонких плёнок и различные механизмы роста, а также методики эпитаксиального выращивания плёнок – молекулярно-лучевая эпитаксия и твердофазная эпитаксия. Также рассмотрены роль межфазовой границы при формировании плёнки и устойчивость поверхностных фаз к осаждению плёнок. Согласно литературным данным, одной из наиболее стабильных поверхностных фаз является фаза $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-B}$ [1]. В данной фазе атом бора находится не в положении адатома, как в случае, например, фазы $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} R30^\circ\text{-Ga}$, а располагается в позиции замещения атомов кремния второго слоя S_5 . Таким образом, атомы бора находятся под атомами кремния первого слоя. Предполагается, что данное обстоятельство определяет стабильность поверхностной фазы при осаждении на её поверхность аморфного кремния.

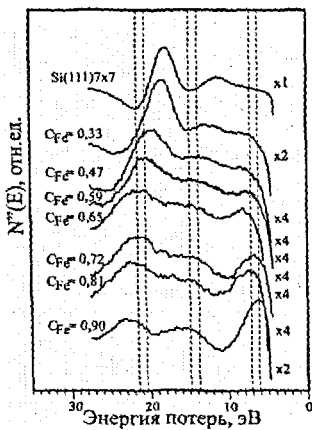
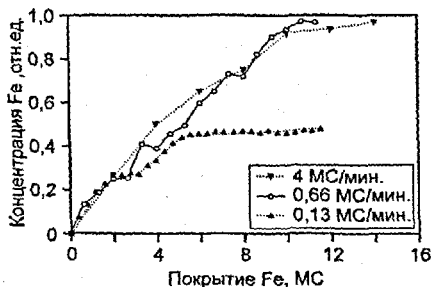
Во втором параграфе анализируются основные работы, посвященные адсорбции и эпитаксии Fe на поверхности кремния, а также способы формирования различных структур Fe/Si(111). Рассматриваются особенности формирования границы раздела Fe/Si(111) при различных температурах подложки[5]. Показано, что при комнатной температуре граница раздела Fe/Si(111) является реактивной, а на поверхности растущей плёнки развивается шероховатость. При 150 °С происходит улучшение структуры и уменьшение шероховатости на поверхности плёнки Fe толщиной около 2 МС. Показано, что образование нанокластеров полупроводникового дисилицида

железа $\beta\text{-FeSi}_2$ на поверхности Si(111) [6] сопровождается формированием других структур, например, структуры $2 \times 2\text{-Fe}$, ассоциируемой с металлическим дисилицидом $\gamma\text{-FeSi}_2$ [7,8]. Рассматривается рост плёнок Fe на различных буферных структурах, препятствующих реактивному взаимодействию Fe с поверхностью Si(111) [9,10,11].

В третьем параграфе рассматривается влияние структуры плёнок на их коэрцитивную силу [3] и проводимость [12]. Показано, что эпитаксиальный рост тонких плёнок приводит к улучшению этих параметров. В частности, коэрцитивная сила поликристаллических плёнок железа, по данным работы [3], более чем в 6 раз превышает коэрцитивную силу эпитаксиальных плёнок железа. Коэрцитивная сила обусловлена взаимодействием доменных границ (ДГ) со структурными дефектами плёнок [13]. В случае поликристаллических плёнок такими дефектами являются межзёрненные границы, шероховатость поверхности, дисперсия локальных осей кристаллографической анизотропии, микропоры. В случае эпитаксиальных плёнок закрепление ДГ происходит в основном на малоугловых межзёрненных границах, что определяет малую величину коэрцитивной силы.

Во второй главе кратко рассмотрены экспериментальные методы, использованные в данной работе, а именно: в первом параграфе - электронная спектроскопия (ЭС), а также количественный анализ концентрации вещества и толщины плёнки адсорбата на основе этого метода, во втором параграфе - дифракция медленных электронов (ДМЭ) и анализ поверхностных структур, в третьем параграфе - спектроскопия характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ) вместе с методикой исследования распределения концентрации элементов в приповерхностной области в зависимости от энергии первичного пучка электронов. Поскольку длина свободного пробега электронов в веществе зависит от энергии первичного пучка, это даёт возможность судить о распределении концентрации вещества по глубине. В четвёртом параграфе кратко обсуждается метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), а в пятом - методы генерации и анализ магнитоиндуцированных оптических гармоник. В шестом параграфе рассмотрено устройство экспериментальных установок «Riber» и «Omicron», в седьмом - методы очистки образцов и контроля методики приготовления образцов, в восьмом - методика приготовления качественных игл для СТМ экспериментов, а также особенности модернизированного для этого электронного устройства автоматического травления игл.

В третьей главе изложены основные результаты работы по исследованию адсорбции Fe на поверхность кремния ориентации (111) при температуре подложки 150°C . В первом параграфе приводятся результаты экспериментов по осаждению Fe со скоростями от 0,005 до 0,05 нм/мин. Показано, что при таких условиях на Si(111) формируется толстая плёнка силицида железа, состав которой медленно изменяется при увеличении количества осаждённого Fe от FeSi до Fe_xSi , где $x > 1$ и плавно возрастает с увеличением покрытия Fe (Рис. 1). Во втором параграфе рассмотрены



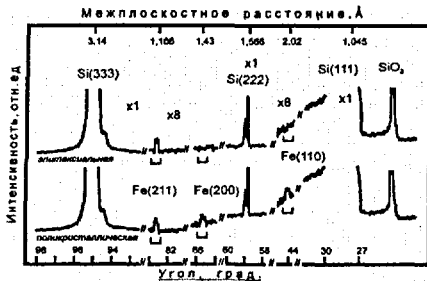
а
Рис. 1. а) Концентрационные кривые, рассчитанные по оже-интенсивностям методом коэффициентов элементной чувствительности (1 MC Fe = 0,08 нм). б) Спектры СХПЭ плёнки железа на различных стадиях роста, скорость осаждения 0,053 нм/мин. $E_p=300$ эВ. Объёмные плазмоны с энергией, характерной для силицидов $FeSi_2$ и $FeSi$, наблюдаются для кривых $C_{Fe}=0,59$ и $C_{Fe}=0,65$ соответственно.

б

процессы формирования межфазной границы при осаждении Fe со скоростями от 0,005 до 0,05 нм/мин. на $Si(111)7 \times 7$. Показано, что при толщине плёнки до 8 MC на поверхности $Si(111)$ формируются силициды железа, при большем покрытии происходит формирование эпитаксиальных плёнок Fe. Приведены экспериментальные данные, показывающие, что в таких эпитаксиальных плёнках обнаружена генерация третьей магнитоиндуцированной оптической гармоники (Рис. 2б). В третьем параграфе показано, что при осаждении Fe на $Si(111)$ при температуре подложки 150 °C со скоростями от 0,1 до 0,5 нм/мин. формируются поликристаллические плёнки железа с явно выраженной текстурой.

В четвертой главе обсуждаются результаты исследований адсорбции Fe при комнатной температуре на поверхность кремния ориентации (111), модифицированную бором.

В первом параграфе приводятся результаты адсорбции Fe при комнатной температуре на поверхность кремния, частично покрытую поверхностной фазой $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ -В. Показано, что при осаждении одинакового количества Fe на поверхность образцов кремния, доля покрытия поверхности фазой бора которых составляет Θ_1 и Θ_2 , где $\Theta_1 > \Theta_2$, большее количество Fe по данным ЭОС регистрируется на поверхности образца, доля покрытия поверхности фазой бора у которого больше. Показано, что такое поведение системы вызвано блокированием реактивного взаимодействия Fe с подложкой на участках поверхности, модифицированных бором. Рассмотрен вывод следующей формулы, позволяющей по оже-интенсивностям образцов с разной долей покрытия $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ -В, на



а

Рис. 2. а) Рентгеновский спектр плёнок железа толщиной 20 нм. В случае эпитаксиальной плёнки виден пик Fe(211), в случае поликристаллической - Fe(211), Fe(200), Fe(110). б) Интерферограммы интенсивностей второй (вверху) и третьей (внизу) гармоник от эпитаксиальной плёнки железа.



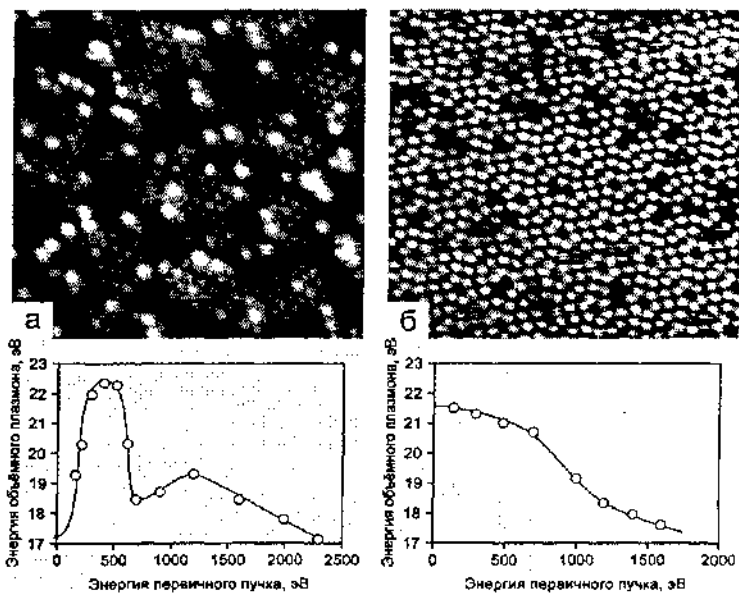
б

которые осаждалось одинаковое количество железа, оценить толщину осаждённой плёнки железа на реактивной границе раздела:

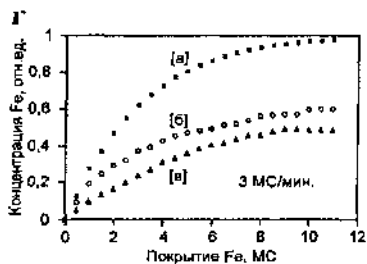
$$\frac{I_{Fe}^{\infty} \frac{1+r_{Si}(E_{Fe})}{1+r_{Fe}(E_{Fe})} \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{Fe}}{\lambda_{Fe}^{E_{Fe}} \cos \vartheta}\right)\right)}{I_{Si}^{\infty} \exp\left(-\frac{d_{Fe}}{\lambda_{Fe}^{E_{Fe}} \cos \vartheta}\right)} = 0,878 \cdot \frac{(1-\Theta_2) \cdot I_{Fe}^{\Theta_1} + (\Theta_1 - 1)I_{Fe}^{\Theta_2}}{(1-\Theta_1) \cdot I_{Si}^{\Theta_1} + (\Theta_1 - 1)I_{Si}^{\Theta_2}}$$

где r_i - факторы обратного рассеяния, λ_{Fe} - длина свободного пробега электронов в плёнке Fe при соответствующих энергиях оже-пиков, I_{Fe}^{∞} и I_{Si}^{∞} - оже-интенсивности толстой плёнки и подложки до осаждения, $I_{Fe}^{\Theta_i}$ и $I_{Si}^{\Theta_i}$ - экспериментально измеренные оже-интенсивности плёнки и подложки, ϑ - аппаратный угол спектрометра. Толщина плёнок оценивалась по приведённой формуле.

Во втором параграфе приведены результаты адсорбции Fe при комнатной температуре на поверхность кремния, полностью покрытую поверхностной фазой Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-В. При этом по данным СТМ рост на начальных стадиях осуществляется образованием островков Fe моноатомной высоты на поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-В (Рис. 3 а). Методом СТМ показано, что в отличие от поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-В, адсорбция аналогичного количества Fe на Si(111)7x7 приводит к формированию впадин на поверхности этой реконструкции, что явно указывает на реактивный характер взаимодействия осаждаемого Fe с поверхностью Si(111)7x7 (см. рис. 3 а,б). Исследование распределения концентрации Fe в приповерхностной области с помощью СХПЭЭ показало, что на Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-В плёнка чистого Fe образуется при той же толщине осаждённой плёнки, при

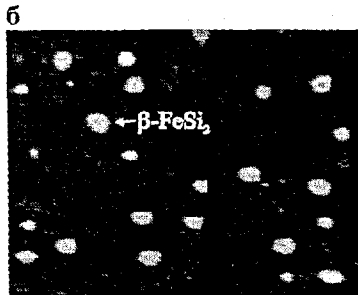
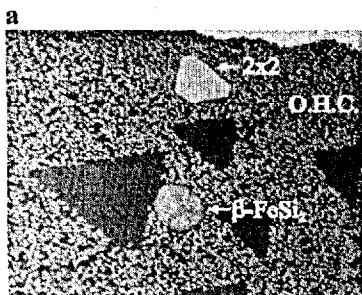
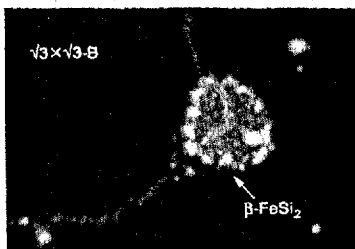
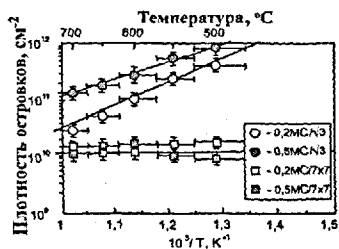


В
 Рис. 3. Картины СТМ от плёнки железа на различных этапах роста на реконструкциях Si(111) 7x7 и Si(111)√3x√3 R30°-B: а) 20x20 нм², 0,15 МС Fe при КТ на Si(111)√3x√3 R30°-B, 0,789 нА при 1,200 В на подложке; б) 20x20 нм², 0,15 МС Fe при КТ на Si(111)7x7, 0,509 нА при 0,833 В на подложке. в) Зависимость энергии объёмного плазмона в спектрах СХПЭЭ плёнки железа (8,8 МС), осаждённой на Si(111) 7x7, от энергии первичного пучка. г) Зависимость энергии объёмного плазмона в спектрах СХПЭЭ структуры Si(111)√3x√3 R30°-B – √3x√3 R30°-Fe (8,8 МС Fe) от энергии первичного пучка. д) Концентрационные кривые: [а] модель - послынный рост железа; [б] эксперимент - при осаждении железа на Si(111)√3x√3 R30°-B и [в] - при осаждении на Si(111) 7x7.



Д
 Кривая [б] совпадает с кривой послынного роста только при толщине плёнки Fe менее 1 МС. При большей толщине плёнки концентрация меньше расчётной, что указывает на островковый рост.

которой на атомарно-чистой поверхности Si(111) формируется силицид железа (см. рис. 3 в,г). С помощью метода ЭОС показано, что на поверхности Si(111)√3x√3 R30°-B происходит рост плёнки Fe по механизму Странски-Крастанова, т.е. послынно-



в

г

Рис. 4. а). Температурная зависимость общей плотности островков, сформированных с помощью ТФЭ на Si(111)7x7 и Si(111)√3x√3 R30°-B после осаждения покрытий 0,2 и 0,5 MC Fe. б). Изображение СТМ (300 x 225 Å², -1,9 В) заполненных состояний участка поверхности Si(111)√3x√3 R30°-B с нанокластером β-FeSi₂. Образец приготовлен осаждением на поверхность Si(111)√3x√3 R30°-B при комнатной температуре 0,2 MC Fe с последующим отжигом при 700 °С. в), г). Изображения СТМ (110 x 89 nm², -2,0 В) заполненных состояний поверхности Si(111) после осаждения при комнатной температуре 0,5 MC Fe с последующим отжигом при 700 °С в течение 5 мин.: в). поверхность Si(111)7x7. На изображении обозначены области неупорядоченной структуры (О.Н.С.), островки 2x2 и β-FeSi₂, а также области с реконструкцией 7x7. г). поверхность Si(111)√3x√3 R30°-B. На изображении присутствуют только нанокластеры β-FeSi₂.

островковый рост (Рис. 3 д). Также показано, что при адсорбции большого количества Fe на Si(111)√3x√3 R30°-B происходит рост поликристаллической плёнки Fe.

В пятой главе представлены результаты проведённого с помощью СТМ сравнительного исследования твердофазной эпитаксии слоёв Fe толщиной до 0,5 MC, осаждённых на Si(111)7x7 и Si(111)√3x√3 R30°-B с последующим отжигом при 450-700°C. Отмечено существенное различие в силицидообразовании на исследованных поверхностях.

В температурном диапазоне от 550 до 700 °C плотность нанокластеров на поверхности Si(111)√3x√3 R30°-B существенно превышает плотность на Si(111)7x7 (Рис. 4 а, в, г). Более того, нанокластеры на Si(111)√3x√3 R30°-B представлены только

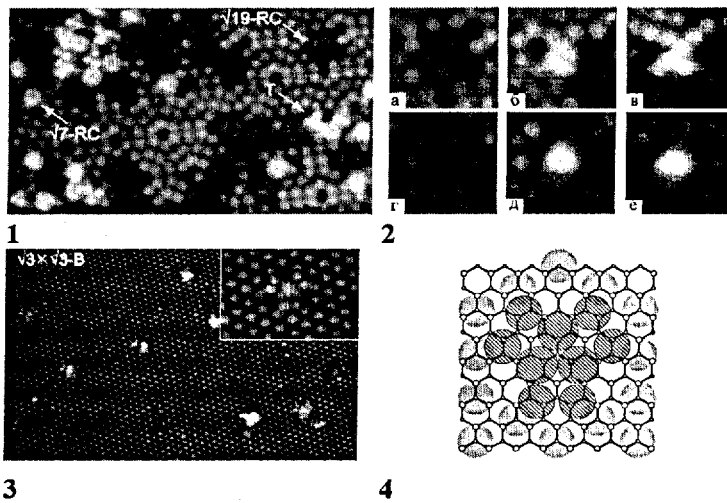


Рис. 5. 1) Изображение СТМ ($18 \times 10 \text{ nm}^2$, $-0,8 \text{ В}$) незаполненных состояний участка поверхности $\text{Si}(111)7 \times 7$ после осаждения при комнатной температуре $0,5 \text{ MC Fe}$ с последующим отжигом при $450 \text{ }^\circ\text{C}$. На изображении обозначены элементы, составляющие области неупорядоченной структуры “ 1×1 ” – RC: кольцевые кластеры двух типов ($\sqrt{19} \text{ RC}$, $\sqrt{7} \text{ RC}$) и тримеры (Т). 2) Изображения СТМ кластеров: (а), (г) - $\sqrt{19} \text{ RC}$, (б), (д) - $\sqrt{7} \text{ RC}$, (в), (е) – тримеры. Изображения (а), (б), (в) записаны в незаполненных состояниях, (г), (д), (е) - в заполненных состояниях. Масштаб: $30 \times 30 \text{ \AA}^2$. 3) Изображение СТМ ($340 \times 220 \text{ \AA}^2$, $+1,8 \text{ В}$) незаполненных состояний поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3} \text{ R}30^\circ\text{-B}$ после осаждения при комнатной температуре $0,5 \text{ MC Fe}$ с последующим отжигом при $450 \text{ }^\circ\text{C}$. На вставке изображён кластер атомных размеров при большем увеличении. 4) Схематическое изображение, показывающее расположение ярких максимумов кластера (заштрихованные окружности) и ярких максимумов $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3} \text{ R}30^\circ\text{-B}$ (серые окружности) по отношению к решётке $\text{Si}(111)1 \times 1$.

фазой $\beta\text{-FeSi}_2$ (Рис. 4 б), в то время как на $\text{Si}(111)7 \times 7$ помимо $\beta\text{-FeSi}_2$ присутствуют нанокластеры силицида $\gamma\text{-FeSi}_2$ со структурой 2×2 и металлическими свойствами [6,7], а также на данной поверхности всегда присутствуют области неупорядоченной структуры “ 1×1 ”-RC (такая структура образуется при адсорбции с последующим отжигом многих переходных металлов и описана, например, в работах [14,15]). Данный результат явно показывает преимущество модифицированной бором поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3} \text{ R}30^\circ\text{-B}$ перед $\text{Si}(111)7 \times 7$ в качестве вероятной подложки для создания светоизлучающих приборов на основе $\beta\text{-FeSi}_2$.

При сравнительно низкой температуре - порядка $450 \text{ }^\circ\text{C}$, на обеих поверхностях отмечено формирования кластеров атомного масштаба. В случае поверхности $\text{Si}(111)7 \times 7$, это кольцевые кластеры двух типов (а именно, $\sqrt{19} \text{ RC}$ [17] и $\sqrt{7} \text{ RC}$ [15]), а также кластеры нового типа, которые на СТМ – изображениях выглядят как

тримеры. В случае поверхности Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В, кластеры атомного масштаба выглядят на СТМ – изображениях как упорядоченные группы, каждая из которых состоит из 9 ярких максимумов (Рис. 5). Выяснение атомной структуры этих кластеров может дать дополнительную информацию для понимания процессов силицидообразования в атомном масштабе.

В шестой главе приведены результаты исследования магнитных свойств эпитаксиальных плёнок железа, выращенных на поверхности Si(111)7x7, и поликристаллических плёнок железа, выращенных на поверхностях Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-В, и для сравнения - на оксидной плёнке SiO₂ неочищенного образца Si(111) (Рис. 6). Приводится расчёт коэрцитивной силы с использованием структурных параметров плёнок, определённых с помощью использовавшихся при выполнении работы экспериментальных методик. Структурные параметры эпитаксиальных и поликристаллических плёнок приведены в таблице 6.1. Коэрцитивная сила оценивалась исходя из модели гибкой ДГ [13]:

$$H_c = (H_s^{3/2} + H_{cb}^{3/2} + H_{mb}^{3/2} + H_k^{3/2})^{2/3}$$

где H_s – компонента коэрцитивной силы, обусловленная взаимодействием ДГ с шероховатостями поверхности, H_{mb} – компонента, обусловленная магнитостатическим взаимодействием ДС с межзёрнными границами, H_{cb} – компонента, обусловленная магнитоупругим взаимодействием ДС с межзёрнными границами, H_k – компонента, обусловленная закреплением ДГ дисперсией локальных осей кристаллографической анизотропии.

Табл. 6.1 Структурные параметры плёнок железа.

Структура плёнки	R*, нм	a, нм	<D>, нм	l, нм	h, нм	d, нм	n, м ⁻²
Монокристаллическая	30,0	-	-	-	0,5-0,7	200	10 ¹⁵
Поликристаллическая	10,0	1,0	10,0	1,0	3,7	70	10 ¹⁶

R* – размер зерна в поликристаллической плёнке и размер блока – в эпитаксиальной.

Табл. 6.2 Коэрцитивная сила монокристаллической и поликристаллической плёнок железа.

Компоненты коэрцитивной силы, 4π/10 ³ А/м	Тип структуры	
	Монокристаллическая	Поликристаллическая
H_{cb}	5,0	17
H_{mb}	0	14
H_k	0	25

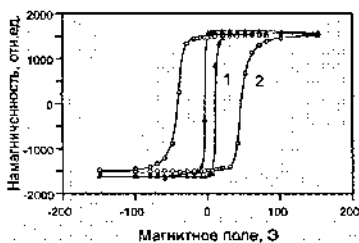
H_c	0	16
H_0 (теор. знач.)	5,0	46
H_c (экспер. знач.)	6,2±0,5	48±2

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ.

1. Установлено, что рост плёнки Fe на чистой поверхности кремния Si(111)7x7 при температуре подложки 150 °С сопровождается реактивным взаимодействием железа с кремнием и образованием силицидов FeSi₂ и FeSi. Показано, что при скорости осаждения плёнок Fe от 0,05 до 0,1 нм/мин происходит формирование эпитаксиальных плёнок железа.
2. Показано, что образование поверхностной фазы Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-B блокирует образование силицидов Fe. Плёнка Fe растёт послойно-островково (т.е. по механизму Странски-Крастанова).
3. Показано, что реактивная твердофазная эпитаксия (реактивная ТФЭ) покрытий Fe до толщин 0,5 монослоя на Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-B в интервале температур 600-700 °С приводит к формированию системы нанокластеров дисилицида железа β -FeSi₂. Острова со структурой 2x2, которые связывают с металлическим силицидом γ -FeSi₂, и неупорядоченные области при реактивной ТФЭ Fe на Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-B практически отсутствуют.
4. Получены тримеры на Si(111) 7x7 и нанокластеры атомных размеров на Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-B, которые на изображениях СТМ видны как образование из 9 ярких максимумов.
5. Предложен способ оценки толщины осаждённой плёнки на реактивной межфазовой границе.
6. Проведены теоретические оценки коэрцитивной силы плёнок Fe на Si(111) 7x7 и на Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ R30°-B, показано, что оцененные с учётом кристаллической структуры плёнок параметры коэрцитивной силы хорошо согласуются с экспериментально измеренными.

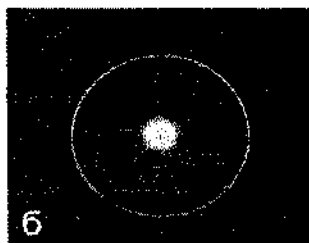
СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

- [1] *Лифшиц В.Г., Ретинский С.М.* Процессы на поверхности твердых тел. // Владивосток: Дальнаука. 2003. – 723 с.
- [2] *Wang M.H., Chen L.J.* Aligned and twinned growth of α -Fe thin films on atomically cleaned (111) Si at room temperature. // Appl.Phys.Lett. - 1993. - V. 62. N. 14. - P. 1603 – 1605.

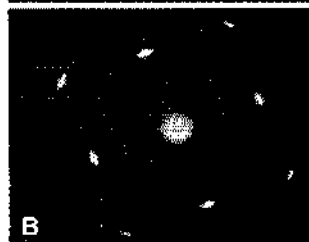


а

Рис. 6. а) Петли гистерезиса эпитаксиальной (1) и поликристаллической (2) плёнок железа толщиной 20 нм. б) Электронограммы (б,в) поликристаллической и эпитаксиальной плёнок железа соответственно.



б



в

- [3] Чеботкевич Л.А., Гаерликов Ю.Л., Камынина Ж.О., Качанова Л.Ю., Лифшиц В.Г., Сона И.В. Магнитные свойства эпитаксиальных плёнок железа на Si(111). // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1992. - V. 5. - С.118-123.
- [4] Bellani V., Guizzetti G., Marabelli F., Patrini M., Lagomarsino S., von Känel H. Optical functions of epitaxial β -FeSi₂ on Si(001) and Si(111). // Solid State Commun. -1995. - V.96. N.10. - P. 751-756.
- [5] Mascaraque A., Avila J., Teodorescu C., Asensio M.C., Michel E.G. Atomic structure of the reactive Fe/Si(111)7x7 interface. // Phys.Rev.B. - 1997. - V. 55., N. 12. - P. R7315 - R7318.
- [6] Manassen Y., Reaple H., Shneck R., Barlam D., Broknan A. Out-of-plane STM displacement measurements and evaluation of elastic fields in iron silicide islands on silicon. // Phys. Rev. B. - 2003. - V. 68., N. 075412. - P. 1 - 11.
- [7] Krause M., Blobner F., Hammer L., Heinz K., Starke U. Homogeneous surface iron silicide formation on Si(111): the $\alpha(8 \times 4)$ phase. // Phys. Rev. B. - 2003. - V. 68., N. 125306. - P. 1 - 10.
- [8] Christensen N.E. Electronic structure of β -FeSi₂. // Phys.Rev.B. - 1990. - V. 42., N. 11. - P. 7148 - 7153.
- [9] Gubbiotti G., Albini L., Tacchi S., Carlotti G., Gunnella R., De Crescenzi M. Structural and magnetic properties of epitaxial Cu/Fe/Cu/Si(111) ultrathin films. // Phys. Rev. B. - 1999. - V.60. N.24. - P. 17150-17161.
- [10] Bertocini P., Berling D., Wetzel P., Mehdaoui A., Loegel B., Gewinner G., Ulhaq-Bouillet C., Pierron-Bohnes V. Epitaxial magnetic Fe layers grown on Si(001) by means of a template method. // Surf.Sci. - 2000. - V. 454-456. - P. 755 - 760.

- [11] *Gubbiotti G., Carlotti G., D'Orazio F., Lucari F., Gunnella R., De Crescenzi M.* Perpendicular magnetization in epitaxial Cu/Fe/Cu/Si(111) ultrathin films. // *Surf.Sci.* - 2000. - V. 454-456. - P. 43 – 53.
- [12] *Kanagawa T., Hobara R., Matsuda I., Tanikawa T., Natori A., Hasegawa S.* Anisotropy in conductance of a quasi-one-dimensional metallic surface state measured by a square micro-four-point probe method. // *Phys. Rev. Lett.* - 2003. - V.91. N. 036805. - P. 1 – 4.
- [13] *Malyutin V.I., Osukhovskii V.E., Ivanov A.A., Cheboikevich L.A., Lobov L.V., Vorobiev Yu.D.* Effect of inhomogeneities on the coercivity of thin films. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. - 1986. - V.95. - P.585-595.
- [14] *Yao T., Shinabe S., Yoshimura M.* Atomic study of the formation process of Ni silicide on the Si(111)-7x7 surface with scanning tunneling microscopy. // *Appl.Surf.Sci.* - 1996. - V. 104-105., N. 1. - P. 213 – 217.
- [15] *Tsai M.-H., Dow J.D., Bennett P.A., Cahill D.G.* Electronic structure and stability of ring clusters in the Si(111)-(√7x√7) Co surface. // *Phys.Rev.B.* - 1993. - V. 48., N. 4. - P. 2486 – 2492.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Chebotkevich L.A., Ivanchenko M.V., Churusov B.K., Gavriljuk Y.L., Bekhtereva O.V., Astapova E.S., Pivchenko E.B., Lifshits V.G. Magnetic properties of epitaxial Fe films grown on clean Si(111) surface. // *Phys. Low-Dim. Struct.* 2003. V 9/10. P. 141-154.
2. Aktsipetrov O.A., Murzina T.V., Kim E.M., Kapra R.V., Fedyanin A.A., Inoue M., Kravets A.F., Kuznetsova S.V., Ivanchenko M.V., Lifshits V.G. Magnetization-induced second- and third-harmonic generation in magnetic thin films and nanoparticles. // *Journal of Optical Society of America B.* 2005. Vol. 22, No 1. P.138-147.
3. Мурзина Т.В., Ким Е.М., Капра Р.В., Акципетров О.А., Ивашченко М.В., Лифшиц В.Г., Кузнецова С.В., Кравец А.Ф. Генерация магнитноиндуцированной третьей гармоники в наноструктурах и тонких пленках. // *ФТТ.* 2005. Т. 47. С. 147-149.
4. Ивашченко М.В., Борисенко Е.А., Котляр В.Г., Утас О.А., Устинов В.В., Лифшиц В.Г. Увеличение плотности нанокластеров β -FeSi₂ на поверхности Si(111) с помощью формирования реконструкции Si(111)√3x√3 R30°-B. // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т.32. Вып.9. С.58-64.
5. Ivanchenko M.V., Borisenko E.A., Kotlyar V.G., Utas O.A., Ustinov V.V., Lifshits V.G. Increase in the Density of β -FeSi₂ Nanoclusters on a Si(111) surface by Means of Si(111)√3x√3 R30°-B Reconstruction. // *Tech. Phys. Lett.* 2006. Vol.32. N.5. P.396-398.

6. Aktsipetrov O.A., Kim E.M., Kapra R.V., Murzina T.V., Kravets A.F., Inoue M., Kuznetsova S.V., Ivanchenko M.V., Lifshits V.G. Magnetization-induced optical third-harmonic generation in Co and Fe nanostructures. // *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 73. No 140404(R). P.1-4.
7. Иванченко М.В., Борисенко Е.А., Чеботкевич Л.А., Гаврилюк Ю.Л., Коробцов В.В., Котляр В.Г., Утас О.А., Потапов С.В., Гриценко В.А., Лифшиц В.Г. Исследование роста плёнок железа при комнатной температуре на поверхностных фазах Si(111)7x7 и Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-B. // *Вестник ДВО*. 2006. Вып. 6 прил. С. 38-48.
8. Ivanchenko M.V., Borisenko E.A., Kotlyar V.G., Utas O.A., Zotov A.V., Saranin A.A., Ustinov V.V., Solin N.I., Romashev L.N., Lifshits V.G. Comparative STM study of SPE growth of FeSi₂ nanodots on Si(111) 7x7 and Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ R30°-B surfaces. // *Surface Science*. 2006. V. 600. N. 12. P. 2623-2628.

ПРИМЕЧАНИЕ

Автор выражает огромную признательность и глубокую благодарность своему научному руководителю Зотову Андрею Вадимовичу за неоценимые помощь и поддержку, оказанные им при подготовке диссертации на самых сложных её этапах. Всегда буду с благодарностью вспоминать ушедшего из жизни блестящего учёного и человека, чл.-корр. РАН, профессора Лифшица Виктора Григорьевича, который, будучи моим научным руководителем, помогал в планировании работ и осуществлял руководство на ранних этапах работы над диссертацией, принимал активное участие в обсуждении результатов и делал весьма ценные замечания по ходу работы. Его жизненный оптимизм и острый ум всегда поддерживали меня и наполняли сердце надеждой. Также, огромная благодарность безвременно ушедшей из жизни Пивченко Елене Борисовне, помогавшей осуществлять рентгеновский анализ образцов.

От всей души, искренне благодарен за поддержку и участие в работах, в обсуждении моей супруге Борисенко Е.А., а также чл.-корр. РАН, профессору Саранину А.А., профессору, д.ф.-м.н. Чеботкевич Л.А., д.ф.-м.н. Астаповой Е.С., д.ф.-м.н. Коробцову В.В., д.ф.-м.н. Котляру В.Г., Бехтеревой О.В., д.ф.-м.н. Куянову И.А., д.ф.-м.н. Гаврилюку Ю.Л., к.ф.-м.н. Чурусову Б.К., к.ф.-м.н. Балашеву В.В., к.ф.-м.н. Утас О.А., к.ф.-м.н. Утас Т.В., к.ф.-м.н. Грузневу Д.В., к.ф.-м.н. Лунякову Ю.В., главному инженеру-конструктору Каменеву А.Н., Потапову С.В., моему отцу – машинисту азотной станции Иванченко Виктору Григорьевичу, и всем, оказавшим помощь при подготовке работ.

Иванченко Максим Викторович

Рост плёнок железа и силицидов железа
на атомарно-чистой и модифицированной бором
поверхности кремния Si(111)

Автореферат

Подписано к печати 22 августа 2006 г.
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Уч. изд. л. 0,8.
Тираж 100. Заказ № 44.

Издано ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, Радио, 5.
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

