

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н.С. КУРНАКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИОНХ РАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 31. Тел. (495) 952-0787, факс (495) 954-1279, E-mail: info@igic.ras.ru

13.10.2022 № 12204-1-6215/796

на № _____ от _____

«Утверждаю»

Директор ИОНХ РАН
член-корр РАН, профессор, д.х.н.
В.К. Иванов
«13» 10 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Мироновича Андрея Юрьевича
**«Разработка основ технологии получения тонких анизотропных пленок
BaFe₁₂O₁₉ с высокой степенью кристаллографической текстуры»**
по специальности 2.2.3 Технология и оборудование для производства
материалов и приборов электронной техники.

Актуальность Одной из достоинств современных электронных устройств является их миниатюрность. Достижения в направлении снижения габаритов приборов связаны с развитием технологии получения тонко пленочных материалов. Однако при этом возникают значительные проблемы из за физико- химических свойств ряда функциональных материалов, и без решения этих проблем нельзя изготовить в планарном виде эти материалы.

Этим недостатком характеризуется большая часть ферритовых устройств, используемых в СВЧ-технике и радиоэлектронике. Для функционирования, например, СВЧ-циркулятора, необходимо подавать на ферритовую пластину магнитное поле смещения, которое целесообразнее создавать внешними постоянными магнитами. Наличие внешних магнитов является основным препятствием уменьшения габаритов прибора. Тем не менее, в некоторых ферритах возможен эффект самосмещения, позволяющий отказаться от постоянных магнитов и перейти к планарной технологии изготовления. Фактором, обуславливающим самосмещение, является магнитокристаллическая анизотропия и, соответственно, наличие в материале структурно совершенной кристаллической текстуры. Наиболее выраженной магнитокристаллической анизотропией характеризуются гексагональные ферриты, в частности $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ и анизотропные пленки гексаферрита бария являются перспективным материалом для планарных СВЧ-устройств. Кроме того, такие пленки могут иметь альтернативные практические применения – в устройствах спинтроники, в качестве магнитных носителей информации.

В настоящее время массовое производство анизотропных пленок гексаферритов и, соответственно, приборов на их основе отсутствует. Несмотря на то, что в лабораторных условиях этот материал был получен неоднократно, внедрить предлагаемые технологии синтеза в промышленность не удалось. Отчасти это связано со сложностью процесса и с высокими капитальными и эксплуатационными затратами.

С учетом вышеизложенного, тема представленной диссертационной работы, является весьма актуальной.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц, 64 рисунка, списка литературы из 176 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цель и задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость результатов, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны кристаллическая структура и свойства гексаферритов типа М, известные технологии получения гексаферритовых пленок, а также особенности их исследования известными аналитическими методами (рентгенофазовый анализ, атомно-силовая микроскопия, магнитометрия). Рассмотрены потенциальные применения анизотропных гексаферритовых пленок. Сделаны выводы, позволяющие сформулировать задачи исследования.

Во второй главе диссертации описаны методики получения и изучения объектов исследования.

В третьей главе продемонстрирована возможность получения текстурированных пленок гексаферрита бария на аморфных поверхностях, что позволяет использовать в качестве подложек пластины кремния с различными буферными слоями. Описаны результаты экспериментов по изготовлению пленок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ на кремниевых подложках с буферными слоями Al_2O_3 , Ti , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, Si_3N_4 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$. Текстурированные пленки гексаферрита бария были получены на $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, Si_3N_4 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$. При этом некоторые пленки (на $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ и Si_3N_4) характеризовались наличием макроскопических дефектов, вызванных возникающими в этих структурах напряжениями. Образцы $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ и $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ являлись наиболее пригодными для практического применения. Однако дальнейшие эксперименты показали, что на подобных структурах нельзя получить бездефектные пленки толщиной более 200 нм. Такой толщины недостаточно для функционирования СВЧ-устройств, и данные структуры могут найти применение только в альтернативных сферах.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по получению анизотропных пленок гексаферрита на сапфировых подложках

при низких температурах напыления. Для улучшения текстуры предложено периодически прерывать процесс напыления для формирования на поверхности ориентированного слоя. Экспериментально продемонстрирована состоятельность такого подхода.

Основной целью работы получение пленок гексагонального феррита бария (BaM) с высокой степенью кристаллографической текстуры и наличием магнитной анизотропии, а также разработка технологических приемов, упрощающих и снижающих стоимость производства таких пленок.

К числу основных задач можно отнести анализ научной литературы, посвященной исследованию пленок гексагональных ферритов, для выявления особенностей их синтеза и закономерностей формирования текстуры; экспериментальная проверка обнаруженных закономерностей; применение полученных данных для модификации существующих процессов синтеза или предложение альтернативных подходов.

В процессе выполнения работы были получены образцы пленок гексаферрита бария с высокой степенью кристаллографической текстуры 1) на кремниевых подложках с буферным слоем $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$; 2) на монокристаллических подложках сапфира (102) и (001). В первом случае установлены оптимальные режимы предварительной термообработки структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, позволяющие минимизировать возникающие в пленках напряжения. Во втором случае определены наилучшие условия синтеза по предложенному методу интервального напыления.

Научная новизна работы заключается в: исследовании возможности получения текстурированных пленок гексаферрита бария на кремниевых подложках с использованием различных буферных слоев; изучении влияния предварительного высокотемпературного отжига буферных слоев Al_2O_3 и Si_3N_4 на микроструктуру пленок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$; впервые продемонстрированной возможности улучшения степени кристаллографической текстуры пленок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ на подложках Al_2O_3 (001) посредством периодического прерывания процесса напыления; изучении и получении пленок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ на подложках

Al₂O₃ (102); разработке метода интервального напыления, позволяющего получать текстурированные пленки гексаферрита бария микронной толщины при относительно низких температурах подложки (300 °С).

Практическая значимость работы заключается в: разработке основ технологии получения анизотропных пленок BaFe₁₂O₁₉ с высокой степенью кристаллографической текстуры на подложках Si и Al₂O₃; демонстрации возможности получения текстурированных пленок BaFe₁₂O₁₉/Al₂O₃/Si₃N₄ с мелкозернистой структурой, которые могут быть использованы в устройствах магнитной памяти с высокой плотностью записи; разработке метода интервального напыления, позволяющего получать текстурированные пленки BaFe₁₂O₁₉ микронной толщины при температурах подложки во время нанесения всего около 300 °С, что на 500÷600 °С ниже, чем в существующих технологиях синтеза, обеспечивающих соизмеримую степень текстуры.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждены применением современных методов исследования и согласованием полученных результатов с литературными данными.

Автором опубликовано 8 работ, 5 из которых в журналах входящих в базу «Scopus» и «Web of Science». Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 2-х международных конференциях.

В соответствии с поставленной целью, настоящая диссертационная работа является логически завершенным научным исследованием, содержащим новое решение актуальной задачи: получение анизотропных пленок гексагонального феррита BaFe₁₂O₁₉.

Результаты работы могут быть рекомендованы для промышленного получения методом вакуумного нанесения пленок гексаферрита бария с высокой степенью текстуры для получения планарных приборов СВЧ-электроники. С результатами работы следует ознакомиться АО «НПП «ИСТОК»», АО «НИИ «Феррит-Домен».

Полученные в диссертационной работе результаты имеют важное фундаментальное значение для развития науки в нашей стране.

Диссертация изложена в логически последовательной форме, а ее содержание соответствует паспорту заявленной специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат в достаточной степени полно отражает содержание работы и дает представление о достигнутых результатах.

По диссертационной работе имеются **следующие замечания:**

1. Для лучшей оценки функциональности полученных микроструктур пленок важно значение анизотропии магнетизма наряду с анизотропией физических параметров. На наш взгляд в работе этому уделено не достаточное внимание.

2. Не полностью раскрыт потенциал метода АСМ для установления микроструктурированности пленок. В работе отсутствуют объемные картинки, которые можно получать с помощью метода АСМ. Такие картины лучше бы иллюстрировали и подтверждали данные РФА по структурному совершенству полученных пленок.

3. Недостаточно полно охарактеризованы соответствия и различия в температурных характеристиках гексагональных ферритов бария с материалами подложек. В частности, не рассмотрены коэффициенты линейного расширения и возможности диффузионного или химического сродства.

4. Представляется целесообразным изменить некоторую часть названия работы. Например, использовать “со структурно-совершенной кристаллической текстуры”.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая выполнена на современном научно – техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы в научном и прикладном плане.

Заключение

Диссертационное исследование Мироновича Андрея Юрьевича представляет завершённую научно – исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему: «Разработка основ технологии получения тонких анизотропных плёнок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с высокой степенью кристаллографической текстуры»

Представленные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Работа выполнена на высоком теоретическом, экспериментальном и аналитическом уровне.

Диссертационная работа Мироновича А. Ю. «Разработка основ технологии получения тонких анизотропных плёнок $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с высокой степенью кристаллографической текстуры» соответствует требованиям ВАК РФ «Положение о порядке присуждения ученых степеней» (ред. от 26.09.2022), а ее автор, Миронович Андрей Юрьевич, заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Содержание работы, автореферат и отзыв на диссертацию Мироновича А.Ю. рассмотрены и одобрены на заседании секции «Неорганическое материаловедение» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук 12.10 2022 года, протокол №. 3

Гл. науч. сотр. ИОНХ РАН,

Проф. д.х.н
Подпись руки
УДОСТОВЕРЯЮЩАЯ
Зав. протокольным
отд. ИОНХ РАН



С.Ф.Маренкин