

ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

PHYSICS AND MATHEMATICS

*Вестник Физико-технического института
Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Том 2 (70). № 1. 2018. С. 5–23
Journal of Physics and Technology Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University
Volume 2 (70). No. 1. 2018. P. 5–23*

УДК 537.632

МАГНИТОПЛАЗМОННЫЕ СТРУКТУРЫ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 2

Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Недвига А. С. , Шапошников А. Н.*

*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
E-mail: nedviga@list.ru

Представлены результаты по созданию и исследованию магнитоплазмонных наноструктур на основе магнитооптических пленок феррита граната и фотонных кристаллов. Рассмотренные структуры обладают высокими значениями коэффициента пропускания и удельного фарадеевского вращения в видимой и ближней инфракрасной областях оптического спектра.

Ключевые слова: плазмонный резонанс, магнитоплазмоника, плёнка граната, магнитофотонный кристалл, плазмонная наноструктура.

PACS: 42.70.Qs, 71.36.+c, 78.20.Ls, 78.66.–w, 78.67.–n, 85.70.Sq

ВВЕДЕНИЕ

Плазмон-поляритонные резонансы (ППР), создаваемые с применением субволновых одномерных решеток, и двумерных структур (нанодисков, наночастиц) из благородных металлов, находящихся на поверхности пленки феррита-граната или встроенных в нее, открывают новые возможности для усиления магнитооптических (МО) эффектов и позволяют использовать эти материалы для создания устройств управления оптическими сигналами в информационно-телекоммуникационных сетях и МО сенсоров технического и медико-биологического назначения. Определенный интерес для таких применений представляют также плазмонные магнитофотонные кристаллы, сочетающие в себе свойства пространственно-периодической структуры – фотонного кристалла, плазмонной и МО сред.

Настоящая часть обзора посвящена рассмотрению именно такого рода магнитоплазмонных наноструктур.

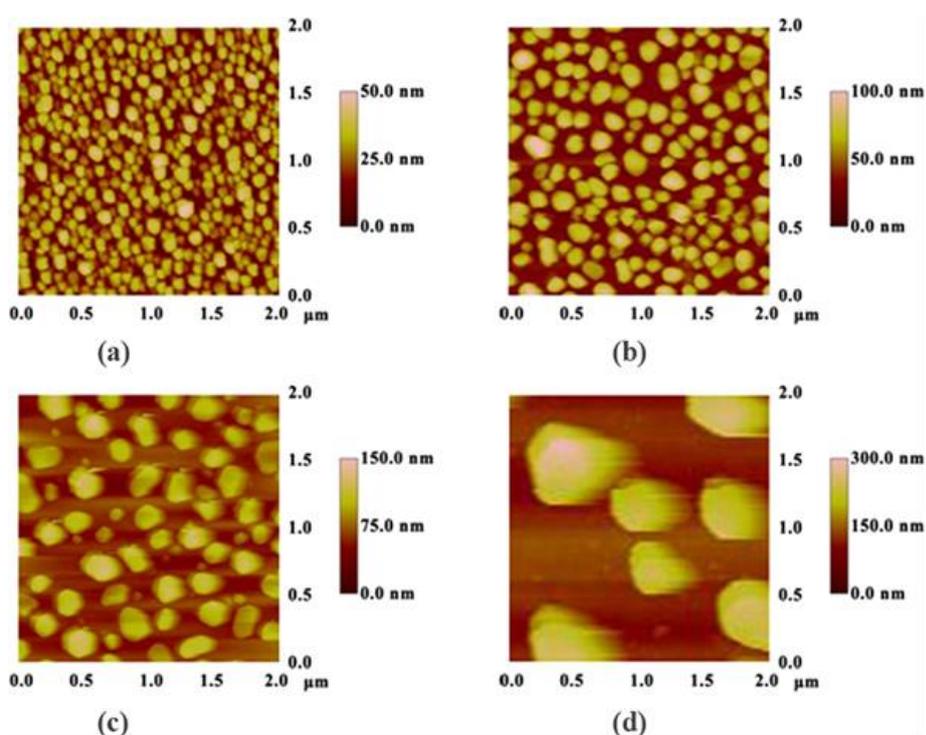
1. ПЛАЗМОННОЕ УСИЛЕНИЕ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ В ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ С НАНОЧАСТИЦАМИ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ

В работе [1] было достигнуто усиление фарадеевского вращения до 65 % на длине волны 680 нм с использованием сильных локализованных электрических полей, индуцированных возбуждением плазмонных резонансов в наночастицах золота, сформированных на поверхности гранатовых пленок.

Образцы пленок состава $(\text{Bi,Gd,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ со средней толщиной 201 нм

выращивали с использованием технологии жидкофазной эпитаксии на (111)-ориентированных подложках из гадолиний-галлиевых гранатов.

Образцы были разделены на четыре группы, и на части поверхности каждого образца были осаждены нанослои золота различной толщины (5; 7,5; 10 и 15 нм). Затем по одному образцу из каждой группы отжигали при заданной температуре (700, 800, 1000 °С) на воздухе в течение 30 мин, образуя на поверхности пленок наночастицы золота. В результате каждый из двенадцати образцов содержал наночастицы на поверхности пленки с различной геометрией и интервалами между частицами. Размеры наночастиц и интервалы между ними были измерены с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ). АСМ-изображения наночастиц четырех образцов, отожженных при 700 °С, приведены на рисунке 1. Ансамбли наночастиц имели следующую геометрию: от 10 нм в высоту при 60 нм в диаметре и интервале 70 нм до 160 нм в высоту при 480 нм в диаметре и интервале 720 нм.

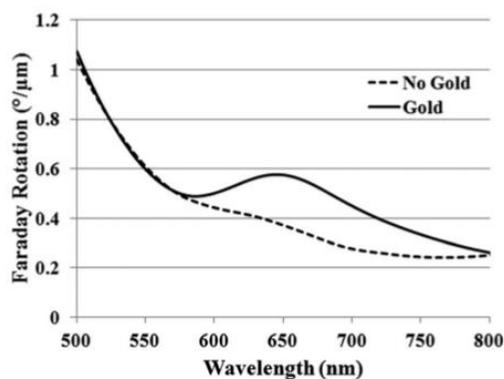


Толщина нанослоя золота: 5 нм (а), 7,5 нм (б), 10 нм (с), 15 нм (д)

Рис. 1. АСМ-изображения четырех образцов, отожженных при 700 °С [1]

Как показано на рис. 2, наблюдается значительное увеличение удельного фарадеевского вращения на длине волны около 650 нм, что можно объяснить плазмонным резонансным возбуждением наночастиц золота на поверхности пленки. Аналогичные результаты были получены для всех двенадцати образцов. Анализ

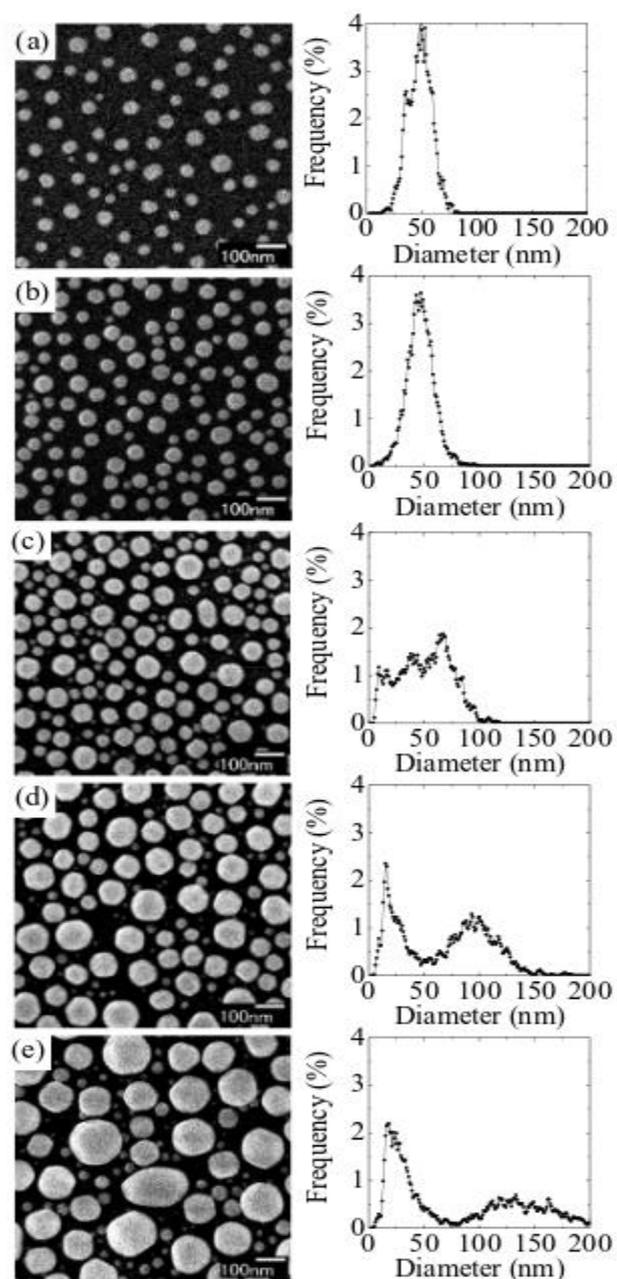
результатов показал, что существует корреляция между геометрией наночастиц и увеличением угла фарадеевского вращения. Независимо от температуры отжига, наблюдается увеличение угла фарадеевского вращения при увеличении отношения средней высоты наночастиц к толщине образца. Угол фарадеевского вращения также возрастает с уменьшением отношений среднего радиуса наночастицы к её поверхности и среднего радиуса наночастицы к среднему расстоянию между ними. Кроме того, существует сильная корреляция между увеличением угла фарадеевского вращения и величиной отношения толщины наночастиц к толщине гранатовой пленки. Эти тенденции свидетельствуют о том, что увеличение угла фарадеевского вращения можно контролировать, образуя ансамбли наночастиц с различными распределениями и геометрией.



пунктирная линия – без золота; сплошная линия – с золотом (слой золота толщиной 5 нм, отожжен при 800 °С)

Рис. 2. Спектральная зависимость удельного фарадеевского вращения образца пленки $(\text{Bi,Gd,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$

В работе [2] для получения структур из пленки граната (Bi: YIG) с частицами Au авторы использовали метод повторного образования наночастиц для увеличения их плотности. Во-первых, тонкую пленку Au толщиной 5 нм осаждали на подложке из плавленого кварца с использованием системы термического распыления. Пленку Au отжигали при температуре 1000 °С в электрической печи на воздухе в течение 10 мин. Вторая Au-пленка осаждалась на полученные частицы и затем снова отжигалась. Эта процедура осаждения и отжига повторялась запланированное количество раз. Затем, пленка Bi: YIG толщиной 60 нм наносилась на частицы Au на подложке с помощью ВЧ-магнетронной системы распыления (Shimadzu, HSR-551S) с использованием мишени $\text{Bi}_1\text{Y}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_x$; для кристаллизации граната пленку отжигали при 750 °С в течение 1 ч. При увеличении числа повторений распределение диаметров частиц изменилось (рис. 3).



а – одно повторение (толщина Au 5 нм), б – два повторения (толщина Au 10 нм),
 с – четыре повторения (толщина Au 20 нм), д – шесть повторений (толщина Au
 30 нм), е – восемь повторений (толщина Au 40 нм)

Рис. 3. РЭМ-изображения и распределение диаметров наночастиц Au, полученных с
 помощью повторяющегося образования

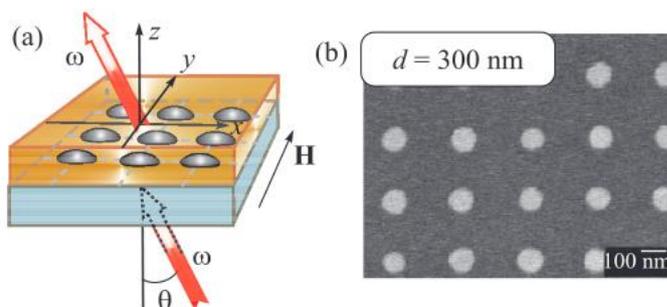
В полученных композитных пленках наблюдалось усиление фарадеевского вращения, связанного с плазмонным резонансом. С шестью повторениями максимальный угол фарадеевского вращения составил минус $1,2^\circ$, что было в 20 раз больше, чем у пленки Bi: YIG без наночастиц золота.

В работе [3] была исследована возможность использования в магнитоплазмонных структурах серебряных наночастиц вместо золотых. Чтобы получить усиление и настройку длины волны МО отклика, связанного с локализованным ППП, были изучены композитные структуры из висмут-замещенных пленок ЖИГ (Bi: YIG) с частицами Ag и частицами сплава Au-Ag на поверхности. Такая структура с частицами Ag не показала усиления фарадеевского вращения. Напротив, пленки Bi: YIG с Au-Ag-частицами демонстрировали усиление МО-отклика для разных длин волн возбуждения локализованным ППП. Наблюдалось усиленное фарадеевское вращение для композитных структур Bi: YIG/Au-Ag с объемными отношениями Ag до 0,6. Кроме того, при изменении объемного соотношения Ag пик вращения смещается в область коротких длин волн. Отсутствие усиления МО эффекта в структуре Bi: YIG/Ag, по мнению авторов, может быть объяснено модификацией межфазной среды: поскольку химически активные частицы Ag могут образовывать соединения с кислородом, не дающие вклад в усиление МО эффекта. Частицы же сплава Au-Ag в композитных структурах Bi: YIG/Au-Ag были химически устойчивы, в результате этого наблюдалось соответствующее усиление МО эффекта.

2. МАГНИТОПЛАЗМОННЫЕ СТРУКТУРЫ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ МАССИВАМИ НАНОТОЧЕК

Рассмотренные выше композитные структуры с наночастицами золота и серебра являются квазипериодическими, т. к. расположение наночастиц на поверхности диэлектрической магнитной пленки не является строго периодическим. И эффекты, наблюдаемые в таких системах, носят чисто статистический характер.

Авторы работы [4] продемонстрировали структуру, которую можно рассматривать как вариант периодических структур с наночастицами благородных металлов (рис. 4), т. е. как магнитоплазмонный кристалл (МПК).



а – схематическое изображение, б – изображение МПК с периодом 300 нм в растровом электронном микроскопе

Рис. 4. Магнитоплазмонный кристалл

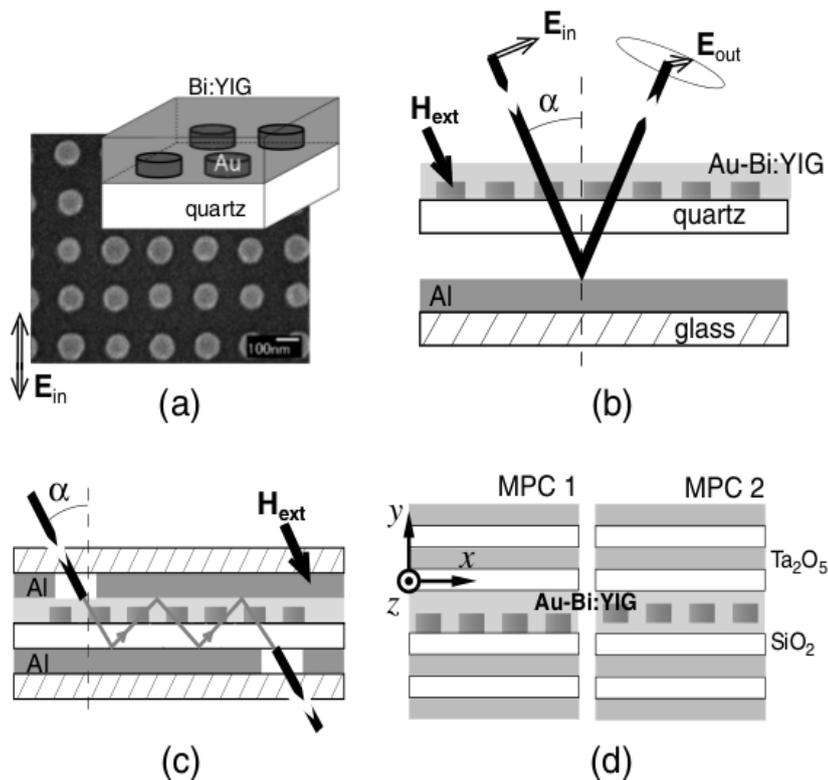
Исследуемые образцы представляли собой планарные массивы золотых нанодисков, изготовленные методом электронной литографии и расположенные в узлах квадратной решетки на кварцевой подложке.

Высота исходных дисков – 30 нм, диаметр – 100 нм. На нанодиски с помощью распыления ионным пучком был нанесен слой легированного висмутом феррит-граната (Bi: YIG) толщиной около 90 нм. Исследовались три структуры с периодами решетки $d = 200, 300$ и 400 нм (рис. 4 а).

Изображение образца с $d = 300$ нм в растровом электронном микроскопе приведено на рис. 4 б.

В [5] были продемонстрированы реакции плазмонных МО систем золото-гранат в разных режимах распространения света с целью выявления особенностей реакций этих систем. Было обнаружено, что полоса поглощения, связанная с возбуждением локализованного плазмонного резонанса в золоте, влияет на суммарный угол поворота плоскости поляризации в рассматриваемых системах и это усиление не является МО свойством, присущим Bi: YIG. Результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами численного анализа особенностей усиления МО отклика золото-гранатовых структур, обусловленного плазмонным эффектом.

Образец Au-Bi: YIG, использованный в эксперименте, был выполнен с целью удовлетворения условиям локализованного ППП в видимом диапазоне длин волн света (рис. 5 а). Он состоял из двумерной квадратной решетки Au-дисков, сформированной на кварцевой подложке толщиной 1 мм, и пленки Bi: YIG, нанесенной поверх решетки золото/кварц. Диски Au имели диаметр 100 нм и высоту 30 нм, период двумерной решетки 200 нм, толщина пленки Bi: YIG 100 нм. Эксперименты проводились при нормальном и наклонном падении коллимированных поляризованных световых пучков (угол падения α); конфигурации, показанные на рисунке 5 (b и c), использовались для многопроходного режима. Образец Au-Bi: YIG имел размеры сторон 5×5 мм, ширина отверстий в непрозрачных алюминиевых зеркалах 1 мм. Детектируемый свет не был дифрагирован образцом Au-Bi: YIG в диапазоне измерений от 0,4 до 1 мкм. Геометрия эксперимента, включая ориентацию образца, Al зеркала и оптических путей, схематически показана на рис. 5 (b-d). Приведена система координат для определения плоскостей поляризации; E_x и E_z для поляризации поперек и вдоль Au-дисков, соответственно.

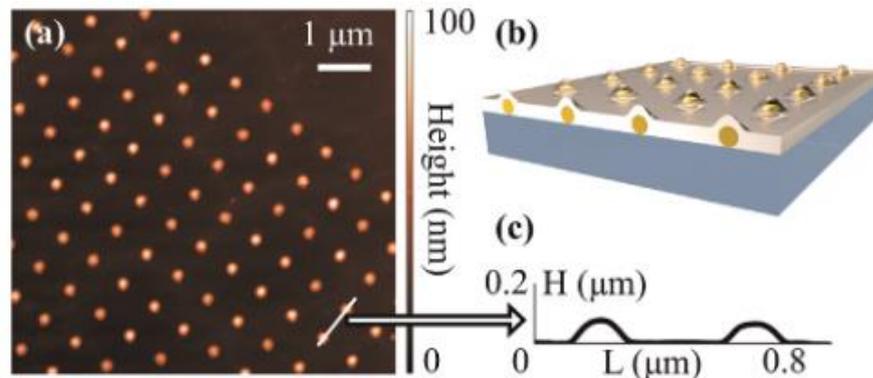


а – РЭМ-изображение двумерной решетки дисков Au и схема слоя Au-Bi: YIG,
 б, с – геометрия экспериментов для многопроходного режима,
 д – схема МПК с дефектами слоев Au-Bi:YIG, решетка Au была одномерной

Рис. 5. Образец Au-Bi: YIG, исследованный в эксперименте

Подобная структура рассмотрена в работе [6] (рис. 6). Образец представляет собой квадратную матрицу из массива наночастиц золота размером 110 нм, образующих двумерную квадратную решетку с периодом 600 нм на подложке из плавленого кварца, покрытую пленкой Bi: YIG толщиной 100 нм. (рис. 6). Эта структура предназначена для поддержки локальных плазмонных колебаний на наночастицах золота, связанных плазмонных мод и квази-волноводных мод с локализацией оптического поля между рядами частиц в магнитном материале. Квадратная матрица золотых нанодисков на подложке из плавленого кварца была изготовлена электронно-лучевой литографией из пленки с напыленным золотом. Массив отжигали при 1000 °С в течение 10 мин для расплавления дисков и получения сферических капелек. Пленка Bi: YIG была сформирована поверх решетки с помощью ВЧ-магнетронного распыления и последующего отжига образца. На рис. 6 приведено АСМ-изображение поверхности образца, схема образца и поперечное сечение АСМ-изображения вдоль ряда частиц. Видно, что поверхность пленки Bi: YIG имеет полусферические «луковицы» над наночастицами высотой 80 нм.

АСМ-изображение показывает хорошую периодичность решетки. Измерения на вибромагнитометре выявляют ось легкого намагничивания, лежащую в плоскости образца с магнитным полем насыщения 1 кЭ.



а – АСМ-изображение поверхности образца, б – схема образца, в – поперечное сечение профиля АСМ

Рис. 6. Двумерная наногранулированная решетка золото-гранат

3. ПЛАЗМОННЫЕ МАГНИТОФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Особый интерес у исследователей вызывают МПК, сочетающие в себе свойства пространственно-периодической структуры – фотонного кристалла (ФК), плазмонной и магнитооптической сред – плазмонные магнитофотонные кристаллы. Важной составной частью этих структур являются магнитофотонные кристаллы (МФК). Поэтому до рассмотрения плазмонных структур на их основе кратко остановимся на представлении МФК из работы [7], где они экспериментально реализованы и хорошо описаны.

Наиболее важной особенностью фотонных кристаллов по сравнению с однородными оптическими материалами является наличие фотонных запрещенных зон. Ширина этих зон отвечает за резонансную связь света со структурой кристалла в тех случаях, когда его периодичность идеальна или нарушена дефектами, введенными намеренно [7].

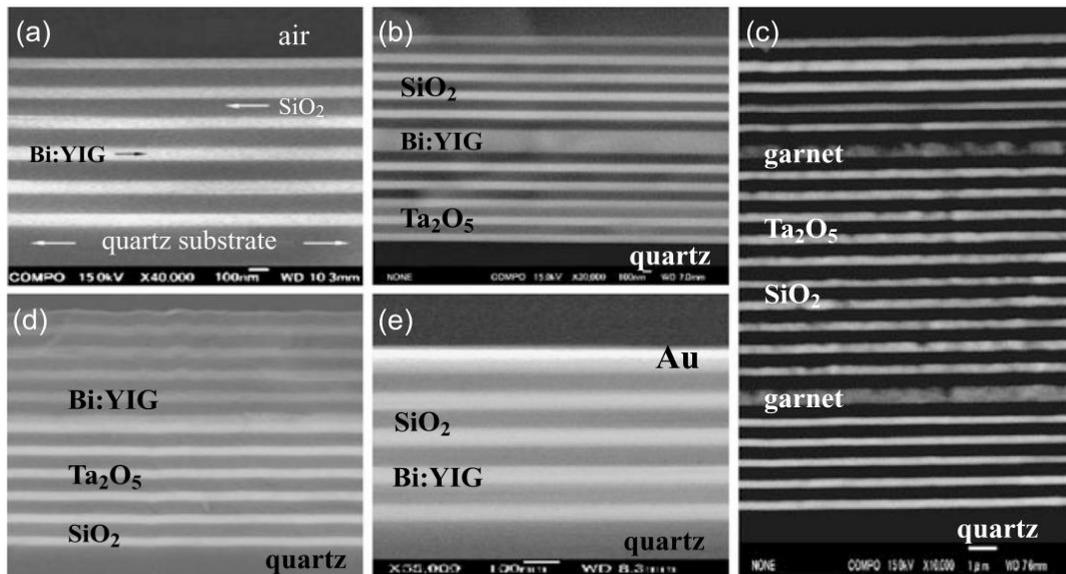
С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) – средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды – в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название – фотонные кристаллы [8].

Точно так же, как полупроводниковые кристаллы влияют на распространение электронов, фотонные кристаллы влияют на распространение света, обеспечивая новый механизм управления потоком света [9].

ФК с дефектным слоем обеспечивают локализацию электромагнитных волн внутри этого слоя как микрорезонатора. Такая локализация происходит при возбуждении дополнительных оптических состояний внутри фотонной запрещенной зоны – резонансов Фабри-Перо или оптических состояний Тамма. Магнитофотонные кристаллы (ФК с магнитными включениями) обеспечивают дополнительные возможности для модуляции оптического сигнала посредством МО эффектов [10].

Когда составной материал ФК является магнитным или даже только дефект, введенный в периодическую структуру, является магнитным, то он проявляет уникальные оптические и МО отклики. Сильное ограничение фотонов, связанное с магнитным дефектом, может быть использовано для улучшения и оптимизации МО эффектов и оптической нелинейности существующих материалов. Фактически, значительное усиление МО эффектов Фарадея и Керра было продемонстрировано с помощью 1D МФК, состоящих из тонкой пленки магнитного граната, расположенной между диэлектрическими брэгговскими зеркалами [9].

Первоначальные теоретические исследования МФК касаются распространения света в прерывистых (дискретных) магнитных средах с 1D-структурой, где фарадеевское вращение анализируется с использованием матричного подхода. В этих работах [7-10] рассматриваются мультислойные структуры: многослойные пленки, состоящие из висмутзамещенного иттриевого граната (Bi: YIG) и SiO₂, которые складываются в произвольной последовательности. Показано, что для таких мультислоев увеличение как коэффициента пропускания, так и угла фарадеевского вращения происходит благодаря локализации света, вызванной множественной интерференцией. Угол фарадеевского вращения увеличивается по мере увеличения степени локализации света и может достигать максимального значения в 1D МФК с микрорезонаторной структурой, где слой граната расположен между двумя брэгговскими зеркалами (рис. 7). Следуя теоретическим предсказаниям такие структуры были изготовлены различными методами, и была выполнена их экспериментальная оценка.



а – многослойная структура гранат/SiO₂, б – микрорезонатор Фабри-Перо, в – двойной микрорезонатор, д и е – таммовские структуры

Рис. 7. РЭМ-изображения 1D МФК [7]

Сложная многослойная структура, состоящая из МФК с микрорезонаторным слоем Bi:YIG и осажденной на его поверхность плазмонной решеткой, была создана и изучена с целью комбинирования функциональных возможностей магнитофотонных и плазмонных кристаллов. На рис. 8 [11] приведена схема плазмонного магнитофотонного кристалла. Слои D₁ – слои SiO₂ (толщина 117 нм для слоев зеркала и 100 нм для верхнего слоя); слои D₂ – слои TiO₂ (толщина 76 нм); слои M₁ и M₂ – магнитные диэлектрики составов Bi_{1,0}Y_{0,5}Gd_{1,5}Fe_{4,2}Al_{0,8}O₁₂ и Bi_{2,8}Y_{0,2}Fe₅O₁₂, соответственно, (толщина равна 72 и 271 нм, соответственно); на верхний слой SiO₂ нанесена золотая решетка (высота 60 нм, период 370 нм, ширина щели 220 нм).

Плазмонная структура также допускает возбуждение гибридных плазмонно-волноводных мод, локализованных в диэлектрических брэгговских зеркалах МФК или волноводных мод внутри слоя микрорезонатора. Эти моды приводят к появлению дополнительных резонансов в оптических спектрах структуры и усилению экваториального эффекта Керра (ЭЭК).

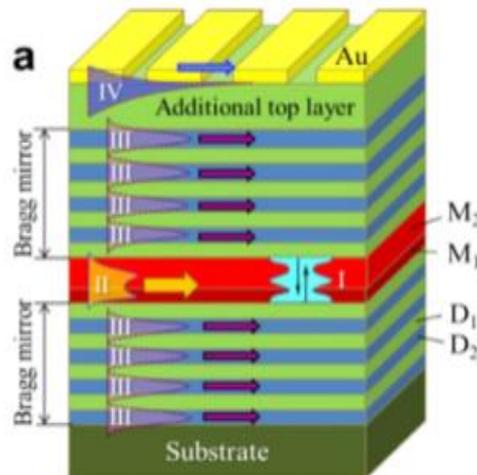


Рис. 8. Схема плазмонного магнитофотонного кристалла [11]

На основе структур подобного типа стало возможным создание сенсоров, использующих в своей работе сверхдобротный резонанс. В работе [12] представлен новый тип плазмонного сенсора, основанного на магнитофотонной плазмонной гетероструктуре со сверхдобротным резонансом. Экспериментально показан магнитоплазмонный резонанс с угловой шириной $0,06^\circ$, что соответствует добротности 700 и является рекордной величиной для магнитоплазмонных сенсоров. Продемонстрировано, что за счет возбуждения длиннопребных плазмонов значительно возрастает по амплитуде экваториальный эффект Керра, что увеличивает чувствительность магнитоплазмонного сенсора к изменению показателя преломления до $1,8 \cdot 10^3 \%$. Проведенный численный расчет показал, что дальнейшая оптимизация параметров магнитоплазмонной структуры позволит увеличить чувствительность до $5 \cdot 10^5 \%$.

Гетероструктура содержит ФК, необходимый для реализации длиннопребной моды в несимметричной структуре с газом в качестве анализируемого вещества, слой висмут-замещенного феррита-граната для создания МО отклика и золотую пленку, необходимую для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов (рис. 9).

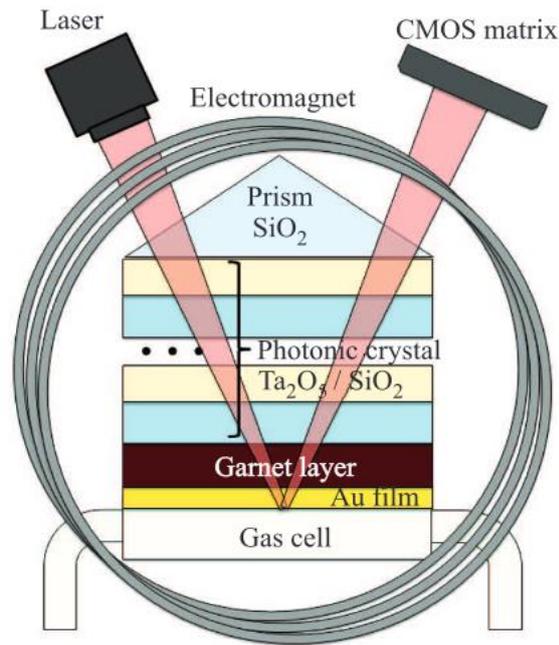


Рис. 9. Схема плазмонной гетероструктуры и магнитоплазмонного сенсора на ее основе [12]

Параметры ФК и магнитного диэлектрика – слоя висмут-замещенного феррита-граната – были подобраны для реализации длиннопребной плазмон-поляритонной моды на границе золото – воздух для выбранной рабочей длины волны 790 нм. ФК нанесен на подложку из плавленного кварца методом магнетронного распыления и содержит 16 слоев пентаоксида тантала Ta₂O₅ толщиной 119,3 нм, чередующихся с 16 слоями кварца SiO₂ толщиной 164,7 нм. На фотонный кристалл был нанесен слой висмут-замещенного феррита-граната Bi_{2,1}Dy_{0,9}Fe_{3,9}Ga_{1,1}O₁₂ толщиной 125 нм, после чего произведен отжиг образца при температуре 600 °С для перевода граната в ферромагнитную фазу. В результате отжига произошли небольшие изменения диэлектрических проницаемостей слоев структуры, которые были определены путем анализа спектров пропускания структуры при нормальном падении света в диапазоне длин волн от 500 до 900 нм. После отжига диэлектрическая проницаемость гранатовой пленки $\epsilon_g = 5,52 + 0,018 \cdot i$, пентаоксида тантала $\epsilon_{Ta_2O_5} = 4,6200 + 0,0016 \cdot i$, кварца $\epsilon_{SiO_2} = 2,1911 + 0,0007 \cdot i$. Затем методом радиочастотного магнетронного распыления гранатовый слой был покрыт тонкой золотой пленкой толщиной 8 нм. Небольшая шероховатость поверхности золотой пленки учитывалась в расчетах путем увеличения эффективного значения мнимой части диэлектрической проницаемости золота, для данного образца диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{Au} = -24,1166 + 1,7238 \cdot i$. Часть образца была оставлена не покрытой золотом.

Слой золота плазмонной гетероструктуры находится в контакте с

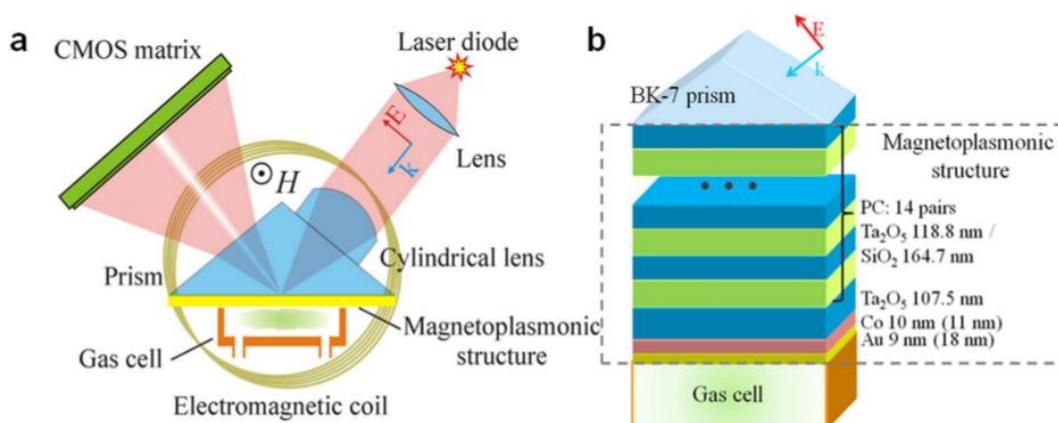
анализируемым веществом в газовой ячейке. Изменение состава анализируемого вещества, и, как следствие, его показателя преломления, приводит к сдвигу резонансов в спектрах отражения и ЭЭК.

Для демонстрации работы структуры как сенсора были проведены эксперименты, в которых в качестве анализируемых газов выступали воздух с показателем преломления $n = 1,000292$ и гелий с показателем преломления $n = 1,000035$.

Анализируемый газ доставляли в специальную цилиндрическую ячейку с диаметром прокладки 12 мм, высотой 2 мм и объемом около 200 мкм, закрепленной на металлической поверхности плазмонной гетероструктуры. В качестве аналитов использовали три газа: гелий с чистотой 99,8 %, воздух с влажностью 30 % и смесь газов бутана и пропана с 70 % концентрацией бутана, которые вдувались в ячейку при атмосферном давлении и температуре 21,6 °С.

Оптические измерения проводились через 2 мин после заполнения ячейки анализируемым газом во избежание тепловых эффектов. Изменения газовых соединений и соответствующие изменения показателя преломления регистрировались как сдвиг угла отражения и спектра ЭЭК. Глубина проникновения возбужденной поверхностной волны в газ, а также её длина распространения были значительно меньше размера газовой ячейки, поэтому воздействие стенок ячейки было незначительным.

Ранее аналогичный подход был применен для создания магнитоплазмонного сенсора на базе кобальтовых пленок [13]. Схема сенсора показана на рис. 10.



а – схема экспериментальной установки, б – чувствительная магнитоплазмонная гетероструктура

Рис. 10. Схема магнитоплазмонного датчика [13]

Подобная плазмонная магнитофотонная гетероструктура приведена в [14] (рис. 11).

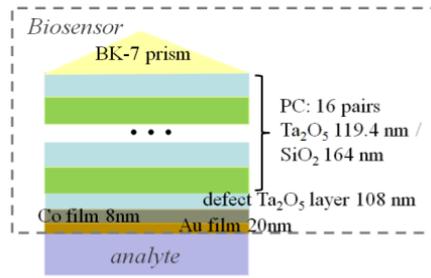


Рис. 11. Плазмонная магнитофотонная гетероструктура для ППР-сенсора

Особенностью этого датчика является одновременное использование магнитных слоев для получения МО отклика и специально разработанных одномерных ФК, которые значительно улучшают фактор качества и величину оптического и МО резонансов.

В [15] предложен МПК, изготовленный на кварцевой подложке и содержащий пленку висмут-замещенного железо-иттриевого граната состава $\text{Bi}_{0,5}\text{Y}_{2,5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с наночастицами золота, помещенную между диэлектрическими зеркалами Брэгга, состоящими из N пар чередующихся четвертьволновых слоев TiO_2 и SiO_2 , и имеющий резонансную длину волны λ_R . Оптическая толщина пленки висмут-замещенного железо-иттриевого граната с наночастицами золота кратна половине λ_R . Преимуществом предлагаемого МПК является возможность получения в нем высоких значений коэффициента усиления фарадеевского вращения. Может быть использован для управления когерентными потоками света в устройствах оптоэлектроники и нанофотоники в системах отображения, хранения и передачи информации.

В [16] предложен плазмонный МФК, содержащий слои висмут-замещенного железо-иттриевого граната $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и нанесенного на него железо-висмутитового граната $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, которые размещены в оптическом резонаторе из двух брэгговских зеркал с резонансной длиной волны λ_R и имеют суммарную оптическую толщину, кратную половине λ_R . Между слоями $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ кристалл содержит наночастицы благородного металла. Плазмонный МФК обеспечивает возможность получения высоких значений коэффициента усиления фарадеевского вращения. Может быть использован для управления когерентными потоками света в устройствах оптоэлектроники и нанофотоники в системах отображения, хранения и передачи информации.

В [17] предложен плазмонный МФК, содержащий нанесенное на подложку из плавного кварца зеркало Брэгга, состоящее из N пар чередующихся диэлектрических слоев с большим и малым показателями преломления, помещенную на диэлектрическое зеркало двухслойную пленку висмут-замещенного железо-иттриевого граната. Кристалл дополнительно содержит между слоями железо-иттриевого граната наночастицы золота размером от 20 до 80 нм, а на поверхности пленки железо-иттриевого граната пленку золота толщиной от 40 до 100 нм.

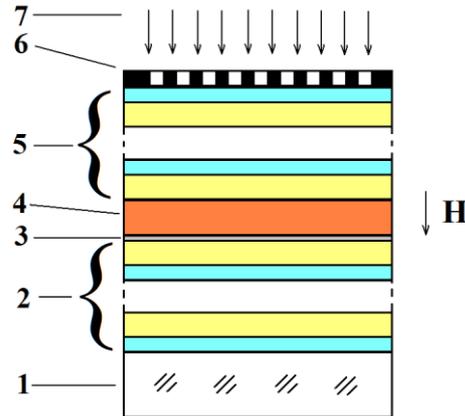
Устройство обеспечивает усиление эффекта Фарадея, благодаря наложению эффектов локализованного ППП на наночастицах золота и оптического резонанса на оптических таммовских состояниях на границе раздела двухслойная пленка железо-иттриевого граната – пленка золота, что позволяет получить на резонансной длине волны более высокие, чем в прототипе, значения фарадеевского вращения и, соответственно, удельного фарадеевского вращения. Техническое решение может быть использовано для управления когерентными потоками света в устройствах оптоэлектроники и нанофотоники в системах отображения, хранения и передачи информации, при создании датчиков технического и медико-биологического применения.

В [18] предложен магнитоплазмонный сенсор, содержащий диэлектрическое зеркало Брэгга, нанесенное на подложку из плавленого кварца и состоящее из N пар чередующихся диэлектрических слоев с большим и малым показателями преломления, буферный слой с малым показателем преломления с нанесенным на него зеркалом, выполненным в виде пленки золота, призму для ввода излучения со стороны подложки, дополнительно содержит двухслойную пленку висмут-содержащего железо-иттриевого граната толщиной, кратной половине длины волны зондирующего излучения, и буферный слой из диэлектрика с малым показателем преломления, расположенные между диэлектрическим зеркалом Брэгга и зеркалом, выполненным в виде пленки из золота толщиной от 10 до 100 нм. Эта структура обеспечивает усиление эффекта Фарадея, оптической и МО добротности и, следовательно, чувствительности сенсора; может быть использован при создании сенсоров (датчиков) технического и медико-биологического применения.

В [19] предложен магнитоплазмонный сенсор, содержащий диэлектрическое зеркало Брэгга, нанесенное на подложку из плавленого кварца и состоящее из N пар чередующихся диэлектрических слоев с большим и малым показателями преломления, буферный слой с малым показателем преломления с нанесенным на него зеркалом, выполненным в виде металлической пленки, призму для ввода излучения со стороны подложки. Сенсор дополнительно содержит двухслойную пленку висмут-содержащего железо-иттриевого граната толщиной, кратной половине длины волны зондирующего излучения, и буферный слой из диэлектрика с малым показателем преломления, расположенные между диэлектрическим зеркалом Брэгга и зеркалом, выполненным в виде пленки из серебра толщиной от 10 до 100 нм.

За счет усиления эффекта Фарадея повышается чувствительность сенсора и он может быть использован в устройствах технического и медико-биологического назначения.

В [20] предложена структура плазмонного МФК, в которой сочетаются (накладываются) оптический резонанс в микрорезонаторном МФК и плазмонный резонанс на решетке благородного металла, нанесенной на МФК. Плазмонный МФК содержит оптический резонатор с резонансной длиной волны λ_R в виде двух зеркал Брэгга, слои Vi: YIG состава $Bi_{1,0}Y_{2,0}Fe_5O_{12}$ и железо-висмутового граната $Bi_3Fe_5O_{12}$ с суммарной оптической толщиной, кратной половине λ_R , расположенные между зеркалами Брэгга, и металлическую субволновую решетку, размещенную на верхнем зеркале Брэгга (рисунок 12).



1 – кварцевая подложка; 2 и 5 – нижнее и верхнее зеркала Брэгга; 3 – нижний слой Vi: YIG состава $\text{Vi}_{1,0}\text{Y}_{2,0}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с оптической толщиной $\lambda/8$; 4 – верхний слой ViG с оптической толщиной $3\lambda/8$; 6 – металлическая субволновая решетка; 7 – излучение

Рис. 12. Схематическое изображение плазмонного МФК

Такой плазмонный МФК, благодаря наложению в нем резонансных эффектов различной природы, позволит получать на резонансной длине волны более высокие значения оптических и МО характеристик, чем в МФК без плазмонного эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование МО сред в сочетании с плазмонными структурами, в том числе в составе фотонных кристаллов, позволяет сделать эти структуры управляемыми, влияя на резонансные свойства плазмонной подсистемы. С другой стороны, плазмон-поляритоны могут использоваться для усиления МО эффектов. Эти исследования представляют, как фундаментальный интерес, позволяя проводить изучение особенностей взаимодействия света с магнитными наноструктурами, так и открывают возможности их эффективного практического применения, включая плазмонную и магнитоплазмонную сенсорику, реализацию функций управления световыми потоками.

Следует заметить, что магнитоплазмоника, исследующая резонансы МО эффектов, имеющих плазмонную природу, остается сравнительно мало охваченной областью исследований. В последнее время значительный интерес исследователей вызывают МПК, сочетающие в себе свойства фотонного кристалла, плазмонной и МО сред. Причем весьма перспективными магнитоплазмонными наноструктурами являются структуры, содержащие частицы или решетку из благородного металла, обеспечивающего возбуждение высокодобротного плазмонного резонанса, и магнитный диэлектрик, в частности эпитаксиальную или поликристаллическую пленку висмут-замещенного феррита-граната.

В качестве характеристики современной стадии развития исследований по тематике обзора можно отметить, что внимание исследователей постепенно

перемещается из области фундаментальных исследований к прикладным исследованиям, развиваясь в направлении создания структур для конкретных устройств. Вместе с тем, анализ современной литературы показывает, что такие структуры еще недостаточно изучены, чтобы в полной мере представлять возможности их применения в качестве конкретных устройств управления световыми потоками в интегрально-оптических схемах и в сенсорике.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по базовой части государственного задания (проект № 3.7126.2017/8.9).

Список литературы

1. Plasmon resonance enhancement of Faraday rotation of liquid phase epitaxy grown garnet films populated with gold nanoparticles on the film surfaces / G. S. Lan, D. Bowen, C. Krafft, I. D. Mayergoyz // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. 17A932.
2. Garnet composite films with Au particles fabricated by repetitive formation for enhancement of Faraday effect / H. Uchida, Y. Mizutani, Y. Nakai et al. // J. Phys. D : Appl. Phys. 2011. Vol. 44. 064014.
3. Magneto-optical plasmonic Bi: YIG composite films with Ag and Au-Ag alloy particles / Y. Mizutani, H. Uchida, Y. Masuda et al. // J. Magn. Soc. Jpn. 2009. Vol. 33. No. 6-2. Pp. 481–484.
4. Исследование магнитооптического отклика двумерных магнитных плазмонных структур на основе золотых нанодисков в слое феррит-граната / И. А. Колмычек, А. Н. Шайманов, А. В. Барышев, Т. В. Мурзина // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. Вып. 1. С. 50–55.
5. Baryshev A. V., Uchida H., Inoue M. Peculiarities of plasmon-modified magneto-optical response of gold-garnet structures // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. Vol. 30. No. 9. Pp. 2371–2376.
6. Transverse magneto-optical Kerr effect in 2D gold-garnet nanogratings / A. V. Chetvertukhin, A. I. Musorin, T. V. Dolgova et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2015. Vol. 383. No. 1. Pp. 110–113.
7. Magnetophotonic crystals : Experimental, realization and applications / M. Inoue, A. V. Baryshev, T. Goto et al. // Magnetophotonics: From theory to applications / M. Inoue, M. Levy, A. V. Baryshev (eds.). Springer, 2013. Pp. 163–190.
8. Photonic crystals / J.-M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, et al. Springer, 2005. 514 p.
9. Magnetophotonic crystals / M. Inoue, R. Fujikawa, A. Baryshev et al. // J. Phys. D : Appl. Phys. 2006. Vol. 39, No. 8. Pp. R151–R161.
10. Сылгачева Д. А., Хохлов Н. Е. Электромагнитные моды в магнитооптических брэгговских зеркалах // Труды XV Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" имени А. П. Сухорукова (Волны-2015). Секция 10. Метаматериалы и фотонные кристаллы. М. : МГУ, 2015. С. 46–47.
11. Magnetoplasmonics and femtosecond optomagnetism at the nanoscale-review / D. Bossini, V. I. Belotelov, A. K. Zvezdin et al. // ACS Photonics. 2016. Vol. 3. No. 8. Pp. 1385–1400.
12. Поверхностные высокочастотные моды в гетероструктурах «фотонный кристалл–пленка феррита-граната» для сенсорных применений / Д. О. Игнатьева, П. О. Капралов, Г. А. Князев и др. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. Вып. 10. С. 689–694.
13. Magneto-optical plasmonic heterostructure with ultranarrow resonance for sensing applications / D. O. Ignatyeva, G. A. Knyazev, P. O. Kapralov et al. // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. 28077.
14. Enhancement of SPR-sensor sensitivity in magnetophotonic plasmonic heterostructures / D. O. Ignatyeva, S. K. Sekatskii, A. N. Kalish, V. I. Belotelov // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Prague, Czech Rep. (PIERS 2015) : proceedings. Electromagnetics Academy, 2015. Pp. 2296–2300.
15. Патент на полезную модель 154720 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, B82Y 20/00. Магнитоплазмонный кристалл / А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, В. И. Белотелов ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный

- университет им. В. И. Вернадского. № 2014146608 ; заявл. 19.11.2014 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25.
16. Патент на полезную модель 154764 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, МПК B82Y 20/00. Плазмонный магнитофотонный кристалл / А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, В. Г. Барьяхтар ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2014146609 ; заявл. 19.11.2014 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25.
 17. Патент на полезную модель 158802 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, B82Y 20/00. Плазмонный магнитофотонный кристалл / А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, Т. В. Михайлова, В. Н. Бержанский ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2015135428 ; заявл. 20.08.2015 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.
 18. Патент на полезную модель 169415 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, B82Y 20/00. Магнитоплазмонный сенсор / А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, В. Н. Бержанский, Т. В. Михайлова ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2016117864 ; заявл. 05.05.2016 ; опубл. 16.03.2017, Бюл. № 8.
 19. Патент на полезную модель 173144 РФ, МПК G02F 1/09. Магнитоплазмонный сенсор / А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, В. Н. Бержанский, Т. В. Михайлова ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2016147603 ; заявл. 05.12.2016 ; опубл. 14.08.2017, Бюл. № 23 ; приоритет 05.05.2016, № 2016117864 (РФ).
 20. Патент на полезную модель 150130 РФ, МПК C30B 30/00. Плазмонный магнитофотонный кристалл / А. Н. Шапошников, В. Н. Бержанский, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2014149449 ; заявл. 08.10.2014 ; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3 ; приоритет 04.04.2012, № u201204155 (Украина).
-

MAGNETOPLASMON STRUCTURES (REVIEW). PART 2

Basiladze G. D., Berzhansky V. N., Nedviga A. S., Shaposhnikov A. N.

Physics and Technology Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

**E-mail: nedviga@list.ru*

The results on the creation and investigation of magnetoplasmonic nanostructures based on magneto-optical films of garnet ferrite and photonic crystals are presented. The structures considered have high values of the transmittance and specific Faraday rotation in the visible and near infrared regions of the optical spectrum.

Keywords: plasmon resonance, magnetoplasmonics, garnet film, magnetophotonic crystal, plasmonic nanostructure.

References

1. G. S. Lan, D. Bowen, C. Krafft, I. D. Mayergoyz, *J. Appl. Phys.* **115**, 17A932 (2014).
2. H. Uchida, Y. Mizutani, Y. Nakai, A. A. Fedyanin, M. Inoue, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 064014 (2011).
3. Y. Mizutani, H. Uchida, Y. Masuda, A. V. Baryshev, M. Inoue, *J. Magn. Soc. Jpn.* **33**, No. 6-2, 481–484 (2009).
4. I. A. Kolmychek, A. N. Shaimanov, A. V. Baryshev, T. V. Murzina, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **102**, No. 1, 50–55 (2015) [in Russian]. [*JETP Letters* **102**, Issue 1, 46–50 (2015)].
5. A. V. Baryshev, H. Uchida, M. Inoue, *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, No. 9, 2371–2376 (2013).

6. A. V. Chetvertukhin, A. I. Musorin, T. V. Dolgova, H. Uchida, M. Inoue, A. A. Fedyanin, *J. Magn. Magn. Mater.* **383**, No. 1, 110–113 (2015).
7. M. Inoue, A. V. Baryshev, T. Goto, S. M. Baek, S. Mito, H. Takagi, P. B. Lim, “Magnetophotonic crystals: Experimental, realization and applications” in *Magnetophotonics: From theory to applications*, M. Inoue, M. Levy, A. V. Baryshev (eds.), (Springer, 2013) pp. 163–190.
8. J.-M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, J.-M. Gerard, D. Maystre, A. Tcheltnokov, *Photonic crystals* (Springer, 2005).
9. M. Inoue, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, P. B. Lim, H. Uchida, O. Aktsipetrov, A. Fedyanin, T. Murzina A. Granovsky, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, No. 8, R151–R161 (2006).
10. D. A. Sylgacheva, N. E. Khokhlov, “Elektromagnitnye mody v magnitoopticheskikh breggovskikh zerkalakh” [Electromagnetic modes in magneto-optical Bragg mirrors] in *Trudy XV Vserossiyskoy shkoly-seminara “Fizika i primeneniye mikrovoln” (Volny-2015). Sektsiya 10. Metamaterialy i fotonnye kristally*, (Moscow State University, 2015) pp.46-47 [in Russian].
11. D. Bossini, V. I. Belotelov, A. K. Zvezdin, A. N. Kalish, A. V. Kimel, *ACS Photonics* **3**, No. 8, 1385–1400 (2016).
12. D. O. Ignatyeva, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, S. K. Sekatskii, G. Dietler, M. Nur-E-Alam, M. Vasiliev, K. Alameh, V. I. Belotelov, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **104**, No. 10, 689–694 (2016) [in Russian]. [*JETP Letters* **104**, Issue 10, 679–684 (2016)].
13. D. O. Ignatyeva, G. A. Knyazev, P. O. Kapralov, G. Dietler, S. K. Sekatskii, V. I. Belotelov, *Sci. Rep.* **6**, 28077 (2016).
14. D. O. Ignatyeva, S. K. Sekatskii, A. N. Kalish, V. I. Belotelov, “Enhancement of SPR-sensor sensitivity in magnetophotonic plasmonic heterostructures” in *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Prague, Czech Rep. (PIERS 2015)*, (Electromagnetics Academy, 2015) pp. 2296–2300.
15. A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, V. I. Belotelov, RF Patent No. 154720, Byull. No. 25 (2015).
16. A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, V. G. Bar'yakhtar, RF Patent No. 154764, Byull. No. 25 (2015).
17. A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, T. V. Mikhailova, V. N. Berzhansky, RF Patent No. 158802, Byull. No. 2 (2016).
18. A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, V. N. Berzhansky, T. V. Mikhailova, RF Patent No. 169415, Byull. No. 8 (2017).
19. A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, V. N. Berzhansky, T. V. Mikhailova, RF Patent No. 173144, Byull. No. 23 (2017).
20. A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, RF Patent No. 150130, Byull. No. 3 (2015).

*Поступила в редакцию 01.04.2018 г. Принята к публикации 26.04.2018 г.
Received April 01, 2018. Accepted for publication April 26, 2018*