Магнитооптические эффекты в нанотолщинных пленках на основе ЖИГ и подложках

# А.В. Телегин, Ю.П. Сухоруков, И.Д. Лобов, С.В. Наумов, С.С. Дубинин, А.П. Носов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Магнитооптические (МО) эффекты Фарадея и Керра исследованы в синтезированных сверхтонких (менее 50 нм) магнитных пленках на основе железоиттриевого граната (ЖИГ) и в диэлектрических подложках в видимой области спектра. Впервые проведена оценка толщин магнито-мертвого и магнито-пассивного слоев в пленках и изучены особенности эффектов, связанные с вкладом отраженного света и МО свойствами подложек. Показано, что спектральные зависимости и величины эффектов Фарадея и Керра в наноразмерных пленках соответствуют эффектам для объёмного ЖИГ (Рис.1), что демонстрирует высокое качество полученных пленок и их перспективность для



оптоэлектроники.

Рисунок 1 – Спектры удельного Фарадеевского вращения *F* для пленок BiY<sub>2</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> различной толщины (левая шкала) и спектр постоянной Верде для подложки Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (правая шкала).

#### Публикация:

1. <u>Особенности магнитооптических эффектов Фарадея и Керра в наноразмерных пленках</u> <u>Y3Fe5O12 и подложках Gd3Ga5O12, Nd3Ga5O12</u> / Ю.П. Сухоруков, А.В. Телегин, И.Д. Лобов, А.М. Коровин. – Текст: непосредственный // Оптика и спектроскопия. — 2024. — V. 132. — P. 740—746.

<u>2. Magnetooptical Faraday and Kerr effects in nanosized BiYIG/GGG structures</u> / Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, I.D. Lobov, S.V. Naumov, S.S. Dubinin, K.A. Mer encova, M.S. Artemiev, A.P. Nosov. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2024. — V. 608. — P. 172415—172420

3. <u>Magnetooptical gyrotropic effects in nanosized BiYIG films and diamagnetic YAG substrates</u> / Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, I.D. Lobov, S.V. Naumov, S.S. Dubinin, K.A. Merencova, M.S. Artemyev, A.P. Nosov. – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. – 2024.– V. 136 – 193905. <u>https://doi.org/10.1063/5.0233868</u>

Работа выполнена по теме шифр «Спин».

Актуальность исследования: отработана методика синтеза наноразмерных магнитных пленок железоиттриевого граната с висмутом с высоким структурным и МО совершенством. Определены особенности влияния МО свойств подложек на наблюдаемые эффекты и рассчитана толщина нарушенного критического слоя в структурах пленка/подложка. Показано, что величины МО эффектов в наноразмерных пленках близки к их значениям для толстых пленок, моно- и поликристаллов того же состава.

Цель экспериментального исследования: синтезировать и исследовать магнитооптические свойства магнитных пленок толщиной менее 50 нм, а также отдельно подложек, и определить особенности магнитооптических эффектов в наноструктурах ЖИГ/подложка.

#### Задачи исследования:

синтезировать тонкопленочные наноструктуры ЖИГ/подложка; 1) 2) измерить спектральные и полевые зависимости эффектов Фарадея и Керра в пленках и подложках; 3) оценить вклад эпитаксиальных напряжений и магнитооптических своййств подложки в наблюдаемые эффекты в наноразмерных пленках.

Объект исследования: пленки Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> и Bi<sub>x</sub>Y<sub>3-x</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> на подложках: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>,  $Gd_3Ga_5O_{12}$ ,  $Nd_3Ga_5O_{12}$ ,  $r-Al_2O_3$ 

Методы исследования: поляризационно-чувствительная спектроскопия в прошедшем и отраженном свете (эффекты Фарадея и Керра) в видимом диапазоне спектра.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, синтез образцов, проведение экспериментов, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

## 1. Синтезированы тонкопленочные наноструктуры ЖИГ/подложка

Отработана технология магнетронного распыления из аттестованной поликристаллической мишени качественных тонкопленочных структур на основе различных ЖИГ толшиной 5-55 нм на диэлектрических подложках. Пленки осаждались со скоростью V=1.5 нм/мин и температуре подложки T=473 К. После осаждения образцы отжигались 3 часа при  $T=700^{\circ}C.$ Толщину пленок контролировали по времени напыления И с помощью оптического профилометра. Эффект Фарадея и полярный эффект Керра измерялись при комнатной температуре по однолучевой методике на отдельных установках в магнитных полях до 1.2 поверхности пленки. Тл. Погрешность измерений составила менее 5%.

#### 2. Измерены спектральные И полевые зависимости эффектов Фарадея и Керра

эффектов Спектры Фарадея И Керра ДЛЯ наноразмерных пленок BiYIG соответствуют спектрам объёмных образцов (Рис.3). В пленках максимальное удельное фарадеевское вращение достигает ~200000 град/см в поле 0.2 Тл, эффект Керра достигает -25 мин. Это говорит о высоком МО полученных пленок. Спектральные качестве



Рисунок - 2 Дифрактограмма мишени. На вставках - СЭМ изображения



Рисунок - 3 Спектры эффекта Керра 1- для наноструктуры BiYIG/YAG, 2 – пленки BiYIG на неполированной (2) и полированной (3) подложке YAG.

зависимости эффектов для подложек имееют линейный ход с максимум в области выскоих энергий. Полярный эффект Керра исследовался как для пленок на полированных подложках, так и на подложках с диффузно-отражающей (шероховатой) стороной, что позволило исключить вклад света, отраженного от обратной стороны подложки. Показано, что Керровское вращение для непрозрачных подложек близко к нулю и не превышает 0.1 мин. Полевые зависимости эффектов Фарадея и Керра демонстрируют насыщение эффектов в полях выше 0.2 Тл, только в случае пленок толщиной больше 10 нм.

## 3. Выделен вклад эпитаксиальных напряжений и МО свойств подложки в эффекты Фарадея и Керра

В работе определена постоянная Верде для подложек и показано, что величина эффекта Фарадея в них сопоставима с эффектом Фарадея в наноразмерных структурах пленка/подложка. Спектры эффекта Керра для наноразмерных пленок на полированных подложках формируются вкладом света, отраженного от задней поверхности подложки. В то же время для подложек с диффузно-отражающей стороной этот вклад практически

равен нулю, что позволило определить эффект Керра в пленке. Отметим, что поле насыщения из эффекта Керра почти не зависит от толщины пленки и типа подложки.

Для исследования роли интерфейса в формировании МО свойств наноразмерных пленок в рамках модели Ван-дер-Мерве была проведена оценка толщины релаксационного слоя, образованного на границе раздела пленка/подложка изза несоответствия параметров кристаллических решеток пленки и подложки. Например, для структуры YIG/GGG эта составила *h* ~ 20a, YIG/NdGG величина ~ 5a, BiYIG/GGG ~ 34a, а для BiYIG/YAG ~ 46a, где а постоянная решетки пленки (Рис.4). Таким образом все полученные структуры имеют толщину пленки близкую или меньше толщины критического слоя, однако МО эффекты по



Рисунок - 4. Условная схема релаксационного слоя и соответствующая величина удельного фарадеевского вращения F в пленках ЖИГ.

величине сопоставимы с эффектами в толстых пленках и объемных материалах и начинают спадать только при толщинах пленок менее 25 нм.

## Выводы:

Полученные тонкопленочные структуры в виде наноразмерных пленок ЖИГ на диэлектрических подложках демонстрируют высокое структурное совершенство и магнитооптическое качество, характерное для объемных пленок и кристаллов.

В магнитооптических эффектах Фарадея и Керра тонкопленочных наноструктур определяющим является сильный (пара)диамагнитный вклад подложек. За вычетом вклада подложки величина удельного фарадеевского вращения пленок в максимуме достигает 25.10<sup>5</sup> град/см.Тл, полярного эффекта Керра – порядка 20 мин в поле 0.2 Тл.

Проведена оценка толщины релаксационного слоя в пленках (~20-50 нм) и продемонстрировано, что даже пленки толщиной близкой к критической могут обладать огромным фарадеевским и керровским вращением, близким к вращению в объемном ЖИГ.

Показано, что величины эффектов Фарадея и Керра для массивных диэлектрических подложек больше или сопоставимы с МО эффектами в наноразмерных структурах BiYIG/подложка, что вносит определенные парадигмы в конструкцию магнитооптическиактивных наноструктур и планарных элементов оптоэлектроники на их основе.