

## ОТЗЫВ.

официального оппонента на диссертацию

**Яковлева Ивана Александровича**

“Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа”,  
Представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Диссертация **Ивана Александровича Яковлева** “Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа” посвящена экспериментальному исследованию метастабильных состояний, фазовых превращений, процессов конденсации в тонких пленках силицидов железа и их влиянию на магнитные свойства пленок. Пленки силицидов железа занимают особое место в ряду материалов и структур, интересных для прикладного применения в таких современных областях, как спинтроника, оптоэлектроника, солнечная энергетика и др. Это обусловлено возможностью создания сверхтонких гибридных гетероструктур «ферромагнитный металл/полупроводник», где в роли полупроводника используется кремний, который обладает слабым спин-орбитальным взаимодействием. Данное качество обеспечивает большое время жизни спинового состояния и, соответственно, большую длину спиновой диффузии с сохранением когерентного спинового состояния. На роль ферромагнетика хорошо подходит железо с большой спиновой поляризацией (44%). В таких гибридных структурах носители тока в ферромагнетике оказываются поляризованными по спину и при распространении их в полупроводниковую основу сохраняют свою поляризацию. Подобные материалы, как известно, представляют значительный интерес для создания множества новых устройств, от сверхчувствительных датчиков и спиновых светодиодов до спиновых транзисторов и логической памяти с высоким быстродействием и низким энергопотреблением. Из всего вышесказанного следует, что получение и экспериментальное исследование структуры и магнитных свойств силицидов железа является **актуальной и целесообразной** задачей.

**Научная новизна** работы заключается в том, что **И.А.Яковлевым** проведено систематическое исследование магнитных и структурных свойств пленок, полученных совместным осаждением Fe и Si в широком диапазоне соотношений потоков напыляемых материалов и температур. Отработана технология синтеза наноструктур железа различной толщины на атомарно чистых поверхностях Si(001) 2×1 при различных температурных условиях. Определены технологические условия формирования характерных силицидов железа. Изучена магнитная анизотропия пленок Fe, полученных при напылении под углом

к поверхности на различных подложках: Si(001), Si(111), SiO<sub>2</sub>/Si(001) и SiO<sub>2</sub>/Si(111). Установлено критическое влияние данной геометрии напыления на магнитные свойства структур. Предложен механизм формирования магнитной анизотропии пленок железа на Si(001) и SiO<sub>2</sub>/Si(001). Получена эпитаксиальная пленка ферромагнитного силицида Fe<sub>3</sub>Si/Si(111) с резкой границей раздела и сравнительно узкой линией ферромагнитного резонанса. Исследованы структурные характеристики пленок силицида β-FeSi<sub>2</sub>, полученных совместным осаждением при различных соотношениях скоростей потоков Fe и Si.

**Научная и практическая значимость** работы заключается в том, что были определены технологические условия для формирования пленок Fe и различных силицидов Fe-Si на подложках Si(001) и Si(111). Установлено влияние напыления Fe под углом к поверхности подложки на магнитные свойства получаемых структур на Si(001) и Si(111), покрытых слоем оксида SiO<sub>2</sub> и без него. Эти результаты позволяют создать структуры с заданным магнитным упорядочением. Получена эпитаксиальная пленка ферромагнитного силицида Fe<sub>3</sub>Si на подложке Si(111), обладающая при комнатной температуре магнитной одноосной анизотропией и имеющая сравнительно узкую линию однородного ферромагнитного резонанса. Подобные пленки имеют перспективы применения в различных управляемых устройствах микроволнового диапазона (СВЧ), например, в фильтрах, амплитудных и фазовых модуляторах.

**Степень достоверности и обоснованности** научных положений выводов и заключений соискателя не вызывает сомнений. При исследовании структуры и магнитных свойств тонкопленочных силицидов железа использовались разнообразные методы измерения и современное высоковакуумное научное оборудование. Диссертационная работа Яковлева по существу носит комплексный характер, и это важное ее достоинство. Взаимная согласованность результатов, полученных различными методами, квалифицированный анализ экспериментальных данных убеждают в достоверности полученных результатов и правильности основных выводов диссертации.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Учитывая общефизический интерес к полученным и исследованным в работе **И.А.Яковлева** тонкопленочным силицидам железа, трудно отдать предпочтение конкретным научным учреждениям для рекомендации к использованию результатов диссертации. Данные, полученные соискателем, могут быть использованы в работах учреждений, изучающих транспортные и магнитные свойства, магнитоэлектрические явления, в частности, на кафедрах физических факультетов Московского, Казанского и Омского госуниверситетов, Сибирского федерального университета, Институтов физики

полупроводников СО РАН, химии твердого тела и неорганической химии СО РАН, а также научных учреждений Уральского отделения РАН: Институте физики металлов и Институте электрофизики.

Работа не свободна и от некоторых недостатков, например;

1. В диссертации представлены дифракционные картины (ДОБЭ), по которым проводится идентификация структур, однако дифракционные рефлексы достаточно размыты (например, рис. 38а, 44а), что должно приводить к увеличению погрешности определения положения дифракционного рефлекса и соответственно определяемого параметра решетки структуры. Однако в диссертации нигде не приведено значение погрешности определения кристаллической структуры по данным дифракционных измерений, более того, есть картины ДОБЭ с расшифровкой, например, рисунки 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 где на электронограммах широкие размытые рефлексы, близкие к аморфному гало, которые очень трудно интерпретировать.

2. В диссертации при рассмотрении магнитной анизотропии пленок приведены полярные диаграммы приведенной остаточной намагниченности, но отсутствуют измеренные, оригинальные, петли гистерезиса для данных пленок при повороте относительно внешнего магнитного поля. Не представлены также абсолютные значения остаточной намагниченности, что затрудняет дальнейший анализ полученных зависимостей.

3. Во второй главе описываются методики эксперимента и экспериментального оборудования. При этом методы просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и рентгеноспектрального флуоресцентного анализа представлены очень подробно со схемами и детальным описанием работы приборов что, по моему мнению, в диссертации является излишним.

Однако сделанные замечания ни в какой мере не умаляют достоинства диссертационной работы и не снижают высокой ценности полученных результатов и положительную оценку диссертационной работы в целом. Полученные в диссертационной работе Яковлева И.А. результаты обладают необходимой новизной, оригинальностью и представляют как научный, так и практический интерес.

Основные результаты исследования опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и входящих в список ВАК. Они неоднократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях. Автореферат и публикации автора соответствуют содержанию работы и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация **Яковлева Ивана Александровича** "Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа" является законченным научным исследованием, выполненным на высоком профессиональном уровне. Полученные в ней результаты имеют научную и практическую значимость и являются вкладом в физику тонкопленочных материалов для спинтроники. По научной актуальности поставленных задач, объему и новизне полученных результатов, их достоверности и значимости работа **Яковлева И. А.** полностью удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

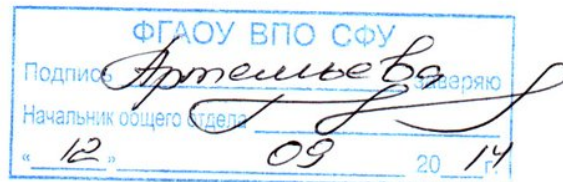
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физика №2

Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского

Федерального университета

**Артемьев Евгений Михайлович**

[aem49@yandex.ru](mailto:aem49@yandex.ru) Красноярск, ул. Киренского 26, корпус Г, к.3-43



Подпись Е.М.Артемьева заверяю начальник отдела кадров

## СПИСОК

### опубликованных научных и учебно-методических работ

\_\_\_ Артемьев Евгений Михайлович \_\_\_

*Фамилия, имя, отчество*

№ п/п	Наименование работы	Вид работы	Выходные данные	Соавторы
1	Влияние атомного упорядочения на магнитные свойства пленок сплавов FePd, FePt, Fe50Pd50-xPtx	Печ.	Известия РАН, серия физическая 2010, том 74, №8, с.1186-1188.	Живаева Л.В., Артемьев М.Е., Волкова П.Е.
2	Перпендикулярная магнитная анизотропия в тонких пленках Co50Pt50, Co50Pd50 и Co50Pt50-xPdx	Печ.	ФТТ, 2010. Т. 52, №11, с.2128-2130.	М.Е.Артемьев
3	Influence of Atomic Ordering on the Magnetic Properties of FePd, FePt, and Fe50Pd50-xPtx Alloy Films	Печ.	Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2010, vol. 74, No.8, pp. 1135-1137 Allerton Press, Inc., 2010	L.V.Zhivaeva, M.E.Artem'ev, and P.E.Volkova
4	Perpendicular Magnetic Anisotropy in the Co50Pt50, Co50Pd50, and Co50Pt50-xPdx Thin Films	Печ.	Physics of the Solid State, 2010, Vol.52. No. 11, pp.2271-2273. Pleiades Publishing. Ltd.,2010.	М.Е.Artem'ev
5	Структура гетерогенных состояний и магнитные свойства в нанокристаллических пленках CoPd	Печ.	Поверхность, рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования, 2012, №7, с. 1-4.	Артемьев М.Е., Рузанова Л.Н.
6	Магнитные свойства и метастабильные состояния в пленках Co-Ir	Печ.	Известия РАН, серия физическая 2014, том 78, №2, с. 203-204.	А.Е.Бузмаков, К.П.Полякова, Л.Е.Якимов
7	Perpendicular magnetic anisotropy and atomic ordering in FePd, Fe50Pd50-xPtx alloy films	Печ.	Solid State Phenomena Vol. 215 (2014) pp 242-245.	L.E.Yakimov

Соискатель \_\_\_\_\_

Ученый секретарь \_\_\_\_\_



*Иванов*

*Т.С. Трыкова*