

Заключение диссертационного совета Д 003.055.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 октября 2014 г. № 4

О присуждении Тарасову Ивану Анатольевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие методики эллипсометрического контроля параметров наноструктур Fe/Si в процессе роста» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 20 июня 2014 г., протокол № 2 диссертационным советом Д 003.055.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН), ФАНО. 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38, приказ о создании диссертационного совета 714/НК от 02 ноября 2012 г.

Соискатель Тарасов Иван Анатольевич 1987 года рождения, в 2010 году соискатель окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ). В 2013 году соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре на базе ИФ СО РАН, где работает младшим научным сотрудником.

Диссертация выполнена в ИФ СО РАН.

Научный руководитель – кандидат технических наук, Варнаков Сергей Николаевич, ИФ СО РАН, лаборатория Физики магнитных явлений, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: Мартыянов Олег Николаевич, доктор химических наук, зам. директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ИК СО РАН);

Лепешев Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-образовательным центром (кафедрой) ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» СФУ.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), г. Новосибирск в своем положительном заключении, подписанном Пчеляковым Олегом Петровичем, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель

директора ИФП СО РАН, Швецом Василием Александровичем, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИФП СО РАН, указала, что представленные в диссертационной работе результаты являются оригинальными, получены впервые и вносят вклад в решение проблем диагностики низкоразмерных структур в процессе их формирования, а также в решение ряда исследовательских задач спинтроники.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 4 работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях: 1. Тарасов, И.А. Оптические свойства эпитаксиальной плёнок $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ / И.А. Тарасов, З.И. Попов, С.Н. Варнаков и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 99. – С. 651. 2. Яковлев, И.А. Исследование структурных и магнитных характеристик эпитаксиальных плёнок $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ / И.А. Яковлев, С.Н. Варнаков, Б.А. Беляев, С.М. Жарков, М.С. Молокеев, И.А. Тарасов и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 99. – С. 610. 3. Лященко, С.А. Исследование магнитооптических свойств тонких слоёв Fe in situ методами / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, С.Н. Варнаков и др. // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. – С. 139. 5. Тарасов, И.А. Эллипсометрическая экспресс-методика определения толщины и профилей оптических постоянных в процессе роста наноструктур $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ / И.А. Тарасов, Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков и др. // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – С. 44. Работы посвящены разработке и применению эллипсометрической экспресс-методики к исследованию оптических и структурных свойств плёнок железа, кремния и тонкоплёночных силицидов железа, включая эпитаксиальные пленки $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ и многослойные плёнки $(\text{Fe}/\text{Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$. По результатам исследований получено Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013619178 «Система обработки и анализа данных одноволновой кинетической эллипсометрии (SingleW)». Объем публикаций составляет 1,75 п. л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: Ведущая организация ИФП СО РАН – отзыв положительный. Замечания: предложенный алгоритм расчёта профилей оптических постоянных (n и k) используется в работе как для модели с неизменными n и k выращенного слоя, так и для динамической модели, предполагающей изменение оптических свойств в процессе роста. В связи с этим следовало бы представить критерии выбора той или иной модели в каждом конкретном эксперименте; в работе наблюдается некоторая небрежность при обращении к численным данным литературных источников. Так, при обработке экспериментов для структуры $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ использовались значения n и k кремния $n_{\text{Si}} = 3.865$, $k_{\text{Si}} = 0.023$ (глава 3, стр. 64) со ссылкой на работу [72]. В то же время, при определении геометрических параметров

многослойной структуры $(\text{Fe/Si})_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ в расчётах были приняты уже другие данные $n_{\text{Si}} = 3.872$, $k_{\text{Si}} = 0.016$ со ссылкой на тот же литературный источник [72].

Официальный оппонент Лепешев А. А. сделал следующие замечания: 1) в работе не дана оценка принятых допущений и упрощений при постановке задачи. Непонятно, как они будут влиять на конечный результат. Какие действия необходимы для получения оптимальных результатов? Если это заложено в Программе, то каким образом; 2) отсутствуют критериальные оценки использования в конкретном эксперименте алгоритма расчета n и k для статического (неизменные n и k) и динамического (изменяющиеся в процессе роста n и k) случаев; 3) имеется некоторая небрежность в формулировках и оформлении работы. Так, в названии диссертации непонятно, к чему отнести сочетание в процессе роста. Либо это параметры, либо наноструктуры, либо сама пленка Fe/Si ? Аналогичная ситуация и в постановке цели работы. 4) В задаче 3 сформулирована необходимость сравнения результатов толщины (d) с результатами рентгеноспектрального анализа (РСФА). Возникает вопрос, какими?

Официальный оппонент Мартыанов О. Н. отмечает следующее. 1) Одним из центральных вопросов общего характера является вопрос о возможностях предлагаемого в работе метода для изучения начальных стадий формирования сплошной пленки, а также для изучения фаз, формирующихся на границе разделов различных слоев. Какую информацию о свойствах таких систем может дать предлагаемая методика; 2) при описании второго алгоритма для расчета d , n и k пленки, автор резонно не рекомендует его использование на самых ранних этапах роста структуры, когда значения n и k могут сильно отличаться от соответствующих n и k объемного материала. Какова d пленки, для которой данный подход не применим?; 3) в таблице 3.1 приведено сравнение расчетных толщин образцов с данными РСФА и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Толщина пленки для различных образцов приведена с существенно различной точностью (см., например, образец 1 и 3). С чем это связано?; 4) обращает на себя внимание аномально высокие значения n и k для некоторых пленок; 5) Почему для малых значений градиента n и k ошибка вычислений существенно превышает минимальное значение (при $G_{\text{ав}} = 9.33$) (рис.2.6 диссертации)?; 6) среди небольшого количества подобных ошибок можно отметить фразу на стр. 26 «Общий подход к поиску решений уравнения (1.13) может быть осуществлен линейного регрессионного анализа...», в которой, вероятно, пропущено слово «путем».

Номерованная Л. В.- к.ф.-м.н., в. н. с. ИФМ УрО РАН отметила, что Тарасов И.А. внёс заметный вклад в развитие методов контроля плёночных структур в процессе напыления *in situ* и заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук. Огнев А.В.- к.ф.-м.н., доцент, в. н. с. ДВФУ, зав. лаборатории тонкоплёночных технологий сделал следующие замечания: 1) рассчитанная толщина плёнки (~29 нм) превосходит измеренную по снимкам ПЭМ толщину (20,5 нм, рис. 5.7) на 30%. Однако в первом положении, указано, что погрешность разработанной экспресс-методики не более 6.5 %; 2) образец № 4, в тексте не описывается; 3) на рис. 5.21 приведены данные расчётов для двух образцов β -FeSi₂/Si(100). Не понятно, почему объединённые данные на графике расходятся с аналогичными результатами, представленными отдельно для этих образцов, на рис 5.19 и 5.20; 4) результаты ДОБЭ для образцов β -FeSi₂/Si(100) №1 и №2 свидетельствуют о том, что на начальных стадиях роста плёнок образуются трёхмерные островки. Для объяснения поведения зависимостей n и k от времени осаждения на начальных стадиях роста не достаточно только модельных представлений о ростовых процессах. Необходимо проведение комплексных исследований с привлечением методов ДОБЭ и (или) сканирующей микроскопии в процессе осаждения плёнок. Пронин И.И.- д. ф.-м. н., в. н. с. ФТИ им. А.Ф.Иоффе, отметил, что автореферат диссертации написан чётко и ясно. Замечание: в подписи к рисунку 5 б) имеется ошибка Fe₃Si/SiO₂/Si(111). Жмерик В.Н.- д. ф.-м. н., в. н. с. ФТИ им. А.Ф.Иоффе, отметил замечания по автореферату: 1) насколько n и k начальной части слоя Fe₃Si, выращенного в островковом режиме роста, отличаются от аналогичных характеристик для слоя, выращенного после коалесценции островков. Какова степень однородности сверхтонких слоёв Fe₃Si (с толщиной, например, менее 10 нм); 2) в тексте реферата присутствует несколько непонятных мест и опечаток: непонятно, что понимается под «стехиометрическими соотношениям атомарных процентов кремния к железу, равными 2 и 0,33» для одного химического соединения β -FeSi₂. Отмечается, также, что указанные замечания, разумеется, не являются критическими и не влияют на ценность изложенного материала.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью своими достижениями в области приборов и методов экспериментальной физики, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность представленной диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что целью настоящей работы является создание и апробация экспресс-методики, позволяющей вести контроль толщины и оптических постоянных

структур на основе системы Fe/Si в процессе их роста. На основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработана и реализована методика анализа эллипсометрических данных на основе нового алгоритма, позволяющая проводить экспресс-контроль толщины и оптических постоянных формирующихся структур Fe/Si в процессе их роста.

2. Проведена апробация алгоритма на численных экспериментах. Разработано программное обеспечение «SingleW», позволяющее проводить анализ данных одноволновой эллипсометрии. Реализована возможность применения разработанного алгоритма для диагностики процесса синтеза наноструктур в сверхвысоковакуумной камере молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара».

3. Проведена характеристика процесса синтеза структур Fe/SiO₂/Si(100) и (Fe/Si)₃/SiO₂/Si(100). Показано, что погрешность расчётов толщины с помощью предложенной экспресс-методики синтезированных плёнок в сравнении с результатами определения толщины рентгеноспектральным флуоресцентным анализом не превышает 6.5 %.

4. Использование разработанной методики для анализа профилей оптических постоянных и толщины тонких плёнок системы Fe-Si показало, что при совместном осаждении железа и кремния на подложку кремния, разогретую до 150 °C, сплошной слой Fe₃Si образуется при толщине пленки более 5 нм. Впервые полученные экспериментально дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения для эпитаксиальной плёнки Fe₃Si хорошо согласуются с рассчитанными из первых принципов.

5. Полученные профили оптических характеристик показывают, что при совместном осаждении железа и кремния на подложку кремния, разогретую до 450 °C, на начальном этапе формирования плёнок β-FeSi₂/Si(100) идёт островковый рост смеси фаз α-FeSi₂, β-FeSi₂ и γ-FeSi₂, а слой β-FeSi₂ с неизменяющимися оптическими постоянными формируется при толщине пленки более 20 нм.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что в диссертации предложен новый вычислительный алгоритм обработки данных одноволновой эллипсометрии, позволяющий проводить контроль толщины и оптических постоянных формирующихся структур Fe/Si в процессе их роста.

Полученные соискателем результаты имеют высокую практическую ценность, т. к. позволяют проводить контролируемый синтез аморфных, поликристаллических и эпитаксиальных

наноструктур в условиях сверхвысокого вакуума и получать информацию об изменении оптических и структурных характеристик растущих плёнок.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты диссертационной работы получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях.

Личный вклад соискателя заключается в разработке и реализации алгоритма, позволяющего проводить экспресс-контроль толщины и оптических постоянных структур *in situ* в масштабе реального времени, а также в обработке и анализе полученных данных. Автор принимал активное участие в планировании и проведении экспериментов по получению всех описываемых в данной работе структур.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного и четкого плана исследования, непротиворечивой методологической платформы, согласованностью и взаимосвязанностью выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, и принято решение присудить Тарасову Ивану Анатольевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.01 –приборы и методы экспериментальной физики, 6 докторов наук по специальности 01.04.03 –радиофизика и 6 докторов наук по специальности 01.04.05 – оптика, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени 18, против присуждения учёной степени - нет, недействительных бюллетеней - нет

Зам. председателя диссертационного совета Д 003.055.01
д.ф.-м.н., профессор

Волков Н.В.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.055.01
д.ф.-м.н., с.н.с.
21.10.2014 г.

Впюрин А.Н.

