


## УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт физики  
полупроводников им.  
А.В. Ржанова Сибирского отделения  
Российской академии наук  
Член-корр. РАН



А. В. Латышев

«24» июня 2014 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации  
на диссертационную работу Яковлева Ивана Александровича

«Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа»,

представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Рецензируемая диссертационная работа посвящена исследованию процессов формирования тонких слоев железа и его силицидов на подложках кремния, определению их структуры и магнитных характеристик. Работа мотивирована возрастающим интересом к созданию гибридных структур «ферромагнетик/полупроводник», которые могут использоваться в качестве источника или детектора спин-поляризованных электронов. Интерес к таким структурам на основе кремния и силицидов железа с резкой границей раздела обусловлен возрастающими потребностями современной наноэлектроники и спинтроники, что указывает на актуальность диссертационной работы. К моменту начала работы было известно, что в процессе осаждения слоя Fe на монокристаллическую поверхность Si на начальных этапах даже при комнатной температуре образуются несколько фаз немагнитных силицидов, которые разрушают спиновую поляризацию электронов. Проведенные в исследовании закладывают основу для разработки технологии контролируемого получения монофазных ферромагнитных слоев железа и его силицида  $Fe_3Si$  с толщинами  $2 \div 50$  нм на поверхности кремния.

Диссертация имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК, и состоит из введения, обзорной главы, четырех оригинальных глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 68 рисунков, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 152 библиографических ссылок.

Во введении показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая ценность результатов, а также

приведены основные защищаемые положения и структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору результатов и разработок, относящихся к тематике проводимой работы. В данном разделе приводится обзор структурных, оптических, магнитных свойств силицидов железа, и отражена актуальность их практического применения. Описаны процессы формирования тонкопленочных силицидов  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\alpha\text{-FeSi}_2$  и  $\beta\text{-FeSi}_2$ . Показано, что синтез силицида одного типа крайне затруднителен, в связи с тем, что в одном технологическом цикле обычно образуется смесь различных соединений Fe-Si.

Во второй главе, посвященной методическим вопросам исследования, приводится краткое описание методик, используемых в работе для исследования структурных, оптических и магнитных свойств получаемых пленок. В описании экспериментальной установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара» сделан акцент на геометрию напылительной системы, которая обеспечивает заданную ориентацию потока железа по отношению к поверхности образца. Описана технология приготовления подложек и технология осаждения исследуемых пленок.

Третья глава посвящена исследованию начальных этапов роста тонких (эффективная толщина порядка 2 нм) пленок Fe на подложках Si(100)  $2\times 1$  при различных температурных режимах методами твердофазной и реактивной эпитаксии. Анализируется зависимость строения пленок от условий их получения с использованием методов дифракции отраженных быстрых электронов и электронной спектроскопии.

Четвертая глава посвящена исследованию магнитных свойств пленок Fe толщиной 10 нм, напыленных на поверхности Si(001) и Si(111), в случае, когда поток материала направлен под углом к поверхности подложки. Показано, что изменение состояния ростовой поверхности (ориентации, реконструкции атомарно чистой поверхности, наличия и толщины окисного слоя  $\text{SiO}_2$ ) приводит к формированию пленок с различной морфологией поверхности. Установлена связь между структурой поверхности и характером магнитной анизотропии полученных пленок Fe.

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 подложки Si(001)  $2\times 1$  при различных температурных режимах. А также представлены результаты исследования структурных и магнитных свойств толстых пленок  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и  $\beta\text{-FeSi}_2$ , полученных методом совместного осаждения Fe и Si на подложках Si(111) и Si(001), соответственно.

Наиболее значимые результаты, полученные автором, состоят в том, что:

Определены условия формирования монофазного покрытия и строение слоев железа различной толщины для гибридных структур Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(001). Показано, что напыляемый слой представляет собой набор анизотропных островков. Установлена связь между структурой островков и анизотропией магнитных свойств гибридной структуры.

Проведено систематическое исследование структуры и магнитных свойств слоев, полученных совместным осаждением Fe и Si в широком диапазоне соотношений скоростей потоков и температур. Получены эпитаксиальные пленки ферромагнитного силицида  $\text{Fe}_3\text{Si}$  на поверхности кремния с ориентацией (111) с резким интерфейсом и шириной линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 11.57$  Э. Определена коэрцитивная сила структуры  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  равная 12.3 Э.

Практическая ценность работы заключается в разработке технологии

получения гибридных наноструктур - магнитный слой/полупроводник с заданными свойствами, перспективных для создания приборов, в основе которых лежит управление состоянием спиновой поляризации носителей заряда.

Достоверность полученных в работе результатов и выводов обеспечивается использованием современных взаимодополняющих экспериментальных методик, проверкой результатов на воспроизводимость, взаимной согласованностью результатов, а также соответствием этих результатов теоретическим положениям.

Результаты работы можно рекомендовать для использования в научных и учебных организациях, в которых ведутся исследования по сходной тематике: Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Открытом акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»» и других образовательных и производственных организациях.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. В выводах к главе 1 написано, что «фазовая диаграмма для тонкопленочной системы Fe-Si на сегодняшний день не имеет законченного вида и требует более детального исследования процессов формирования силицидов». Фазовая диаграмма – характеризует термодинамически-равновесное состояние системы, которое не зависит от формы её реализации – в виде «объемного кристалла» и «тонкой пленки». При росте тонких пленок в условиях далеких от термодинамического равновесия речь может идти только о том, что состав получающихся пленок определяется кинетикой формирования соединений в системе Fe-Si.
2. Автор злоупотребляет использованием различных обозначений для описания одной и той же величины. Так, например, в выводах к главе 3 в первом абзаце дается следующее описание толщины - «...при напылении Fe толщиной 10 Å...», а в следующем абзаце написано «Напыление пленки железа толщиной около 1 нм».
3. В третьей главе описана структура и фазовый состав пленок, образующихся при напылении слоя железа толщиной 1 нм, хотелось бы знать каковы их магнитные свойства.
4. С завидным упорством, проходящим красной нитью через весь текст диссертации, (в пунктах научная новизна, практическая значимость, выводы к главе 4) автор пишет, о том, что установлено критическое влияние геометрии напыления пленок железа на магнитные свойства структур. В действительности же, магнитные свойства получившихся слоев железа и его силицида, определяются не геометрией напыления, а атомной структурой сформированных слоев.
5. Обсуждая магнитные свойства структур Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(111) автор делает вывод о том, что анизотропия остаточной намагниченности, кардинальным образом зависит от толщины слоя SiO<sub>2</sub>. С другой стороны, показано, что вне зависимости от толщины


слоя двуокиси кремния напыленные пленки состоят из поликристаллов ОЦК-железа. Автору необходимо ответить на вопрос, какие изменения в структуре поликристаллов имеют место при возрастании толщины слоя  $\text{SiO}_2$  и как эти изменения связаны с анизотропией магнитных свойств изучаемых пленок.

Сделанные замечания, однако, не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Выводы, сделанные в работе, представляются обоснованными, а результаты достоверными.

Доклад Яковлева И.А. по материалам диссертации был заслушан на семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук 14 мая 2014 г. По результатам обсуждения диссертация получила положительную оценку. Результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, считаем, что она удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Яковлев Иван Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Председатель семинара,  
Заместитель директора ИФП СО РАН  
профессор, д.ф.-м.н.

 О.П. Пчеляков

Ведущий научный сотрудник ИФП СО РАН  
д.ф.-м.н.

 Т.С. Шамирзаев

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого Совета Института физики полупроводников протокол № 6 от 23 июня 2014 года.

Ученый секретарь ИФП СО РАН,  
к.ф.-м.н.

 А.В. Каламейцев

## СПИСОК

### опубликованных научных и учебно-методических работ


Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики  
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

№ п/п	Наименование работы	Вид работы	Выходные данные	Соавторы
1	2	3	4	5
1	Growth, structure and luminescence properties of multilayer Si/ $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> NCs/Si/.../Si nanoheterostructures	статья	Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – Iss. 24. – P. 8480–8484	G.N. Galkin, E.A. Chusovitin, T.S. Shamirsaev, A.K. Gutakovski, A.V. Latyshev
2	Approach to a creation of silicon-silicide smart materials for silicon-based thermoelectronics and photonics	тезис	Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8409. – P. 84091W	N.G. Galkin, E.A. Chusovitin, K.N. Galkin, D.L. Goroshko, T.S. Shamirsaev, Jinsong Leng, Yoseph Bar-Cohen, In Lee, Jian Lu
3	Room temperature 1.5- $\mu$ m light-emitting silicon diode with embedded $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> nanocrystallites	статья	Applied Physics Letters. – 2012. Vol. 101. – Iss. 16. – P. 163501	N.G. Galkin, E.A. Chusovitin, D.L. Goroshko, A.V. Shevlyagin, A.A. Saranin, T.S. Shamirzaev, K.S. Zhuravlev, A.V. Latyshev
4	Features of the structure and properties of beta-FeSi <sub>2</sub> nanofilms and a beta-FeSi <sub>2</sub> /Si interface	статья	Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP LETTERS). – 2012. – Vol. 95. – Iss. 1. – P. 20–24	A.S. Fedorov, A.A. Kuzubov, T.A. Kozhevnikova, N.S. Eliseeva, N.G. Galkin, S.G. Ovchinnikov, A. A. Saranin, A.V. Latyshev
5	Electroluminescence properties of p-Si/ $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> NCs/.../n-Si mesa diodes with embedded multilayers of $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> nanocrystallites	статья	Physica Status Solidi (c). – 2013. – Vol. 10. – Iss. 12. – P. 1850–1853	E. Chusovitin, D. Goroshko, A. Shevlyagin, N. Gallkin, T. Shamirzaev, A. Gutakovskiy, S. Balagan, S. Vavanova

6	Model of beta-FeSi <sub>2</sub> nanocrystallite "emersion" process during silicon layer overgrowth	тезис	Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: reviews and short notes. – 2013. – P. 169–171	N.G. Galkin, E.A. Chusovitin, A.V. Shevlyagin, S. A. Dotsenko, D.L. Goroshko, T.S. Shamirzaev, A.K. Gutakovskii
7	Structure and optical properties of Ca silicide films and Si/Ca <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> /Si(111) heterostructures	статья	Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 213. – P. 71–79	N. G. Galkin, D.A. Bezbabnyi, S.A. Dotsenko, K.N. Galkin, I.M. Chernev, E.A. Chusovitin, P. Nemes-Incze, L.Dózsa, B. Pécz, T.S. Shamirzaev, A.K. Gutakovskii

Ученый секретарь ИФП СО РАН,  
к.ф.-м.н.



 А.В. Каламейцев