

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Александра Васильевича Кобякова «СИНТЕЗ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК В СИСТЕМЕ Co-Ge», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

В настоящее время активно развиваются исследования гибридных структур с чередующимися слоями магнитного и немагнитного слоев. Такая направленность определяется тем, что попытки использования материалов, обладающих различными свойствами, представляются перспективным в плане создания новых материалов и устройств на их основе. В частности, попытки интегрирования в одной многослойной структуре ферромагнитных и полупроводниковых материалов уже привели к неожиданным результатам. Однако широкое использование таких систем ограничивается слабой разработкой фундаментальных физических свойств и существующими технологическими проблемами для получения качественных структур.

Диссертационная работа А.В. Кобякова посвящена отработке режимов получения пленок Co/Ge/Co с заданными свойствами и исследованию их магнитных свойств. В пленках *ферромагнитный металл/полупроводник*, существует возможность управления магнитными и резистивными свойствами путем подбора полупроводникового материала, способов упаковки и толщин магнитных и немагнитных слоев. Поэтому отработка технологии получения качественных пленок с заданными свойствами выходит на первый план.

Можно отметить существенный рост исследований многослойных наноразмерных пленок, что отражается в быстром увеличении числа публикаций. По этим направлениям проходят тематические конференции разного уровня и практически на каждой конференции по физике магнитных явлений или по физике полупроводников всегда присутствуют секции, посвященные наноразмерным системам. Все это указывает на то, что тема диссертации лежит в области современных проблем физики магнетизма, чем и определяется **актуальность** данных исследований.

Настоящая диссертация изложена на 112 страницах, содержит 51 рисунок. Библиография включает 100 наименований.

Первая глава посвящена обзору литературных источников по тематике диссертации, а именно, свойствам многослойных магнитных пленок с немагнитной прослойкой из полупроводниковых материалов. Довольно подробно автор рассматривает: системы с прослойкой из простого полупроводника (на примере магнитных пленок $(\text{Fe}/\text{Si})_n$, $(\text{Fe}/\text{Ge})_n$, $(\text{Co}/\text{Si})_n$ и на других образцах); системы с прослойкой из двухкомпонентных полупроводников ($[(\text{ZnTe})_x/(\text{MnTe})_y]$, EuS/PbS и другие); системы с редкоземельными слоями $(\text{Co}/\text{Si}/\text{Gd}/\text{Si})$. Кроме того, рассмотрен вопрос применения систем переходный металл/полупроводник. На основе проведенного обзора литературы автор приходит к выводу об актуальности объектов исследования, формулируется цель работы, и ставятся задачи исследования.

Во второй главе приведены сведения об использованном оборудовании для синтеза магнитных пленок $\text{Co}/\text{Ge}/\text{Co}$ и о методиках исследований структурных, магнитных и резонансных свойств магнитных пленок. Видно, что Кобяков А.В. применяет современные методы исследований и высокоточное экспериментальное оборудование, а выбранные методы паспортизации структур дают надежные данные об исследуемых образцах.

Третья глава посвящена технологии синтеза тонких магнитных пленок $\text{Co}/\text{Ge}/\text{Co}$. Описаны оригинальные узлы, а именно, проделанная модернизация напылительной установки для получения пленок нужного состава. Автором установлено, что магнитная структура образцов зависит как от скорости напыления слоев, так и от температуры подложки. Подбираются толщины слоев. В работе изготавливается и исследуется несколько серий образцов. Так как качество многослойных структур является определяющим в нанофизике, то данная глава задает дальнейшую направленность исследований.

В четвертой главе описаны результаты структурных и магнитных исследований. Глава состоит из шести разделов:

Раздел «А) Электронная микроскопия» подробно описывает электронно-микроскопические исследования исследуемых образцов. Автором установлено, что каждый слой кобальта пленок 1^{ой} серии представляет собой смесь кубической

(ГЦК) и гексагональной (ГПУ) фаз. Германий, во всех пленках с различной толщиной, находится в кубической фазе или есть смесь аморфных и кубических состояний для пленок малых толщин ($\leq 2.5\text{nm}$).

В разделе «Б)» проведено достаточно полное целенаправленное исследование с целью выяснения условий появления фаз германидов в зависимости от температурных режимов. Данные этого эксперимента свидетельствуют, что в используемой автором технологии получения трехслойных пленок Co/Ge/Co фаз германидов кобальта не образуется.

Методами атомной силовой микроскопии, и ядерного магнитного резонанса (ЯМР), в дополнение к электронно-микроскопическим (ЭМ) исследованиям, установлено, что в пленках, полученных при больших скоростях напыления и (или) высоких температурах подложек, сосуществуют несколько магнитных. Отмечается, что при малых толщинах кобальта и германия в пленках превалируют неравновесные фазы. При увеличении толщины слоев начинают превалировать равновесные фазы.

Также отработаны условия получения однофазных пленок либо ГПУ фазы, либо ГЦК фазы (в зависимости от технологических условий напыления).

В части изучения магнитных свойств наибольшее внимание уделяется двухфазным пленкам (серия I), т.к. в них обнаружено необычное поведение намагниченности. Для всех исследованных толщин немагнитной прослойки, температурные зависимости намагниченности пленок носят термо-активационный характер. В малых магнитных полях существует температура (T_{TM}), ниже которой намагниченность близка к нулю. И только при превышении некоторой температуры, зависящей от поля измерения, начинается заметный рост намагниченности.

Для пленок серии II, при изменении температуры поведение намагниченности подчиняется закону типа « $T^{3/2}$ », а полевая зависимость соответствует поведению материала кобальта.

Для объяснения обнаруженных особенностей магнитного поведения развита модель, когда в изотропной матрице (кубический кобальт) распределены сильно анизотропные частицы (гексагональный кобальт), которые связаны с матрицей

обменным взаимодействием, что, по сути, является модифицированной моделью Стокера-Вольфорта. Получено неплохое согласие эксперимента и теории

Пятая глава содержит изложение результатов магниторезонансных исследований, направленных на изучение межслоевых взаимодействий. Получено, что при малых температурах изначально спектр представляет собой одиночную линию поглощения, а при более высоких температурах он становится сложным. В рамках двухслойной модели проведен анализ температурных зависимостей резонансных полей. Здесь неожиданным оказалось то, что для всех исследованных пленок обменное поле соответствует антиферромагнитному межслоевому взаимодействию, при этом при фиксированной температуре имеют место небольшие осцилляции величины H_J ($\sim 0.5\%$) в зависимости от толщины немагнитного слоя. Также важным оказался учет интерфейсной анизотропии на границе кобальт-германий.

Как видно из краткого анализа содержания диссертации А.В. Кобяковым получены новые научные результаты, как в части разработки технологии магнитных пленочных структур с полупроводниковой прослойкой, так и в части изучения их физических свойств. Этим определяется **научная новизна** работы. Наряду с проделанными экспериментальными исследованиями проведен теоретический анализ процессов намагничивания двухфазных пленок наноразмерных толщин, предложен механизм, объясняющий терромагнитное поведение. Данные по магнитному электронному резонансу объясняются в рамках подхода, который приводит к механизму, подобному механизму «сверхобмена» в магнитных диэлектриках. Все это позволяет говорить о **теоретической значимости** работы.

Следует отметить комплексный характер исследований. Для паспортизации объектов исследования использованы разные методы, дающие совпадающие результаты. Используемые методики являются высокочувствительными, современными и специализированными: рентгеновская спектроскопия, атомная силовая микроскопия, ЯМР, электронная микроскопия, квантовая магнитометрия, электронный магнитный резонанс, что свидетельствует о **достоверности** полученных результатов.

Практическая ценность работы не вызывает сомнений, поскольку полученные пленки являются перспективными материалами для устройств спинтроники, основанных на эффектах спин-зависимого транспорта. Практически важным является результат по отработке технологии получения пленок в системе *ферромагнитный металл-полупроводник*, в частности, композиции Co/Ge/Co.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. При чтении обзора складывается впечатление, что он написан в несколько приемов, т.к. отдельные блоки различаются по стилю. Но это не вредит пониманию изложенного, и сам материал при дальнейшей доработке, может быть рекомендован для использования в спецкурсах по наномagnetизму для магистрантов.

2. В отношении исследования возникновения различных фаз германидов кобальта возникает вопрос:- почему условия образования фаз в системе кобальт-германий изучались на пленках, полученных различными способами?

3. В работе утверждается о возникновении гранул гексагонального кобальта, хотя доказательств, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии, не приводится. Не известен размер и плотность гранул. Полученные электронограммы (рис.33) не четкие, что затрудняет их анализ. По этой же причине говорится о перекрытии колец и их уширении. Хотя экспериментально очень легко получить хорошие кольца электронограмм от поликристаллических пленок. Необходимо также отметить, что обычно термин «гало» применяется для электронограмм, полученных от аморфных или близким к аморфным материалам.

4. Оформление диссертации тоже не является идеальным. Встречаются опечатки. Отсутствует единообразие при оформлении списка литературы. Имеют место жаргонные сокращения, например, на стр. 12 автореферата без объяснения вводится «ZFC», и использование смешанных англо-русских терминов типа «fсс-фаза». Также из литературы взяты данные прямо на языке оригинала издательства (таблица на стр. 67).

Отмеченные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы А.В. Кобякова.

В целом диссертация А.В. Кобякова представляет собой законченное исследование. Автор провел комплексные исследования, получил новые пленочные структуры, обнаружил новые эффекты, провел теоретический анализ экспериментальных результатов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты работы, опубликованные в центральных российских и зарубежных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Работа А.В. Кобякова удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, а ее автор, Кобяков Александр Васильевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11.- физика магнитных явлений.

Проректор по НИД СибГАУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор
01.04.10



/Ю.Ю. Логинов/

660037, Красноярск, проспект. имени газеты Красноярский Рабочий, 31,
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ)
Тел. +7 (391) 262-95-94, E-mail: loginov@sibsau.ru

Подпись *Логинов*
Ученый секретарь СибГАУ
г.Красноярск



**Список научных трудов Логинова Ю.Ю. за 2011-2015 гг. по теме соответствующей
теме оппонируемой диссертации Кобякова А.В.**

1. Ленченко В.М., Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В. Анализ тепловых и рекомбинационных потерь фототока в солнечных элементах космических аппаратов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф.Решетнева. 2011, вып. 3(36). - С.43-48.
2. Ленченко В.М., Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В. Оценка эффективности фотопреобразования в кремниевых солнечных элементах с учетом рекомбинационных и тепловых потерь энергии // Успехи современного естествознания. - 2011, № 9. - С. 89-93.
3. Аплеснин С.С., Жуков В.Г., Попов Е.А., Логинов Ю.Ю. Исследование коэволюционного алгоритма генетического программирования и его применение в задаче моделирования фазовых границ магнитного состояния кристалла // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф.Решетнева. 2011, вып. 5 (38). - С.9-14.
4. Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В., Брильков А.В. Влияние упругих напряжений на формирование структурных дефектов в полупроводниках // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф.Решетнева. 2013, вып. 2 (48). - С.198-200.
5. Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В., Брильков А.В. Оценка степени дефектообразования в полупроводниках по критическому радиусу дислокационных петель // Фундаментальные исследования. 2013, № 8 (часть 5), С.1071-1074.
6. Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В., Брильков А.В. Электронно-микроскопические исследования дефектообразования в легированных примесями монокристаллах CdTe, ZnS и ZnSe // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф.Решетнева. 2013, вып. 3 (49). - С.209-211.
7. Логинов Ю.Ю., Мозжерин А.В., Брильков А.В. Зависимость критического радиуса частичных дислокационных петель от энергии дефекта упаковки в полупроводниках // ФТТ. 2014, т.56, № 4, С. 692-694. (Dependence of the critical radius of partial dislocation loops on the stacking fault energy in semiconductors. Loginov Y.Y., Mozzherin A.V., Bril'kov A.V. // Physics of the Solid State. 2014. T. 56. № 4. С. 720-722).
8. Волочаев М.Н., Квеглис Л.И., Логинов Ю.Ю. Наблюдение магнитной доменной структуры тонких пленок Fe₈₆Mn₁₃C методами Лоренцевой электронной микроскопии // Матер. XVIII Межд. научн. конф. Решетневские чтения, Красноярск: СибГАУ, 2014. - Ч.1. - С.457-459.
9. Kovalev I.V., Loginov Y.Y., Zelenkov P.V. Aerospace university activity for the development of information and telecommunication and space technologies using the mechanisms of technological platforms // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **70** (2015) 012010. doi:10.1088/1757-899X/70/1/012010
10. Kovalev I., Loginov Y., Zelenkov P. An integrated system of training engineers for aerospace industry in Siberia using innovative technology of the student project-and-team work // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015, Vol.174, P.537-543. doi:10.1016/j.sbspro.2015.01.701
11. Логинов Ю.Ю., Брильков А.В., Мозжерин А.В. Влияние сопротивления лицевого слоя солнечного элемента на выходные характеристики устройства // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф.Решетнева. 2015, т.16, № 1. - С.188-192.
12. Kovalev I.V., Loginov Y.Y., Zelenkov P.V. Training of engineers in the aerospace university with application of technology research and education centers // Turkish Onl. Journ. Educat. Technol. 2015, Vol. 14 (Spec. № 2 for INTE 2015), P.717-723.

13. Kovalev I.V., Loginov Y.Y., Zelenkov P.V. Scientific and Educational Center "Space Systems and Technology" // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **94** (2015) 012014. doi:10.1088/1757-899X/94/1/012014
14. Казьмин Б.Н., Трифанов И.В., Рыжов Д.Р., Колмыков В.А., Логинов Ю.Ю. Генератор СВЧ квантов на основе электронных пучков. Патент RU 2541162 С1. Бюл. № 4, 10.02.2015.
15. Казьмин Б.Н., Трифанов И.В., Логинов Ю.Ю., Рыжов Д.Р., Оборина Л.И., Бородулин Р.В., Сутягин А.В., Хоменко И.И. Способ СВЧ-генерации на основе электронных пучков. Патент на изобретение RU 2553574 С2. Бюл. № 17, 20.06.2015.

Проректор по НИД СибГАУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор

660037, Красноярск, проспект. имени газеты Красноярский
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ).
Тел. +7 (391) 262-95-94, E-mail: loginov@sibgau.ru



/Ю.Ю. Логинов/

й, 31,

Подпись Логинова Ю.Ю. заверяю,
Ученый секретарь УС СибГАУ,
к.и.н., доцент

А.Е.Гончаров