

УДК 621.793.18:539.23.915

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК BiG ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР МАГНИТОПЛАЗМОНИКИ

© 2019 г. П. Н. Найденов^{1, *}, О. Л. Голикова¹, В. А. Кецко², А. Л. Чехов³, Т. В. Мурзина³

¹Московский технологический университет, 119454 Москва, Россия

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, 119071 Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

*E-mail: pavel.snk@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2018 г.

После доработки 14.03.2018 г.

Принята к публикации 20.03.2018 г.

Представлен метод синтеза симметричных магнитоплазмонных кристаллов, в которых плазмонная решетка золота встроена в магнитный диэлектрик. Показано, что последовательное применение методов ионно-лучевого распыления—осаждения, быстрого отжига, размерного фрезерования остросфокусированным ионным пучком и ионного травления позволяет капсулировать плазмонную решетку золота поликристаллическим слоем состава $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ без существенного влияния процессов диффузионного размытия, испарения и гранулирования на ее геометрию. Эти магнитоплазмонные кристаллы могут применяться в качестве магнитооптических датчиков и обладают повышенной механической стойкостью.

Ключевые слова: магнитоплазмонные кристаллы, ионно-лучевое распыление, осаждение, поликристаллический феррит-гранат, капсулирование, плазмонный резонанс, магнитооптические эффекты.

DOI: 10.1134/S0207352819010153

ВВЕДЕНИЕ

Висмутовые феррит-гранаты $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (bismuth iron garnet — BiG) относятся к основным материалам, используемым в магнитооптических устройствах. В то же время малость магнитооптических эффектов является препятствием для использования пленок BiG в интегральных устройствах магнитной микроэлектроники [1]. Для гигантского усиления магнитооптических эффектов было предложено использовать пространственно-периодические плазмонные гетероструктуры, состоящие из магнетиков и нанесенных на них дифракционных решеток благородных металлов, получившие название магнитоплазмонных кристаллов. В таких структурах реализуется резонансное усиление электромагнитного поля при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов в периодической решетке металла на поверхности магнитной пленки [2]. В последнее время был опубликован ряд работ, посвященных исследованию структуры магнитоплазмонных кристаллов, состоящих из слоя наноразмерного, периодически перфорированного золота на поверхности пленки магнитного диэлектрика. Устройства подобного типа вызывают интерес исследователей благодаря возможности создания

на их основе оптических переключателей, датчиков магнитного поля и других сенсорных структур.

Опубликованы работы, описывающие свойства магнитоплазмонных кристаллов, синтезированных различными методами. Для кристаллов, созданных комбинированным методом ионно-лучевого распыления—осаждения [3, 4], было показано, что возбуждение в них двух видов поверхностных плазмон-поляритонов, соответствующих границам раздела металла с воздухом и с магнитным диэлектриком, а также волноводных мод в магнитной диэлектрической пленке приводит к появлению резонансов в частотно-угловых спектрах пропускания, в окрестности которых наблюдается ряд особенностей, и к возрастанию линейных и нелинейных магнитооптических эффектов [5–8].

Целью настоящей работы был синтез магнитоплазмонных кристаллов симметричного типа, а именно $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, в которых кристаллы, полученные в [3, 4], служат исходными подложками. Это реализуется путем формирования дополнительного поверхностного (капсулирующего) слоя BiG над плазмонной решеткой золота и исходной пленкой феррит-граната. Предполагалось, что данная операция позволит получить новые структуры, у которых,

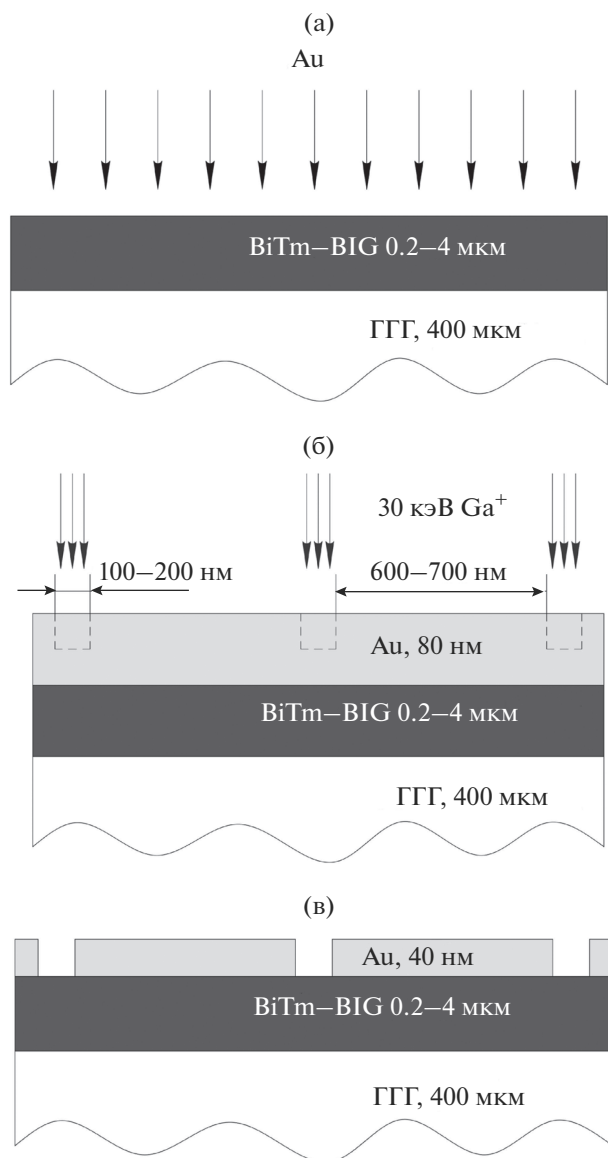


Рис. 1. Основные процессы синтеза 1D магнитоплазмонного кристалла: а – синтез пленки золота; б – разметка плазмонной решетки; в – схематичный вид готового кристалла. Здесь и далее – ГГГ – галлий-гадолиниевый гранат.

во-первых, капсулирующая пленка обеспечит механическую стойкость к внешним воздействиям; во-вторых, формирование сплошной поликристаллической структуры капсулирующего слоя BIG приведет к устранению границы раздела плазмонная решетка золота–воздух, что обеспечит увеличение добротности резонансно возбуждаемых поверхностных плазмон-поляритонов за счет возникновения симметричных условий среды.

Трудности реализации идеи заключались в том, что при формировании сплошной поликристаллической структуры капсулирующего слоя

BIG, “наследующего” магнитооптические свойства соответствующего слоя-аналога, необходимо было сохранить геометрические свойства исходного магнитоплазмонного кристалла – избежать диффузионного размытия дифракционной решетки золота, ее испарения или коагуляции.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Капсулированные плазмонные структуры создавали на базе 1D магнитоплазмонных кристаллов, полученных в результате комбинированного применения фокусированного высокоэнергетического и низкоэнергетического, с широкой апертурой, ионных пучков в процессах осаждения–травления. Основные процессы синтеза 1D магнитоплазмонного кристалла приведены на рис. 1. Исходные пленки феррит-граната состава $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ или $(\text{LuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 2–4 мкм были получены методом жидкофазной эпитаксии на подложке (110) галлий-гадолиниевый гранат $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. Для достижения плоской бездефектной поверхности пленки было проведено ее финишное полирование методом распыления ионами кислорода с энергией 300 эВ [9]. Пиксели (прямоугольники) в виде тонкого слоя золота с латеральными размерами не более 100×200 мкм и толщиной 80–120 нм создавали методом многостадийного ионного распыления–осаждения. Золотую мишень распыляли ионами аргона с энергией 1.5 кэВ, энергия основного потока распыленных атомов золота при осаждении на поверхность феррит-граната составляла от 2 до 60 эВ (рис. 1а). После этого первично нанесенную пленку золота толщиной до 2 нм распыляли пучком ионов кислорода с энергией до 300 эВ, потом повторно осаждали слой золота требуемой толщины, в результате достигали его высокой адгезии к подложке и однородности [10]. Плазмонную решетку формировали методом избирательного 1D распыления фокусированным высокоэнергетическим пучком ионов Ga^+ с энергией 30 кэВ (рис. 1б) по поверхности выбранного пикселя золота [4].

После анализа профиля сформированной 1D дифракционной решетки золота на нее конформно осаждали капсулирующий слой состава $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 100–200 нм методом ионно-лучевого распыления мишени [11]. Схематичное изображение основных процессов капсуляции плазмонной решетки приведено на рис. 2. Мишень имела вид компактированной гомогенной смеси порошков оксидов висмута и железа с содержанием $\text{Bi} : \text{Fe} : \text{O} = 3 : 5 : 12$. Ее распыляли пучком ионов аргона с энергией 1.6 кэВ и плотностью тока 0.2 мА/см^2 при рабочем давлении не больше 0.05 Па (рис. 2а). После напыления образцы помещали в установку квазиимпульсного тер-

мического отжига, где в течение 7–10 мин проводили кристаллизацию капсулирующего слоя BIG при температуре менее 570°C в атмосфере азота и кислорода в соотношении 75 : 25 в вакууме не хуже 150 Па (рис. 2б).

Процессы распыления–осаждения слоев золота и феррит-граната осуществляли на ионно-лучевой установке с вакуумным постом A700Q Leybold–Heraeus GmbH. Формирование плазменной решетки и анализ структур методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) проводили на установке электронно-ионного комплекса PHI Helios Nanolab 400 (USA), а ее дополнительное распыление низкоэнергетическим ионным пучком – на указанной ионно-лучевой установке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлены СЗМ-изображения участка поверхности и поперечное сечение полученного магнитоплазмонного кристалла. Масштабные нарушения геометрии дифракционной решетки золота отсутствуют (рис. 3а). Неоднородности контраста полосок золота на изображении демонстрируют процессы диффузии, проходившие в пленке золота при ее нагревании, и/или возможные пустоты, образовавшиеся в процессе кристаллизации капсулирующей пленки, но при этом видна сохраняющаяся исходная периодичность дифракционной решетки. Исследования синтезированной плазмонной гетероструктуры с использованием изображений поперечных сечений показало, что, несмотря на некоторое изменение профиля дифракционной решетки золота, она остается плотной и однородной по толщине. Рис. 3б демонстрирует четкую границу раздела исходной пленки феррит-граната и капсулирующей пленки BIG. Наличие пустот над полосками золота позволяет сделать вывод о механизме протекавшей кристаллизации – от границы эпитаксиальный феррит-гранат–капсулирующая пленка к точкам над поверхностью полосок золота. Именно быстрая кристаллизация в области зазора между полосками золота позволила избежать нарушения геометрии решетки, а совокупность квазиимпульсного режима отжига с низкой (для стандартной кристаллизации феррит-граната) температурой позволила избежать коагуляции и латерального растекания золота.

Наличие магнитооптических свойств у капсулирующей пленки BIG подтвердили измерения петель гистерезиса методом экваториального эффекта Керра. Для этого капсулирующую пленку толщиной около 200 нм синтезировали вышеуказанным методом на подложке из галлий-гадолиниевого граната. Р-поляризованное излучение лазерного диода с длиной волны 460 нм падало на поверхность пленки под углом 45°. Отраженное

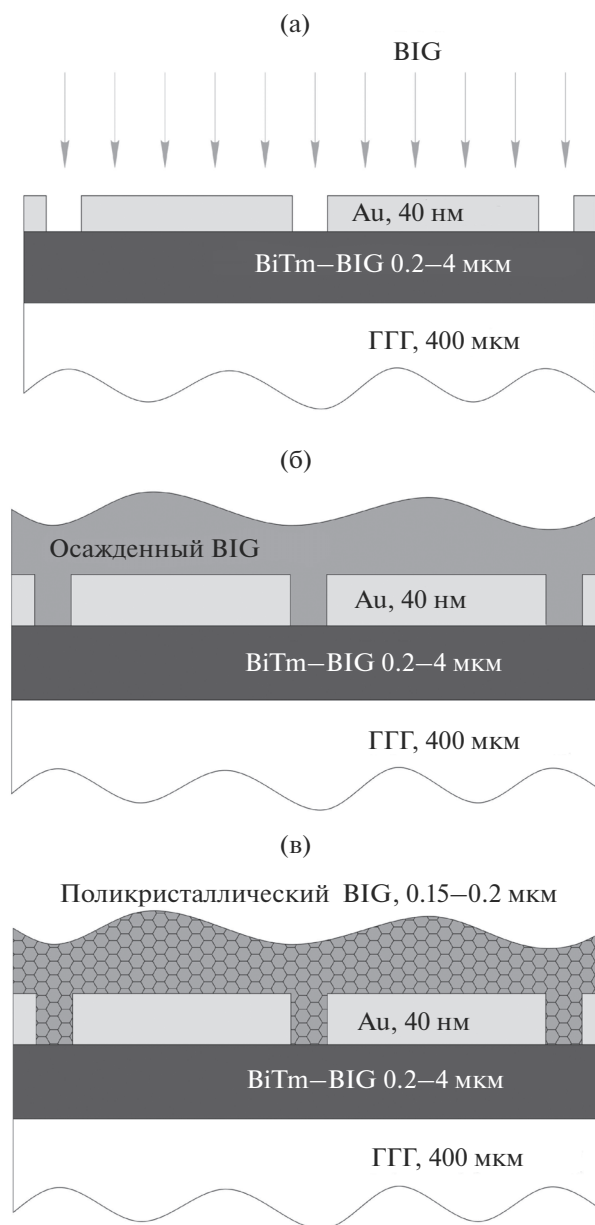


Рис. 2. Основные процессы капсуляции 1D магнито-плазмонного кристалла: а – осаждение капсулирующей пленки BIG; б – быстрый отжиг; в – схематичный вид капсулированного кристалла.

излучение регистрировали с помощью фотодиода. Пленка находилась в экваториальном магнитном поле электромагнита. В соответствии с зависимостью коэффициента отражения от экваториального магнитного поля коэрцитивное поле составляло менее 20 Э, а малые значения поля насыщения свидетельствовали о характерном для поликристаллических пленок феррит-граната поведении. Магнитный контраст экваториального эффекта Керра в полях насыщения был $\sim 5 \times 10^{-4}$. Но следует учитывать, что толщина слоя BIG

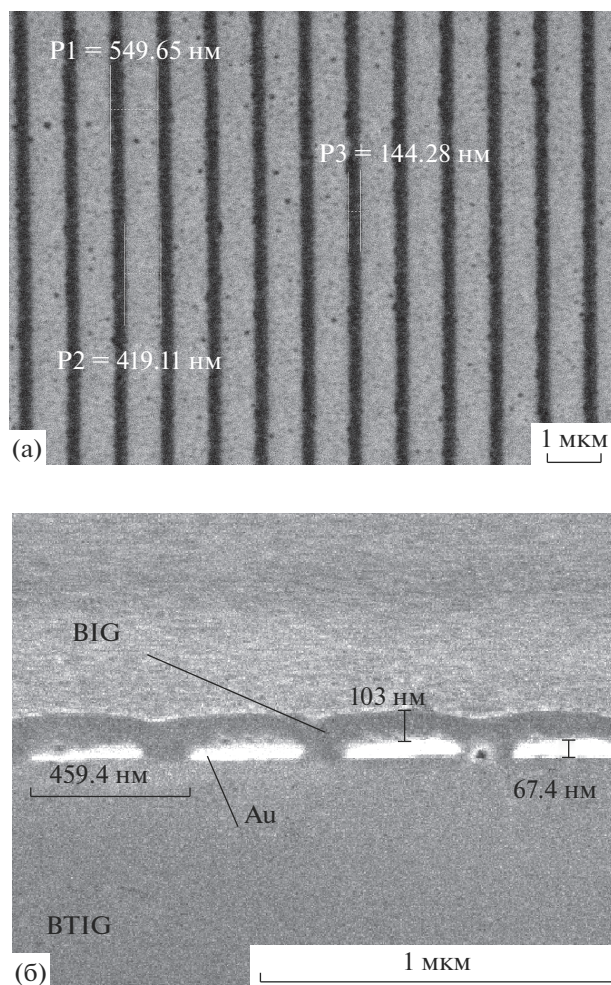


Рис. 3. СЗМ-изображение участка поверхности (а) и поперечное сечение (б) капсулированного 1D магнито-плазмонного кристалла.

меньше длины волны излучения, что может влиять на величину рассматриваемого эффекта, а сам слой кристаллизовался на поверхности, дополнительно содержащей 1D дифракционную решетку золота.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование гомогенной поликристаллической пленки BIG на неоднородной как по составу, так и по рельефу поверхности феррит-граната, содержащей 1D плазмонную (дифракционную) решетку золота, обусловлено спецификой применения ионно-лучевых и быстрых термических методов на каждом этапе синтеза симметричного магнито-плазмонного кристалла. Напыление пленки золота методом повторного распыления—осаждения позволило получить необходимую адгезию слоя золота к поверхности магнитного диэлектрика, стойкую к последующим операциям

размерного фрезерования острогофокусированным ионным пучком и быстрого отжига. Размерное фрезерование плазменной решетки путем комбинирования высокоэнергетического острогофокусированного и низкоэнергетического, с широкой апертурой, пучков позволило получить бездефектную границу эпитаксиальный феррит-гранат—капсулирующая пленка BIG, что, в свою очередь, привело к быстрому процессу кристаллизации напыленной пленки BIG. Быстрый отжиг дал возможность избежать латерального растекания и коагуляции пленки золота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены результаты экспериментального синтеза симметричной плазмонной гетероструктуры на основе периодической решетки золота и висмутового феррита-граната с капсулирующим их поверхность слоем BIG. Экспериментально показано, что в процессе капсуляции плазмонная решетка сохраняет заданную периодическую 1D геометрию, капсулирующая пленка BIG обладает магнитооптическими свойствами и за счет сплошности обеспечивает механическую защиту поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-02-01060_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zvezdin A.K., Kotov V.A. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials. N.Y.: Taylor & Francis, 1997. 404 p.
2. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M. et al. // Nature Nanotech. 2011. V. 6. P. 370.
3. Bespalov V., Golikova O.L., Savin S.S. et al. // Inorg. Mater. 2012. V. 48. № 12. P. 1190.
4. Chekhov A.L., Krutyanskiy V.L., Ketsko V.A. et al. // Opt. Mater. Express. 2015. V. 5. P. 1647.
5. Чехов А.Л., Найденов П.Н., Голикова О.В. и др. // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 11. P. 6.
6. Chekhov A.L., Krutyanskiy V.L., Shaimanov A.N. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. № 15. P. 17762.
7. Pohl M., Kreilkamp L.E., Belotelov V.I. et al. // New J. Phys. 2013. V. 15. P. 075024.
8. Chin J.Y., Steinle T., Wehls T. et al. // Nat. Commun. 2013. V. 4. P. 1599.
9. Беспалов А.В., Голикова О.Л., Савин С.С. и др. // Тр. 24 междунар. симп. "Нанофизика и нанoeлектроника". Н. Новгород, 2013. Т. 1. С. 165.
10. Патент № 2572499RU. Оптически прозрачная гетероструктура. / ИОНХ. Беспалов А.В., Стогний А.И., Новицкий Н.Н. и др. // Бюл. № 1. 10.01.2016.
11. Найденов П.Н., Голикова О.Л., Савин С.С. и др. // Тр. симп. "Беларусь—Россия—Украина: Нано-2016". Минск, 2016. С. 513.

Synthesis and Properties of Nano-Dimensional BIG Films for Magnetoplasmonium Heterostructures

P. N. Naydenov, O. L. Golikova, V. A. Ketsko, A. L. Chekhov, T. V. Murzina

A method for the synthesis of symmetric magnetoplasmonic crystals with plasmonic gold lattice built into a magnetic dielectric is proposed. The successive ion beam sputtering—deposition, fast annealing, milling with a high-focused ion beam, and ion etching are shown to allow encapsulating the plasmon gold lattice with a polycrystalline $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ layer. So, the diffusion spreading, evaporation, and granulation do not influence significantly on its geometry. These magnetoplasmonic crystals can be used as magneto-optical sensors and have high mechanical resistance.

Keywords: magnetoplasmonic crystals, ion-beam sputter deposition, polycrystalline ferrite garnet, encapsulation, plasmon resonance, magnetooptic effects.