

## Заключение

диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 25 ноября 2020 г. № 10

О присуждении Аунг Чжо Чжо, гражданину Республики Союз Мьянма, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Магнитные и структурные свойства высококоэрцитивных магнитных пленок» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния принята к защите 22 сентября 2020 года (протокол заседания № 8) диссертационным советом Д 212.141.17, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Аунг Чжо Чжо, 1988 года рождения.

В 2013 году соискатель окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по направлению подготовки «Конструирование и технология электронных средств», в 2018 году – аспирантуру по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. В настоящее время соискатель является стажером кафедры проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре проектирования и технологии про-

изводства электронных приборов Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Зайончковский Вячеслав Станиславович, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент, доцент кафедры материаловедения и химии.

Официальные оппоненты:

Шефтель Елена Наумовна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова;

Перминов Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент кафедры физического материаловедения дали положительные отзывы на диссертацию.

Официальные оппоненты сделали ряд критических замечаний, на которые соискатель ученой степени Аунг Чжо Чжо дал убедительные разъяснения.

Ведущая организация – Акционерное общество «Спецмагнит», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Сеиным Виктором Александровичем, кандидатом технических наук, главным технологом и Дроздовым Сергеем Сергеевичем, кандидатом технических наук, главным инженером, и утвержденном Сергеевым Константином Леонидовичем, кандидатом технических наук, исполнительным директором, указала, что диссертационная работа Аунг Чжо Чжо выполнена на актуальную и новую тему – получение высококоэрцитивных сплавов системы железо-кобальт-хром в тонкопленочном варианте для создания новых приборов. Тонкие пленки и постоянные магниты являются двумя важнейшими компонентами изделий современной радиоэлектроники и приборостроения. Однако в виде единого объекта, т.е. тонкопленочного постоянного магнита, они встречаются относительно редко. Особенно это относится к постоянным магнитам на основе системы железо-

кобальт-хром. Эта система сплавов уникальна в отношении комбинации свойств постоянного магнита (коэрцитивной силы, прежде всего), с относительно высокой пластичностью.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что определена структура слоев пленки, содержащей дисперсионно-твердеющий слой сплава Fe-Cr-Co (с легирующими добавками). В эту структуру входит компенсационный слой с высоким значением коэффициента относительного удлинения (медь), и адгезионный слой, который обеспечивает надежную связь с подложкой, и в то же время, не дает хрупких интерметаллидных соединений с компенсирующим слоем. Экспериментально установлено, что для сохранения в целостности слоя Fe-Cr-Co (в диапазоне толщин 200...3600 нм) в составе пленки после 60-ти секундных отжигов в диапазоне температур 600...650°C, располагающегося на кремниевой подложке, необходимо, чтобы толщина компенсирующего слоя меди была не меньше, чем толщина слоя Fe-Cr-Co. Определена морфология поверхности слоя Fe-Cr-Co двух составов и двух толщин этих слоев в трехслойной пленке. Найдены распределения по величинам площадей кристаллитов для указанных слоев субмикронных толщин и микронного диапазона толщин. Установлено, что отжиг приводит к формированию в пленках кристаллитов "округлой" формы, высотой вдвое превосходящие высоту окружающих их кристаллитов, а в пленках микронного диапазона толщин, ограненных кристаллитов. Положительным результатом является также отсутствие в структуре пленок (и после осаждения, и после отжига) хрупкой  $\sigma$ -фазы, которая обычно создает проблемы при термической обработке и применении сплавов этой системы в массивном состоянии. Определены условия ступенчатой термической обработки пленок для получения высоких значений коэрцитивной силы.

Ведущая организация отметила, что цель работы достигнута – получены пленки сплавов железо-кобальт-хром с коэрцитивной силой около 200...300 Э. Это, безусловно, будет служить прогрессу в области создания новых электронных приборов с магнитной составляющей. Новым результатом является также наблюдение роста кристаллов высококоэрцитивной фазы в зависимости от условий термической обработки пленки. Разработан и изготовлен вибромагнитометр простой конструкции для измерения магнитного момента и коэрцитивной силы малогабаритных образцов, с цифровой регистрацией сигнала.

Полученные результаты, отметила ведущая организация, могут быть использованы при разработке новых приборов радиоэлектроники, в том числе в НИТУ «МИСиС», АО «Тайфун», АО «НПП «Фаза» и др.

Критические замечания, высказанные в отзыве ведущей организации, Аунг Чжо Чжо подробно прокомментировал. Высказанные замечания, отметила ведущая организация, не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы Аунг Чжо Чжо, содержащей новый оригинальный материал и свидетельствующей о достаточной квалификации автора в области физики конденсированного состояния, физики магнетизма и технологии получения тонких пленок.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ (одна – в рецензируемом журнале, индексируемом в Scopus), получен патент РФ на изобретение. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации 4,95 п. л., из которых 2,17 п. л. принадлежат лично соискателю. Требования п.п. 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемые к публикации основных научных результатов диссертации, выполняются. Требования, установленные п. 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, соблюдаются. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. X-ray Diffraction Analysis of Thin Metal Films with Magnetic Layers of Fe-Cr-Co Alloy / Kyaw Kyaw Aung (Аунг Чжо Чжо) [et al.] // Condensed Matter and Interphases (Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy). 2020. Vol. 22. № 1. P. 58-65. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2529>

2. Тонкие металлические пленки с дисперсионно-твердеющими магнитными слоями сплава Fe-Cr-Co / Аунг Чжо Чжо [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. Т. 21. № 4. С. 505-518. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2362>

3. Исследование морфологии поверхности тонких металлических пленок с магнитными слоями Fe-Cr-Co / Аунг Чжо Чжо [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. №1-2. С. 69-75.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: **Котунова В.В.**, кандидата технических наук, генерального конструктора НПО «ЭРГА» (г. Калуга); **Генераловой К.Н.**, кандидата технических наук, начальника технологического отдела ЗОЧК ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь); **Вомпе Т.А.**, кандидата технических наук, научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) (г. Москва); **Лилеева А.С.**, доктора физико-математических наук, профессора Национального технологического университета «МИСиС» (г. Москва); **Ляховецкого В.Е.**, кандидата технических наук, директора ООО «ВЕНД» (г. Калуга); **Созонтова Е.А.**, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (г. Москва);

Все отзывы положительные. Имеются следующие замечания.

Котунов В.В. отметил, что текст автореферата диссертации содержит избыточное количество знаков препинания – запятых. Кроме того, он указал, что были бы желательны отжиги с последовательным плавным или ступенчатым снижением температуры отжига, для формирования высококоэрцитивного состояния, как это делается в случае объемных материалов системы Fe-Cr-Co.

Генералова К.Н. указала: «Автор в своей работе не привел сравнение полученных материалов с зарубежными и/или отечественными исследованиями (производителями) высококоэрцитивных тонких пленок. Автор в своей работе экспериментально исследует пленки с различным химическим составом. Некоторые из них относятся к разряду гистерезисных материалов. Необходимо обосновать, для каких целей возможно применение материалов с различным химическим составом».

Вомпе Т.А. в качестве замечаний отметила, что в автореферате встречаются описания физических величин без указания их значений; присутствует большое количество пунктуационных ошибок; в изложении текста автор использует профессиональный жаргон. Из автореферата неясно, в состоянии сжатия или растяжения находятся трехслойные пленки со слоем Fe-Cr-Co до роста температуры отжигов, приводящих к уменьшению радиуса кривизны подложек.

Лилеев А.С. отметил, что в тексте автореферата описывается разработанный автором и указанный в выводах по работе «простой вибромагнетометр». Однако он не использовался в проводимых исследованиях в силу высокого уровня шумов. Есть ли необходимость его описания в работе? В работе не указана погрешность измерения радиуса кривизны пленочных композиций. Далее указано, что в автореферате дано объяснение роста коэрцитивной силы и снижения прямоугольности, но обоснования данному объяснению не дано. Также в реферате встречаются стилистические неточности и неудачные обороты.

Ляховецкий В.Е. в качестве замечаний отметил, что пленки получались при одной температуре подложек при магнетронном напылении, что, возможно, приводило к фиксированному двухфазовому составу, получаемых ферромагнитных слоев. Второй недостаток – использование в автореферате латинских и кириллических обозначений составов.

На все критические вопросы, содержащиеся в отзывах на автореферат диссертации, Аунг Чжо Чжо дал аргументированные ответы.

В отзывах сделан вывод о том, что диссертация Аунг Чжо Чжо отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обоснован тем, что они являются компетентными специалистами в области физики тонких магнитных пленок (д.т.н. Шефтель Е.Н.) и физики объемных магнитных материалов системы Fe-Cr-Co (к.ф.-м.н. Перминов А.С.). Выбор ведущей организации обоснован тем, что Акционерное общество (АО) «Спецмагнит» является разработчиком и производителем постоянных магнитов и систем на основе этих магнитов для электроники, электротехники и приборостроения. На основе магнитов собственного производства АО выпускает магнитные элементы и системы (МЭС) для различных областей применения: МЭС для фокусировки и транспорта электронных потоков электровакуумных приборов; магнитные сепараторы и металлоотделители (железоотделители) для очистки от ферромагнитных загрязнений продукции пищевых, кормовых, химических, стекольных производств и производства строительных материалов. В настоящее время эта научно-производственная организация входит в холдинг АО «Росэлектроника» Государственной Корпорации «Ростех».

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** новая экспериментальная методика, позволившая создать тонкие металлические пленки на монокристаллической кремниевой подложке со слоями дисперсионно-твердеющих сплавов (ДТС) системы Fe-Cr-Co толщиной более одного микрометра;

**предложен** способ, позволяющий проводить термическую обработку пленочных композиций со слоями ДТС без превышения критических значений упругих напряжений и заключающийся во введении в композицию подслоя меди толщиной не менее толщины слоя ДТС;

**доказана** перспективность использования пленочных композиций со слоями сплава Fe-Cr-Co в качестве источников постоянного магнитного поля в магниторезистивных интегральных схемах, функционирующих в магнитных полях с напряженностью до 16 кА/м (200 Э);

**введены** новые представления о фазовых состояниях сплава номинального состава по хрому и кобальту (25Cr12Co), возникающих при термической обработке и характеризующихся максимальной концентрацией  $\alpha$ -фазы и минимальной концентрацией  $\gamma$ -фазы системы Fe-Cr-Co.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказана** необходимость формирования на кремниевой подложке слоев-компенсаторов и адгезионно-барьерных слоев, толщина которых должна быть не меньше толщины слоя ДТС, для сохранения в целостности пленочных композиций со слоями ДТС;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** базовые методы исследования свойств твердых тел, такие как отражательная, интерференционная и конфокальная оптическая микроскопии, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, магнитометрические и рентгенометрические методы; получены результаты о согласованности роста коэрцитивной силы пленок системы Fe-Cr-Co с изменением рельефа – формированием выступов на поверхности слоя при высоковакуумном отжиге в диапазоне температур 600...670 °С; обнаружено немонотонное изменение фазового состава слоя системы Fe-Cr-Co в трехслойной композиции в зависимости от температуры 60-ти секундного высоковакуумного отжига в температурном интервале 600...670 °С;

**изложены** технологические методики получения пленочных магнитов на основе сплавов системы Fe-Cr-Co;

**раскрыта** необходимость использования подслоев, обеспечивающих адгезию с подложкой и снижение механических напряжений, при формировании магнитотвердого слоя из сплава системы Fe-Cr-Co на кремниевой подложке;

**изучены** закономерности формирования фазового состава слоя Fe-Cr-Co, входящего в состав трехслойной композиции и полученного магнетронным распылением из мишени номинального состава по хрому и кобальту (25Cr12Co) при температуре подложки 200°C; установлено, что в композиции присутствуют  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы и отсутствует  $\sigma$ -фаза, и, кроме того, при температуре одноминутного отжига вблизи 630°C имеет место резкий рост концентрации  $\alpha$ - фазы со снижением концентрации  $\gamma$ - фазы, что позволит формировать высококоэрцитивное состояние магнитного слоя с помощью разделения  $\alpha_1$ - и  $\alpha_2$ -фаз;

**проведена модернизация** системы управления вибромагнетометром с цифровой регистрацией сигнала для измерения магнитного момента и коэрцитивной силы пленочных магнитов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны** новые технологии получения постоянных пленочных магнитов на кремниевой подложке, основанные на магнетронном распылении из мишени номинального состава по хрому и кобальту (25Cr12Co);

**определены** перспективы практического использования пленочных композиций со слоями сплава Fe-Cr-Co в качестве источников постоянного магнитного поля в магниторезистивных интегральных схемах;

**создана** система практических рекомендаций для прогнозирования магнитных параметров пленочных композиций со слоями сплава Fe-Cr-Co;

**представлены** рекомендации по разработке новых и совершенствованию существующих пленочных композиций, формируемых на кремниевых подложках и обладающих магнитными свойствами.

**Оценка достоверности результатов экспериментальных работ** данного исследования выявила:

**результаты** получены на сертифицированном оборудовании – электронных сканирующих (растровых) микроскопах высокого разрешения, конфокальном



микроскопе NanoFocus, вибромагнитометре LAKESHORE-7407VSM, рентгеновских дифрактометрах автоматического действия ДРОН-7М и ручного ДРОН-2.0. Калибровка приборов подтверждена испытаниями на контрольных образцах.

**теория** и концептуальные заключения построены на признанных в научном сообществе физических закономерностях и согласуются с результатами известных и часто цитируемых экспериментальных исследований;

**идея** о возможности создания пленочных магнитов на основе сплава Fe-Cr-Co **базируется** на опубликованных в научной литературе результатах экспериментальных исследований свойств данного сплава и известных технологических способах выращивания пленок на подложках;

**использовано** сравнение полученных автором значений коэрцитивной силы тонких слоев системы Fe-Cr-Co (толщиной 200 нм и менее) с данными других авторов: Tsung-Shune Chin., Kou-Her Wang., Cheng-Hsiung Lin, Chang H.C., Chang Y. H., Yao S. Y.;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных автором результатов с результатами других исследователей, представленных в независимых источниках по данной тематике;

**использованы** методы обработки исходных данных с помощью компьютерных технологий.

**Личный вклад соискателя** состоит в том, что он принимал участие в постановке задач исследования, в анализе полученных результатов, в модернизации установок магнетронного напыления и высоковакуумного фотонного (быстрого) отжига, в разработке и изготовлении установки «Простой вибромагнитометр». Эксперименты по разработке и реализации пленочных композиций с ДТС были выполнены в соавторстве, а эксперименты по напылению пленок и отжигу – только соискателем. Кроме того, соискатель участвовал в апробации результатов исследования, а также в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертационная работа соответствует пунктам 6 и 7 паспорта научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертационная работа Аунг Чжо Чжо «Магнитные и структурные свойства высококоэрцитивных магнитных пленок» соответствует критериям, установленным п.п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановле-

нием Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Она является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной для физики конденсированного состояния научной задачи – создание тонкопленочных постоянных магнитов на кремниевой монокристаллической подложке, обеспечивающих планарное магнитное поле, что имеет существенное значение для совершенствования технологии создания магниторезистивных интегральных схем.

Диссертация Аунг Чжо Чжо обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные Аунг Чжо Чжо решения аргументированы и согласуются с другими известными решениями.

На заседании 25 ноября 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Аунг Чжо Чжо ученую степень кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния 13, участвовавших в заседании из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены в состав совета 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета

Коржавый Алексей Пантелеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Лоскутов Сергей Александрович

Дата оформления Заключения 25 ноября 2020 года.