

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ (НИИ физики ЮФУ)

пр-т Стачки, д. 194, г. Ростов-на-Дону, 344090; Факс (863) 243-40-44, Телефон (863) 243-36-76;
E-mail: iphys@ip.rsu.ru; iphys@sfnedu.ru; <http://www.ip.rsu.ru>
ОКПО 02069148, ОГРН 1026103165241, ИНН/КПП 6163027810/616301001

11.05. 2016 г. № 604/166

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора НИИ физики ЮФУ,
доктор физ.-мат. наук

И.А. Вербенко

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию КОБЯКОВА Александра Васильевича
«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

Непрерывно растущие в течение многих десятилетий потребности микроэлектроники, состоят как в создании новых улучшенных модификаций уже известных устройств, так и в реализации вновь открываемых физических эффектов. К числу объектов микроэлектроники, представляющих значительный практический интерес, относятся тонкие пленки, которые непосредственно попадают в область нанонауки, испытывающей настоящий бум в последние годы. В случае, когда исследуемый объект обладает, по крайней мере, в одном направлении субмикронным размером, его физические свойства часто качественно отличаются от свойств соответствующих объектов макроскопического размера, что может приводить к новым неожиданным физическим эффектам. Кроме того, создание и исследование таких объектов несет дополнительные

технологические сложности и само по себе может являться предметом серьезной работы.

Одним из наиболее перспективных областей исследований является изучение пленочных гетероструктур спин-асимметричный материал – полупроводник, которые составляют основу спинтроники. Пленочные системы переходной металл – полупроводник демонстрируют богатство физических свойств, зависящих от большого количества параметров таких, как способ получения, толщина и количество слоев, легирующие добавки.

Поэтому диссертация А. В. Кобякова «Синтез и физические свойства трехслойных пленок в системе Co-Ge», связанная с отработкой технологии получения магнитных пленок Co/Ge/Co и исследованием в зависимости от условий получения их структурных и магнитных свойств, является, несомненно, **актуальной**.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- синтез трехслойных магнитных пленок Co/Ge/Co с различными толщинами слоя германия;
- паспортизация полученных образцов и установление связи шероховатости пленок и скорости их напыления;
- исследование условий возникновения фаз германидов кобальта;
- исследование магнитных свойств полученных пленок и определение межслоевого взаимодействия.

Научная новизна диссертации заключается в том, что автором впервые:

- разработана оптимальная технология синтеза многослойных магнитных пленок системы Co-Ge с контролируемым соотношением кубической и гексагональной фаз кобальта;
- обнаружен резкий рост намагниченности пленок выше температуры T_{TM} , что объяснено при помощи модифицированной модели Стонера-Вольфарта;
- установлено, что тип межслоевого взаимодействия слоёв кобальта является антиферромагнитным со слабой зависимостью от толщины немагнитной полупроводниковой прослойки.

Диссертация изложена на 112 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во *введении* автором обусловлена актуальность темы исследования, определены его цели и объекты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В *первой* главе приведен обзор литературы, основное внимание в котором уделено многослойным магнитным структурам с прослойкой из одно- и двухкомпонентных полупроводников, а также системам с редкоземельными слоями. Показано, что технология получения образцов (метод получения, температура и качество подложки, скорость осаждения пленки, и др.) качественным образом влияет на физические свойства получаемых структур таких, например, как величина и тип межслоевого обмена, намагниченность, константы магнитной анизотропии и коэрцитивное поле. Отдельный подраздел посвящен обзору практических приложений систем переходный металл/полупроводник, которые включают спиновый диод, спиновый транзистор, различные сенсоры, элементы памяти и другие. Таким образом, показано, что внедрение полупроводниковой прослойки в многослойные магнитные материалы значительно расширяет многообразие наблюдаемых потенциально полезных эффектов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, использованных в работе. В качестве метода получения пленок Co/Ge/Co выбрано ионно-плазменное напыление, что обусловлено рядом преимуществ над остальными методами, включая универсальность, безынерционность и другие. Характеризация и исследование физических свойств полученных образцов проводились при помощи широкого спектра экспериментальных методов, включая рентгеноструктурный анализ, электронную и атомно-силовую микроскопию, магнитные измерения при помощи СКВИД и ядерного и электронного магнитного резонансов, что позволило провести паспортизацию и изучение свойств образцов на высоком научном уровне.

В *третьей* главе описана технология синтеза тонких магнитных пленок Co/Ge/Co. Для напыления трехслойных пленок разработана система

заслонок, позволяющая открывать определенный материал, оставляя остальные закрытыми. Особое внимание уделено плазменной очистке поверхности подложки для удаления шероховатости. Технологические параметры синтеза оптимизированы по скорости напыления и температуре подложки, а диапазон толщин слоев кобальта выбран 12 – 16 нм, исходя из их намагниченности и межслоевого взаимодействия. В результате получены две серии образцов с толщинами слоев кобальта около 13 и 15 нм, и различными скоростями осаждения.

В *четвертой* главе проведены структурные и магнитные исследования. Согласно электронной микроскопии магнитные слои представляют собой смеси с различным содержанием кубической гранецентрированной (fcc) и гексагональной фаз кобальта, а германиевая прослойка идентифицируется как fcc-фаза. Присутствие каких-либо фаз германидов не обнаружено. Кроме того, возникновение фаз германидов кобальта целенаправленно исследовано методом твердофазного синтеза в пленках Ge/Co и показано, что германиды Co_5Ge_7 , CoGe_2 и другие возникают при температурах отжига выше используемых для синтеза трехслойных пленок Co/Ge/Co.

Согласно магнитным измерениям намагниченность пленок резко возрастает при температурах выше T_{TM} , называемой температурой блокировки. При предположении, что в матрице кубического Co распределены сильно анизотропные гранулы гексагональной фазы кобальта, обнаруженное магнитное поведение пленок моделируется с помощью модифицированной модели Стонера-Вольфарта, позволяющей адекватно описывать физику малых магнитных частиц.

Пятая глава посвящена исследованию магнитного взаимодействия слоев кобальта при помощи метода электронного магнитного резонанса. При предположении об идентичности слоёв кобальта установлено, что связь между ними является антиферромагнитной.

В *заключении* автором сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обусловлена использованием современных методов исследования и высокоточного оборудования, а также согласованностью результатов, полученных различными экспериментальными методами, и удовлетворительным согласием экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке условий синтеза трехслойной системы ферромагнитный металл – полупроводник с оптимальными физическими характеристиками, которая может найти применение при создании устройств спинтроники.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в организациях, исследующих как фундаментальные аспекты физики тонкопленочных материалов, содержащих магнитную и полупроводниковую подсистемы, так и разрабатывающих на их основе функциональные устройства и приборы: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Институт общей физики им. А. М. Прохорова (Москва), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН (Красноярск), Томский государственный университет, Сибирский федеральный университет (Красноярск), Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Санкт-Петербургский государственный университет, Уральский федеральный университет (Екатеринбург).

Диссертация А. В. Кобякова отвечает формуле специальности и пунктам № 2 и 5 паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных материалов. Результаты работы опубликованы в 4 статьях в рекомендованных ВАК РФ ведущих российских и зарубежных журналах и представлены в ряде докладов на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация А. В. Кобякова не содержит серьезных недостатков, но, тем не менее, можно сделать следующие **замечания**:

1. в работе обнаружена температура T_{TM} , называемая автором температурой блокировки, выше которой значительно возрастает намагниченность пленки. Температурное поведение намагниченности моделируется при помощи модифицированной модели Стонера-Вольфарта. Остается, однако, неясной роль в таком магнитном поведении полупроводниковой прослойки, проводимость которой, а значит и межслоевой обмен, растут с температурой;
2. методом ЯМР найдено, что соотношение кубической, аморфной и гексагональной фаз в слоях кобальта сильно зависит от толщины и структуры прослойки Ge. Возможно, однако, что найденное соотношение присуще не обоим слоям Co в Co/Ge/Co, а характеризует различие структур этих неэквивалентных слоёв, поскольку нижний выращен на покровном стекле, а верхний на слое германия. Это никак не комментируется;
3. в главе 5 при определении типа межслоевого взаимодействия слои кобальта считаются идентичными, хотя это может быть и не так, как указано в замечании 2;
4. в тексте работы присутствует значительное количество опечаток и неточностей. Список использованной литературы составлен небрежно, без единого стиля оформления.

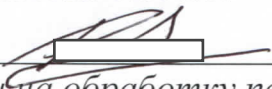
Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа А. В. Кобякова является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, а совокупность полученных автором результатов является важным вкладом в физику магнитных явлений.

Таким образом, диссертация «Синтез и физические свойства трехслойных пленок в системе Co-Ge» удовлетворяет предъявляемым к кандидатским диссертациям, критериям пп. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК Минобрнауки РФ в редакции

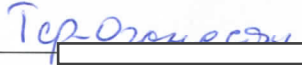
Постановления № 842 Правительства РФ от 24.09.2013, а её автор, Кобяков Александр Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Доклад А. В. Кобякова заслушан на научном семинаре НИИ физики ЮФУ. Отзыв на диссертацию обсуждён на заседании Ученого совета НИИ физики ЮФУ 21.04.2016, протокол № 3.

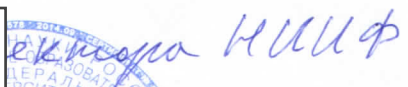
Заведующий лабораторией мультиферроиков
НИИ физики ЮФУ, доктор физ.-мат. наук по
специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор

 Раевский Игорь Павлович
Согласен на обработку персональных данных.
(Адрес: 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки 194, тел. +7 (863) 243-36-76; email: igorraevsky@gmail.com)

Старший научный сотрудник отдела кристаллофизики
НИИ физики ЮФУ, доктор физ.-мат. наук по
специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния,

 Тер-Оганесян Никита Валерьевич
Согласен на обработку персональных данных.
(Адрес: 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки 194, тел. +7 (863) 243-36-76; email: teroganesyan@sfedu.ru)

Подписи Раевского И. П. и
Тер-Оганесяна Н. В. удостоверяю

  
Директор НИИФ
Сердюков И. А.

Сведения о ведущей организации
по диссертации Кобякова Александра Васильевича
«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

Полное наименование организации в соответствии с её уставом	Научно-исследовательский институт физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	НИИ физики ЮФУ
Полное наименование отдела	Отдел кристаллофизики
Почтовый индекс, адрес организации	Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр-т Стачки 194
Веб-сайт	http://ip.sfedu.ru/
Телефон	+7(863) 243-36-76 +7(863) 243-40-44
Адрес электронной почты	iphys@sfedu.ru

Список основных публикаций работников ведущей организации по тематикам, смежным теме рассматриваемой диссертации, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций):

1. Bunina O. A. Structural Properties of Composite Thin Films BiFeO_3 - $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ / O. A. Bunina, I. N. Zakharchenko, Yu. I. Golovko, V. M. Mukhortov, D. V. Stryukov, Yu. I. Yuzyuk // *Ferroelectrics*. – 2012. – V. 439. – P. 67-73.
2. Маслова О. А., Исследование сверхрешеток $\text{BaTiO}_3/(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ методом дифракции рентгеновских лучей / О. А. Маслова, И. Н. Захарченко, О. А. Бунина, Ю. И. Юзюк, N. Ortega, A. Kumar, R. S. Katiyar // *Физика твердого тела*. – 2012. – Т. 54. – С. 953–955.
3. Маслова О. А., Сравнительное исследование пленки BaTiO_3 и сверхрешетки $\text{BaTiO}_3/(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ методами дифракции рентгеновских лучей и спектроскопии комбинационного рассеяния света / О. А. Маслова, И. Н. Захарченко, О. А. Бунина, Ю. И. Юзюк, N. Ortega, A. Kumar, R. S. Katiyar // *Физика твердого тела*. – 2012. – Т. 54. – С. 1526–1532.
4. Kumar N., Микроструктура, химические связи и фрикционные свойства нанокристаллических алмазных пленок, сформированных в различных

газовых средах / N. Kumar, A.T. Козаков, S. Dash, A. K. Tyagi, I. N. Lin // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55. – С. 1962–1972.

5. Prosandeev S. Properties of Epitaxial Films Made of Relaxor Ferroelectrics / S. Prosandeev, D. Wang, L. Bellaiche // Phys. Rev. Lett. – 2013. – V. 111. – P. 247602.
6. Лянгузов Н. В., Особенности оптических фононов в спектрах комбинационного рассеяния массива вертикальных микростержней ZnO на кремнии / Н. В. Лянгузов, А. С. Анохин, Д. И. Левшов, Е. М. Кайдашев, Ю. И. Юзюк, И. Н. Захарченко, О. А. Бунина // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – С. 542–548.
7. Raevski I. P., Studies of ferroelectric and magnetic phase transitions in multiferroic $\text{PbFe}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ solid solution ceramics / I. P. Raevski, V. V. Titov, M. A. Malitskaya, E. V. Eremin, S. P. Kubrin, A. V. Blazhevich, H. Chen, C.-C. Chou, S. I. Raevskaya, I. N. Zakharchenko, D. A. Sarychev, S. I. Shevtsova, // J. Mater. Sci. – 2014. – V. 49. – P. 6459–6466.
8. Ter-Oganessian N. V. Interpretation of magnetoelectric phase states using the praphase concept and exchange symmetry / N. V. Ter-Oganessian, V. P. Sakhnenko // J. Phys.: Condens. Matter. – 2014. – V. 26. – P. 036003.
9. Тихонов Ю. А., Исследование сверхрешеток $\text{BaTiO}_3/(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3/\text{SrTiO}_3$ методами рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света / Ю. А. Тихонов, И. Н. Захарченко, О. А. Маслова, Ю. И. Юзюк, N. Ortega, A. Kumar, R. S. Katiyar // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – С. 573–576.
10. Толмачев Г. Н. Синтез, структура и оптические характеристики тонких пленок ниобата бария-стронция / Г. Н. Толмачев, А. П. Ковтун, И. Н. Захарченко, И. М. Алиев, А. В. Павленко, Л. А. Резниченко, И. А. Вербенко // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – С. 2050–2055.
11. Lobzenko I. P. Electric polarization of magnetic domain walls in magnetoelectrics / I. P. Lobzenko, P. P. Goncharov, N. V. Ter-Oganessian // J. Phys.: Condens. Matter. – 2015. – V. 27. – P. 246002.
12. Anokhin A. S., Direct transition from the rhombohedral ferroelectric to the paraelectric phase in a $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ thin film on a $(111)\text{MgO}$ substrate / A. S. Anokhin, Y. I. Yuzyuk, N. V. Lyanguzov, A. G. Razumnaya, D. V. Stryukov, O. A. Bunina, Y. I. Golovko, V. B. Shirokov, V. M. Mukhortov, M. El Marssi, // EPL. – 2015. – V. 112. – P. 47001.
13. Тихонов Ю. А., Фазовые переходы в двух- и трехкомпонентных сверхрешетках перовскитов / Ю. А. Тихонов, А. Г. Разумная, О. А. Маслова, И. Н. Захарченко, Ю. И. Юзюк, N. Ortega, A. Kumar, R. S. Katiyar // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – С. 475–479.

14. Prosandeev S. A., Influence of epitaxial strain on clustering of iron in $\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ thin films / S. A. Prosandeev, I. P. Raevski, S. I. Raevskaya, H. Chen // Phys. Rev. B. – 2015. – V. 92. – P. 220419(R).
15. Puri M., Structural, dielectric and magnetic properties of $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ solid solution ceramics / M. Puri, S. Bahel, I. P. Raevski, S. B. Narang // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – V. 407. – P. 195–200.

Верно:

И.о. директора
НИИ физики ЮФУ,
доктор физ.-мат. наук



Вербенко Илья Александрович