

УДК

Тонкие пленки гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, выращенные методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001).

А.М. Коровин¹, Б.Б. Кричевцов¹, С.М. Сутурин¹, В.А. Дубовой^{1,2}, М.И. Мартынов^{1,2},

Н.С. Соколов¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

²ОАО «Завод Магнетон»

Аннотация: монокристаллические слои гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (BaM) выращены методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001). Процесс кристаллизации и кристаллическая структура слоев анализировались с помощью RHEED. Морфология поверхности исследована с помощью AFM. Магнитные свойства полученных структур изучались с помощью магнитооптического полярного эффекта Керра. Показано, что послеростовой отжиг структур сопровождается появлением прямоугольных петель магнитного гистерезиса с нормальной к поверхности ориентацией намагниченности в отсутствие магнитного поля.

Ключевые слова: BaM гексаферрит, тонкие пленки, LMBE, магнитная анизотропия, петли гистерезиса.

1. Введение

Гексаферриты М-типа, типичным представителем которых является $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (BaM - гексаферрит) являются перспективными материалами для СВЧ устройств в пленочном исполнении. Обзор методов синтеза, изучения свойств и применений гексаферритов можно найти в [1]. По сравнению с ферримагнетиками с структурой граната, шпинели или ортоферрита гексаферриты имеют ряд преимуществ. В частности, намагниченность гексаферрита BaM при комнатной температуре $4\pi M_s \sim 4$ Тл выше, чем в железо-иттриевом гранате (YIG) $4\pi M_s \sim 1,7$ Тл и феррите никеля (NFO) $4\pi M_s \sim 3,3$ Тл. Поле магнитной анизотропии H_a в гексаферрите BaM составляет около 1,75 Тл, что на два порядка выше, чем в YIG, и на один порядок, чем в NFO. Из-за высокого значения H_a частота ферромагнитного резонанса в гексаферрите BaM $f = \gamma(H + H_a - 4\pi M_s)$, в отсутствие внешнего поля $H = 0$ может составлять около $f \sim 36$ ГГц и линейно увеличивается с внешним магнитным полем H . В результате устройства на основе гексаферритов могут работать на частотах до $f = 60$ ГГц. Кроме того, могут быть созданы пленки гексаферритов со значительной остаточной намагниченностью, что позволяет в ряде случаев вообще отказаться от внешних магнитов при изготовлении СВЧ-устройств.

Для изготовления тонких пленок гексаферритов ранее применялись методы жидкофазной эпитаксии (LPE), импульсного лазерного напыления (PLD), магнетронного напыления постоянным током (MD), трафаретной печати (SP) и металлоорганического разложения (MO) на различных подложках (сапфир, Al_2O_3 , MgO, GdGa-гранат, 6H-SiC). Сравнение пленок, полученных разными методами, представленное в [2], показывает, что пленки высокого кристаллического качества, полученные методами PLD или LPE, имеют нормальную к плоскости ориентацию оси c , малые значения ширины линий ФМР ($\sim 30\text{-}60$ Э), но характеризуются малыми значениями остаточной намагниченности M_r и для их применения в устройствах СВЧ необходимо внешнее магнитное поле. В отличие от этого, пленки, изготовленные

методом SP [3] или МО [4], имеют прямоугольную петлю гистерезиса ($M_r/M_s \sim 0,9$), но характеризуются большими значениями ширины линии ФМП. Таким образом, получение пленок гексаферрита высокого качества и высокими значениями остаточной намагниченности представляют большой интерес.

В данной работе сообщается о выращивании монокристаллических слоев гексаферрита ($BaFe_{12}O_{19}$) методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира $\alpha-Al_2O_3$ (0001) и исследовании их структурных и магнитных свойств.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

В представляемой работе пленки ВаМ гексаферрита толщиной ~ 50 нм и 300 нм выращивались методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (LMBE) на подложках $\alpha-Al_2O_3$ (0001) на установке «Surface, GmbH». Пленки выращивались в атмосфере кислорода при давлении $P = 0,04-0,06$ мбар при температурах роста $T_{gr} = 750-1000^\circ C$. Поток вещества на подложку создавался путем абляции стехиометрической мишени $BaFe_{12}O_{19}$ эксимерным KrF-лазером с длиной волны 248 нм. Процесс роста непрерывно контролировался методом дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED). Для анализа картин RHEED применялся метод трехмерного картирования дифракционных картин. В результате φ -сканирования с шагом 0,01 градуса измерялась серия изображений, из которых с помощью программного обеспечения была получена 3D-карта распределения интенсивности рассеяния электронов в обратном пространстве. Исследовались, как выращенные структуры, так и структуры после процедуры отжига. Для проведения отжига образцы извлекались из ростовой камеры и отжигались до 2 часов на воздухе при температуре $1000^\circ C$.

Петли магнитного гистерезиса для нормальной к поверхности структуры ориентации магнитного поля H (-20 кЭ $< H < 20$ кЭ) изучались с помощью магнитооптического полярного эффекта Керра. Измерялось вращение плоскости поляризации ϕ линейно поляризованного света ($\lambda = 405$ нм), практически нормально отраженного от поверхности пленки. Для повышения чувствительности измерений применялась модуляционная методика с использованием ячейки Фарадея ($\delta\phi \sim 1''$).

Картинки RHEED, полученные от слоев гексаферрита, выращенных при температурах $700-850^\circ C$, хорошо соответствуют объемной структуре ВаМ (рис. 1а). В то же время увеличенная ширина тяжей и небольшое отношение сигнала к фону указывают на относительно невысокое кристаллическое качество выращенных пленок. Каждая вторая полоса имеет значительно большую интенсивность, что свидетельствует о нарушении дальнего порядка. Кроме того, картины ДБЭО слабо зависят от давления O_2 в диапазоне $0,005-0,05$ мбар.

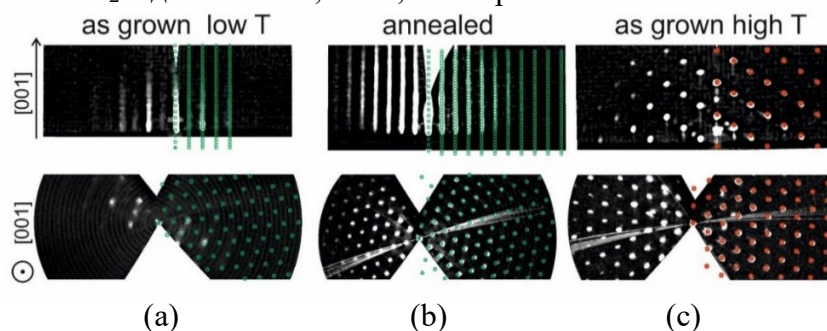


Рисунок 1. Трехмерная реконструкция данных RHEED для пленок ВаМ, выращенных при $800^\circ C$ (а), $800^\circ C$ и отожженных в течение 1 часа при $1000^\circ C$ (б), и , выращенных при $1000^\circ C$ (с) в той же шкале; зеленые и красные точки соответствует модельной решетке, рассчитанной с использованием параметров объемного кристалла ВаМ.

Пленки, выращенные при $T_{gr} = 700-850^{\circ}\text{C}$ и отожженные на воздухе при 1000°C , показывают картины RHEED, идеально соответствующие объемной решетке ВаМ (рис. 1в). Видно, что количество отражений и отношение сигнал/фон в них намного лучше по сравнению с не отожженными образцами. Все тужи имеют одинаковую интенсивность, что свидетельствует о наличии дальнего порядка.

Образцы, выращенные при температурах $T_{gr} = 900-1000^{\circ}\text{C}$, существенно отличаются от образцов, выращенных при более низких температурах. Картины RHEED таких образцов хорошо моделируются решеткой $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 1с).

Большинство “as grown” пленок ВаМ не показывают магнитных петель гистерезиса в магнитном поле, нормальном поверхности. Появление петель гистерезиса происходит после отжига образцов при температуре $T_{ann} = 1000^{\circ}\text{C}$ (Рис.2). После отжига наблюдается почти прямоугольная петля (Mr/Ms ~ 1) с коэрцитивным полем $H_c = 2,5$ кЭ. Влияние отжига на магнитные свойства пленок наблюдалось во всех структурах, выращенных при T_{gr} в диапазоне $700 - 850^{\circ}\text{C}$. Отметим, что даже 10-минутный отжиг приводит к появлению выраженной петли гистерезиса. Увеличение времени отжига приводит к увеличению как величины намагниченности в насыщении, так и отношения Mr/Ms, но не меняет значения коэрцитивного поля $H_c = 2,5$ кЭ. Скачки намагниченности при $H = \pm H_c$ связаны с образованием зародышей с противоположной ориентацией намагниченности и движением доменных стенок. Относительно высокие значения H_c в наших структурах свидетельствуют о закреплении доменов на дефектах.

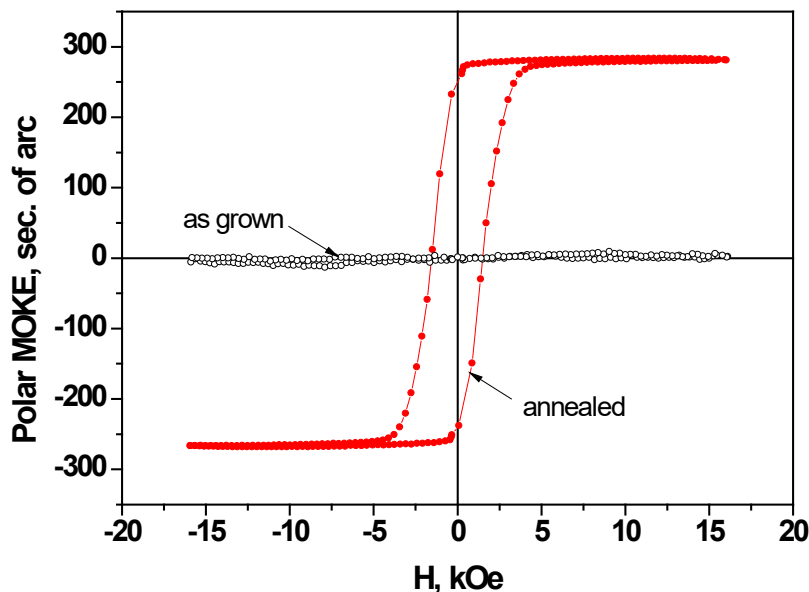


Рисунок 2. Полевые зависимости полярного эффекта Керра в магнитном поле H , нормальном плоскости структуры в “as grown” структуре, выращенной при 750°C (черные кружки) и после ее отжига в течении часа при температуре 1000°C (красные точки).

3. Заключение

Проведенное исследование показало, что тонкие слои гексаферрита ВаМ, полученные методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из сапфира (0001), имеют хорошо упорядоченную кристаллическую структуру, если они выращивались при температуре $T_{gr} = 700-850^{\circ}\text{C}$ и после роста отжигались на воздухе при 1000°C . Наблюдение прямоугольных петель магнитного гистерезиса в полученных структурах свидетельствует о наличии сильной одноосной магнитной анизотропии, позволяющей реализовать насыщенное магнитное состояние с нормальной к плоскости структуры ориентацией намагниченности в отсутствие

внешнего магнитного поля Н. Это может представлять интерес для создания приборов СВЧ диапазона, использующих для работы объемные спиновые волны. Будущие исследования этих структур будут сосредоточены на измерениях кристаллической структуры рентгенодифракционными методами, исследованиях намагниченности с помощью вибрационной магнитометрии и спектроскопии ферромагнитного резонанса.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-00768, <https://rscf.ru/project/22-22-00768/>)**.

Список литературы

1. Pullar R.C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. //Progress in Materials Science. – 2012. – Т. 57.- №. 4. – С. 1191.
2. Harris V.G. et al. Ba-hexaferrite films for next generation microwave devices.// J. Appl. Phys. -2006. – Т.99.- С.08M911.
3. Nie Yan, Harward I., Balin K., Beaubien A., Celinski Z. Preparation and characterization of barium hexagonal ferrite thin films on a Pt template// J. Appl. Phys. -2010. – Т.107.- С. 073903.
4. Chen Yajie et all. Oriented barium hexaferrite thick films with narrow ferromagnetic resonance linewidth.// Appl. Phys. Lett.- 2005.- N. 88.- С. 062516.