

УДК 535.32/58

**УСИЛЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В  
УЛЬТРАТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ И ЕГО  
РЕГИСТРАЦИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ЭФФЕКТА  
КЕРРА**

© 2018 О.В. Боровкова<sup>1,\*</sup>, Х. Хашим<sup>2,3</sup>, М.А. Кожяев<sup>1,4</sup>, С.А. Дагесян<sup>5</sup>,  
А. Чакраварти<sup>6,7</sup>, М. Леви<sup>6</sup>, В.И. Белотелов<sup>1,5</sup>

*<sup>1,\*</sup>Российский квантовый центр, Россия*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет*

*(МИСИС), Россия*

*<sup>3</sup>Университет Танта, Египет*

*<sup>4</sup>Институт общей физики РАН, Россия*

*<sup>5</sup>Московский государственный университет, Россия*

*<sup>6</sup>Технологический университет Мичигана, США*

*<sup>7</sup>Университет Радбоуд, Нидерланды*

*E-mail: o.borovkova@rqs.ru*

При помощи экваториального магнитооптического эффекта Керра показано, что в ультратонких ферромагнитных пленках (толщиной менее 100нм) наблюдается усиление магнитооптического отклика. Гирация материала возрастает с уменьшением толщины пленки, хотя сам эффект Керра при этом может уменьшаться.

Ультратонкие, толщиной несколько десятков нанометров, магнитные диэлектрические пленки представляют значительный интерес в связи с их потенциальным применением для нанофотоники и спинтроники. Недавно было показано, что удельный эффект Фарадея (ЭФ) в таких нанометровых пленках, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, нарастает при толщине пленки менее 100нм [1], причем, чем тоньше становится пленка, тем более значительный рост испытывает удельный ЭФ, что связано, по-видимому, с увеличением магнитооптического отклика пленок по сравнению с объемным материалом или более толстыми пленками. Однако, так как ЭФ напрямую зависит от толщины ферромагнитного слоя, то при исследовании ультратонких пленок погрешность данного метода заметно возрастает при уменьшении толщины пленок.

В данной работе для регистрации изменения гирации материала в зависимости от толщины ферромагнитной пленки было предложено ис-

пользовать экваториальный магнитооптический эффект Керра (ЭЭК), усиленный при помощи поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [2-4]. ЭЭК связан с изменением граничных условий для падающего света при воздействии магнитного поля, поэтому он может оставаться значительным по величине даже для ультратонких ферромагнитных пленок. Кроме того, возбуждение на поверхности ферромагнитной диэлектрической пленки ППП в плазмонной структуре позволяет значительно усиливать величину ЭЭК, как это было показано впервые в [2].

В качестве ультратонких ферромагнитных пленок были выбраны образцы с пленками висмут-замещенного железо-иттриевого граната (ЖИГ), толщина ферромагнитного диэлектрика в которых составляла 60нм, 46нм и 19нм. Образцы были выращены методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний галлиевой подложке. Все образцы были получены от одной исходной магнитной пленки [1]. Для получения образцов с различной толщиной пленки, ферромагнитный диэлектрик стравливали при помощи ортофосфорной кислоты до нужной толщины.

Затем на поверхность образцов нанесли золотые плазмонные структуры, в которых возбуждались поверхностные плазмонные волны [2-3]. Толщина золота в структурах составляла 80нм. Период и ширина зазоров подбирались специально для каждой пленки, чтобы обеспечить эффективное возбуждение ППП на одних и тех же частотах во всех трех образцах и,

тем самым, исключить влияние дисперсии диэлектрических свойств материала на результаты измерений. Для пленки толщиной 60нм был выбран период 324нм, для пленки 46нм – период 322нм и для самой тонкой пленки 19нм – период решетки 347нм. Ширина зазоров была выбрана 75нм для того, чтобы пик ЭЭК был максимальный для всех трех образцов.

Затем, были экспериментально получены двумерные спектры пропускания всех трех образцов при двух противоположных направлениях магнитного поля и рассчитаны спектры ЭЭК для каждого образца в зависимости от угла падения и длины волны падающего света. Величина экваториального эффекта Керра  $\delta$  рассчитывалась следующим образом

$$\delta = 2 \frac{I(M) - I(-M)}{I(M) + I(-M)}, \quad (1)$$

где  $I(M)$  - интенсивность света, прошедшего через образец, а  $M$  - намагниченность образца.

В эксперименте образцы помещались между катушек электромагнита, поле которого можно было перестраивать. Свет от галогеновой лампы фокусировался на образце посредством системы линз. Измерения проводились при приложенном внешнем магнитном поле 2000 Гс, в то время как магнитное поле, необходимое для насыщения намагниченности исследуемых образцов, составляет 1800 Гс. Прошедший сквозь образец свет собирался при помощи микробъектива на входную щель спектрометра, который раскладывает свет по длинам волн и углам. Для увеличения отношения

сигнал/шум, каждое измерение проводилось 200 раз, а затем усреднялось по всем измерениям.

В то же самое время, для каждого из образцов подобные спектры были рассчитаны численно при помощи метода связанных мод в пространстве Фурье. Для расчета дисперсии недиагонального элемента (гирации) тензора диэлектрической проницаемости ЖИГ была использована модель оптических переходов в ионах железа в октаэдрической и тетраэдрической подрешетках ЖИГ, описанная ранее в работах [5,6]. Параметры данной модели подбирались так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие численно рассчитанных и экспериментально измеренных спектров ЭЭК для ферромагнитных пленок различной толщины. При этом оказалось, что ширины оптических переходов в ионах железа в тетраэдрических подрешетках возрастают с уменьшением толщины пленки. При этом, для октаэдрической подрешетки ничего подобного не наблюдается.

На рис. 1 приведены спектры ЭЭК для трех образцов, полученные при измерениях под углом  $10^\circ$ . Сплошными линиями показаны теоретические кривые, а точками отмечены данные, полученные в эксперименте. На графиках отчетливо видны два резонанса в ЭЭК, на длине волны 745нм и 870нм, связанные с возбуждением поверхностных плазмонных мод. Видно, что полученные теоретические спектры продемонстрировали хорошее соответствие экспериментальным результатам.

Сравнение параметров модели для различных образцов показало, что гирация возрастает с уменьшением толщины пленки, то есть, чем тоньше пленка, тем более сильным магнитооптическим откликом она обладает. В частности, на длине волны 754нм (вблизи одного из плазмонных резонансов) недиагональный элемент тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1=0.0084$  в пленке толщиной 60нм,  $\varepsilon_1=0.0088$  в пленке толщиной 46нм и  $\varepsilon_1=0.0102$  в пленке толщиной 19нм. Следовательно, гирация возрастает в более тонких пленках, что согласуется с результатами, полученными ранее при помощи эффекта Фарадея [1].

Интересно отметить, что, несмотря на рост гирации, величина ЭЭК тем не менее уменьшается для более тонких пленок, тоньше 40нм, что показано на рис. 2, где приведена зависимость максимального значения ЭЭК от толщины ферромагнитной пленки. Уменьшение ЭЭК в экстремально тонких пленках связано с тем, что поле ППП в рассматриваемых магнито-плазмонных структурах проникает в ферромагнитный диэлектрик на глубину до 40 нм (поле плазмона на этой глубине падает в  $e$  раз). То есть в образцах с пленками толщиной 60нм и 46нм, свет локализован в ферромагнитном диэлектрике. Однако, в образце с толщиной пленки 19нм свет значительно проникает в немагнитную гадолиний галлиевой подложку, что приводит к уменьшению величины ЭЭК при эффективном увеличении магнитооптического отклика в такой ультратонкой пленке. Если проанали-

зировать, как ведет себя величина ЭЭК при росте толщины пленки, то мы увидим, что она линейно возрастает в пленках толщиной от 0 до 30 нм и при толщинах пленки свыше 40 нм выходит на насыщение. Более подробно это было показано в работе [7].

Таким образом, в данной работе продемонстрировано увеличение магнитооптического отклика ультратонких ферромагнитных пленок при уменьшении их толщины. Для точного исследования этого эффекта в данной работе предложено измерять экваториальный магнитооптический эффект Керра в ультратонких ферромагнитных пленках. По сравнению с применявшимся ранее для подобных исследований эффектом Фарадея, величина ЭЭК не зависит от толщины пленки и даже для пленок толщиной порядка нескольких нанометров величина ЭЭК может быть легко измерена.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект номер 16-32-60135 мол\_а\_дк) и Фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levy M., Chakravarty A., Huang H.-C., and Osgood, Jr. R.M. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. 011104.*
2. *Belotelov V.I. et al. // Nature Nanotech. 2011. V. 6. 370.*
3. *Pohl M. et al. // New J. Phys. 2013. V. 15. 075024.*
4. *Borovkova O., Kalish A., and Belotelov V. // Opt. Lett. 2016. V. 41. 4593.*
5. *Dionne G.F. and Allen G.A. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. 6127.*
6. *Allen G.A. and Dionne G.F. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. 6130.*
7. *Borovkova O.V., Hashim H., Kozhaev M.A., Dagesyan S.A., Chakravarty A., Levy M., and Belotelov V.I. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. 063101.*

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ В СТАТЬЕ

О.В. Боровкова<sup>1,\*</sup>, Х. Хашим<sup>2,3</sup>, М.А. Кожаев<sup>1,4</sup>, С.А. Дагесян<sup>5</sup>,

А. Чакраварти<sup>6,7</sup>, М. Леви<sup>6</sup>, В.И. Белотелов<sup>1,5</sup>

## УСИЛЕНИЕ МАГНИТО-ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В УЛЬТРАТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ И ЕГО РЕГИСТРАЦИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ЭФФЕКТА КЕРРА

**Рис. 1.** Спектры экваториального магнитооптического эффекта Керра  $\delta$  для трех образцов, полученные при измерениях под углом  $10^\circ$ . Сплошными линиями показаны теоретические кривые, а точками отмечены данные, полученные экспериментально.

**Рис. 2.** Спектр максимального значения экваториального эффекта Керра  $\delta$  при  $\lambda=0.754\text{мкм}$  (угол падения света  $10$  градусов) в зависимости от толщины ферромагнитной пленки  $h$ .



