

## Двухрешетчатые магнитоплазмонные структуры на основе BIG и перфорированных пленок золота

© П.Н. Найденов<sup>1</sup>, А.Л. Чехов<sup>2</sup>, О.Л. Голикова<sup>1</sup>, А.В. Беспалов<sup>1</sup>, А.А. Гераськин<sup>1</sup>, С.С. Савин<sup>1</sup>, Т.В. Мурзина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: pavel.snk@gmail.com

Поступила в Редакцию 15 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2019 г.

Принята к публикации 24 апреля 2019 г.

Представлен метод изготовления двухрешетчатых магнитоплазмонных кристаллов со структурой  $(\text{Au}/\text{BIG})^2$ , в которых плазмонные решетки золота смещены друг относительно друга на половину периода. Пленки золота толщиной около 40 нм сформированы методом ионно-лучевого распыления–осаждения, при этом адгезионные свойства пленки позволяющими проводить размерное травление остросфокусированным ионным пучком. Показано, что формирование второй плазмонной решетки, расположенной поверх слоя граната толщиной 100 нм, позволяет сохранить периодичность первой решетки Au, однако, наблюдается значительное влияние процессов диффузионного растекания на материал нижней решетки, что приводит к уменьшению ее плотности. Исследована зависимость интенсивностного магнитооптического эффекта в геометрии на прохождение в зависимости от толщины верхней решетки и наличия дополнительного слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

**Ключевые слова:** магнитоплазмонные кристаллы, ионно-лучевые методы, распыление, осаждение, поликристаллический феррит-гранат, плазмонный резонанс, магнитооптические эффекты.

DOI: 10.21883/FTT.2019.09.48114.22N

### 1. Введение

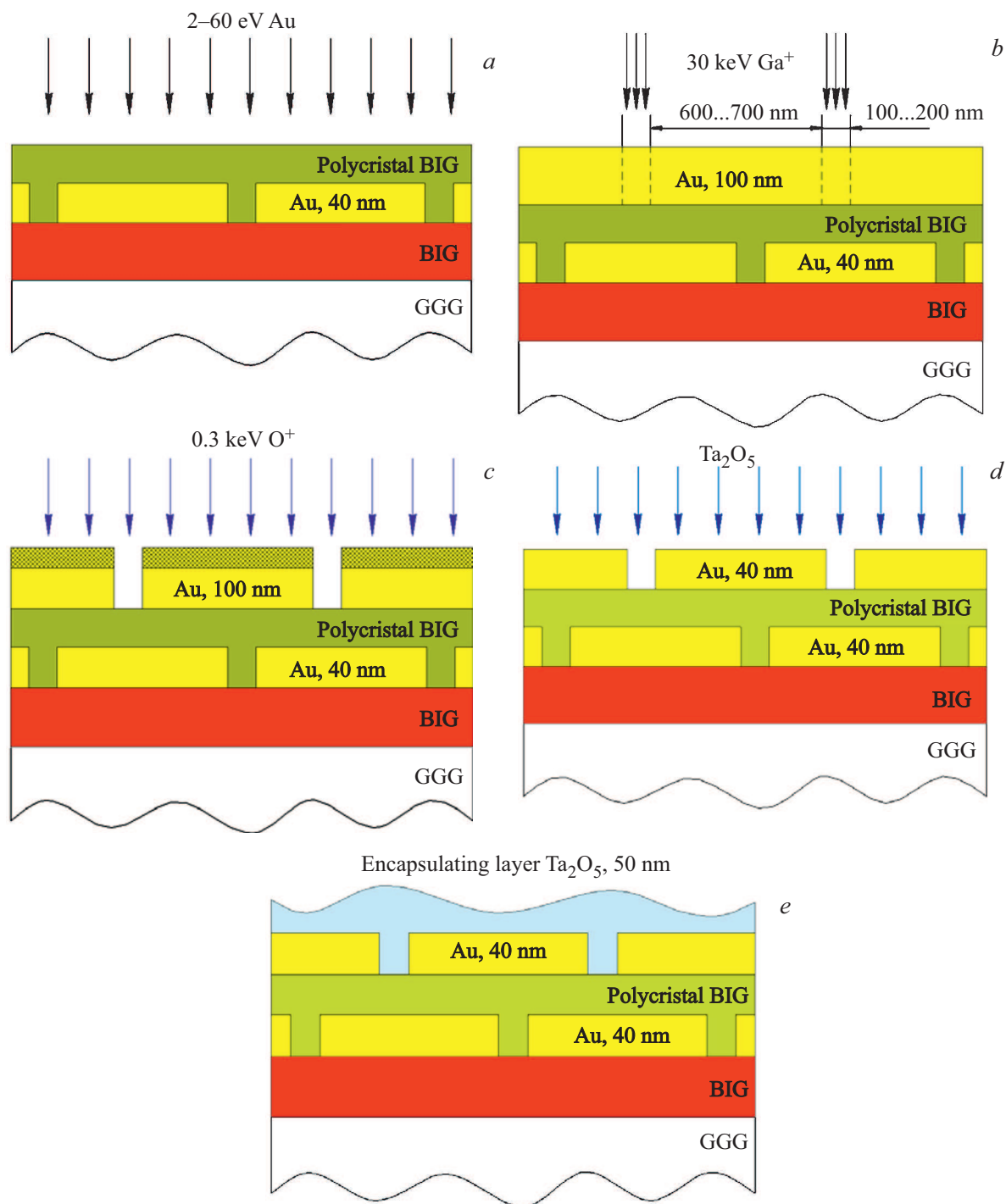
Интерес к магнитоплазмонике основывается на возможности управления и значительного усиления магнитооптических эффектов [1] в магнитоплазмонных структурах, обусловленных возбуждением локализованных плазмонов или поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [2–7], что определяет перспективы создания устройств магнитооптики с характерными для нано- и микроэлектроники размерами. Одним из видов таких устройств являются магнитоплазмонные кристаллы (МПК), состоящие из магнитного диэлектрика с наносенной на него дифракционной решеткой из благородного металла [8–10]. К настоящему времени показано, что МПК позволяют достигать высоких значений магнитооптических (МО) эффектов и значительной локализации электромагнитного поля в тонком интерфейсном слое при возбуждении ППП, причем спектральным положением резонансов ППП можно управлять в широких пределах за счет варьирования параметров структуры [11]. В связи с этим представляет интерес расширение данного класса МПК за счет модификации их структуры и композиционного состава.

Целью работы являлось создание дополнительной плазмонной решетки золота на поверхности капсулирующей пленки железо-висмутового граната исходного МПК таким образом, чтобы полученная структура со-

держала расположенные друг над другом плазмонные решетки, встроенные в магнитный диэлектрик. Интерес представляли как сама задача формирования второй капсулированной решетки золота, так и изучение влияния данной модификации на физические параметры структуры исходно качественного образца 1D МПК и наблюдаемые в МПК МО эффекты.

### 2. Методика эксперимента

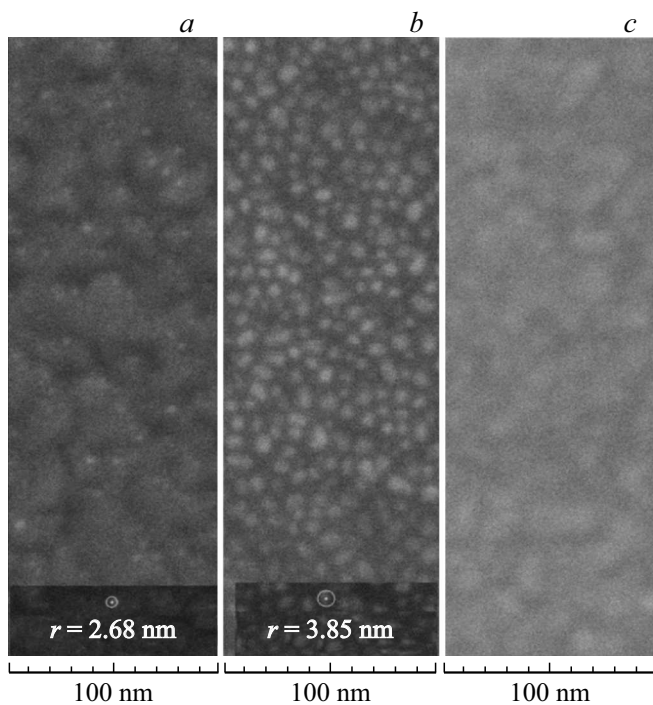
Формирование двухрешеточной плазмонной структуры проводился на основе 1D МПК комбинированным применением фокусированного высокоэнергетического и широкоапертурного низкоэнергетического ионных пучков в процессах распыления–осаждения. Исходные высокодобротные 1D магнитоплазмонные кристаллы состояли из перфорированной пленки золота (толщиной 60 нм, период МПК 700 нм, ширина полос золота около 600 нм) на поверхности слоя висмут-замещенного феррита граната (BIG) состава  $(\text{BiTm})_3(\text{Fe;Ga})_5\text{O}_{12}$ , толщина которого составляла 2.2  $\mu\text{m}$ . Затем структуры были конформно покрыты пленкой поликристаллического BIG состава  $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  толщиной 100 нм, нанесенной методом ионного распыления. Процесс изготовления исходных 1D МПК, их капсуляции и характеристика свойств подробно описаны в [12,13].



**Рис. 1.** Основные процессы изготовления 2D магнитоплазмонного кристалла: *a* — нанесение пленки золота; *b* — разметка плазмонной решетки; *c* — утонение плазмонной решетки; *d* — осаждение пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; *e* — вид готового 2D МПК.

Вторая плазмонная решетка была сформирована на поверхности верхней пленки BIG. Для достижения плоской бездефектной поверхности этой пленки, выступавшей в роли подложки для второй плазмонной решетки, была проведена ее бездефектная полировка методом распыления ионами кислорода с энергией 300 eV; после этого методом многостадийного ионного распыления конформно наносилась пленка золота тол-

щиной 100 nm [12]. Энергия распыления мишени золота составляла 1.5 keV, энергия осаждения атомов золота на поверхность верхней пленки феррит-граната — 2–60 eV. На первом этапе посредством распыления мишени золота пучком ионов кислорода с энергией 1.5 keV наносилась пленка золота толщиной 2–4 nm. На втором этапе производилось травление полученной пленки широкоапертурным пучком низкоэнергетичных ионов кислорода



**Рис. 2.** СЗМ-изображения роста пленки золота. Слева направо: этап образования точек роста, этап увеличения диаметра точек роста; этап образования пленки.

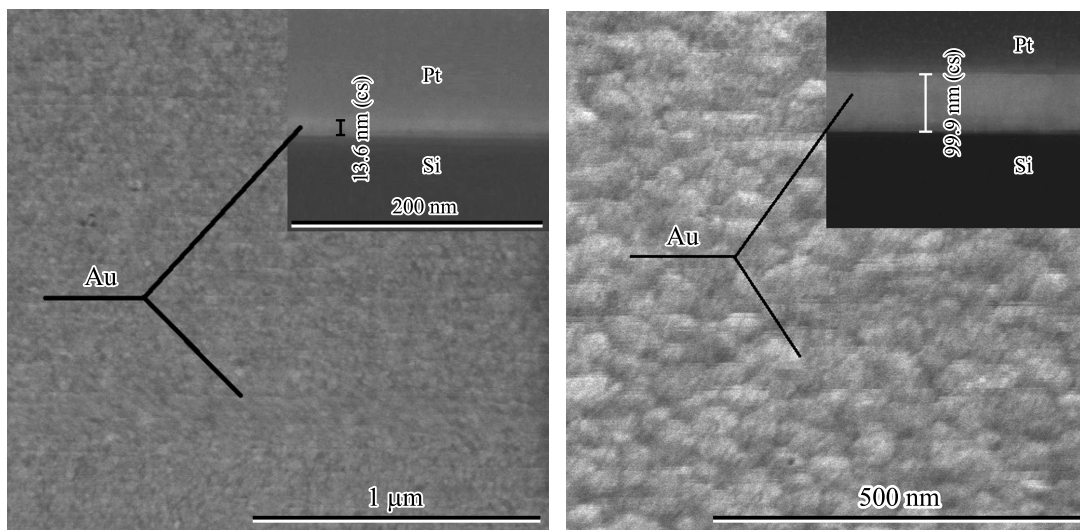
(с энергией 300 eV). На третьем этапе проводилось повторное напыление пленки золота требуемой толщины, параметры процесса совпадали с параметрами первого этапа. В результате достигалась высокая однородность структуры Au и ее адгезия к верхней поликристаллической пленке ВIG. Пленка золота, характеризующаяся качеством интерфейса Au/подложка и способностью выдерживать процессы постобработки, исследовалась как

на образце изготавливаемого МПК, так и на свидетеле — кремниевой пластине, находившейся в камере роста, посредством изучения профиля образца и оценкой проводимости пленки.

После нанесения пленки золота проводился процесс ее травления высокоэнергетическим ионным пучком ионов Ga<sup>+</sup> с энергией 30 keV, в ходе которого формировалась плазменная решетка второго уровня. Далее проводился итерационный процесс утонения плазменной решетки золота, при контроле физических и МО параметров гетероструктуры, до толщины 40–60 nm. После этого на структуру методом ионного распыления с использованием ионов кислорода конформно осаждался слой Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> толщиной 40–60 nm. Схематическое изображение метода формирования 2D МПК приведено на рис. 1.

Процессы распыления–осаждения слоев золота, феррит-граната и поверхностного слоя Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> осуществляли на ионно-лучевой установке с вакуумным постом A700Q Leybold–Heraeus GmbH. Формирование плазменной решетки, анализ структур методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), а также исследование объемной структуры проводили на установке электронно-ионного комплекса РНИ Helios Nanolab 400 (USA). Зависимость проводящих свойств пленки золота от ее толщины получены при помощи установки измерения параметров Keithley 4200-scs.

Частотно-угловые спектры пропускания МПК измерялись при использовании стабилизированной галогеновой лампы в качестве источника широкополосного зондирующего излучения. Пространственная фильтрация излучения осуществлялась с помощью диафрагмы с диаметром 30 μm, затем р-поляризованное зондирующее излучение фокусировалось на поверхность МПК в пятно с диаметром около 50 μm. Полоски плазменной решетки были ориентированы перпендикулярно плос-



**Рис. 3.** СЗМ-изображения пленки золота, полученные с образца-свидетеля. Слева направо: пленка золота толщиной 15 nm, пленка золота толщиной 100 nm. На рисунке, как и на последующих, указан технологический слой платины.

кости падения пробного излучения. Магнитное поле напряженностью 3 кОе было приложено к образцу в поперечной геометрии. Образец МПК был помещен на гониометр, что позволяло варьировать угол падения пробного излучения с точностью до долей градуса вплоть до значений 50 deg.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 2, *a–c* приведены СЗМ-изображения участков поверхности на трех стадиях роста пленки золота, с момента образования точек кристаллизации до образования плотной однородной пленки. Отсутствие коагуляции золота на этапе зародышевого роста является следствием применения многостадийного метода распыления–осаждения, приводящего к появлению адатомов золота, внедренных в слой BIG глубиной до двух постоянных решетки. Измерения проводимости пленки золота демонстрируют близкую к линейной зависимость тока от толщины пленки, и показали 15 и 75 мА для пленок толщиной 13 и 100 нм, соответственно, что указывает на отсутствие гранулирования слоя золота. Это также следует из СЗМ изображений (рис. 3); кроме того, эти данные указывают на формирование качественной границы раздела BIG/Au, высокую объемную плотность золота и ее высокие адгезионные свойства.

Разметка плазмонной решетки остросфокусированным ионным пучком не выявила закономерностей, отличных от продемонстрированных в работах [11,14]. Тем не менее, стоит отметить, что применение данного метода изготовления плазмонной решетки предъявляет повышенные требования к плоскопараллельности всех слоев гетероструктуры. Наличие шероховатости поверхности поликристаллической пленки BIG, являющейся подложкой для второй решетки золота, привело к невозможности сфокусировать ионный пучок строго над промежутком нижней решетки, что привело к необходимости смещения решеток относительно друг друга примерно на половину периода.

Модификация структуры МПК в процессе формирования второй плазмонной решетки показана на рис. 4: приведены СЗМ-изображения поперечных сечений на этапах формирования решетки Au (рис. 4, *a*), ее утонения (рис. 4, *b*) и формирования защитной пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (4, *c*). Видно, что сразу после нанесения пленка золота имела толщину 100 нм, как и на образце-свидетеле, при этом, несмотря на проведенный процесс планаризации, поверхность BIG сохранила некоторую шероховатость. Тем не менее, примененный метод позволил провести конформное осаждение пленки золота с формированием четкого интерфейса BIG/Au.

На рис. 5 показано СЭМ-изображение поперечного среза двухрешетчатой структуры, на основании которого можно судить о качестве двух решеток золота. Видно, что плотность золота в первой решетке уменьшилась, что связано как с термическим отжигом, необходимым

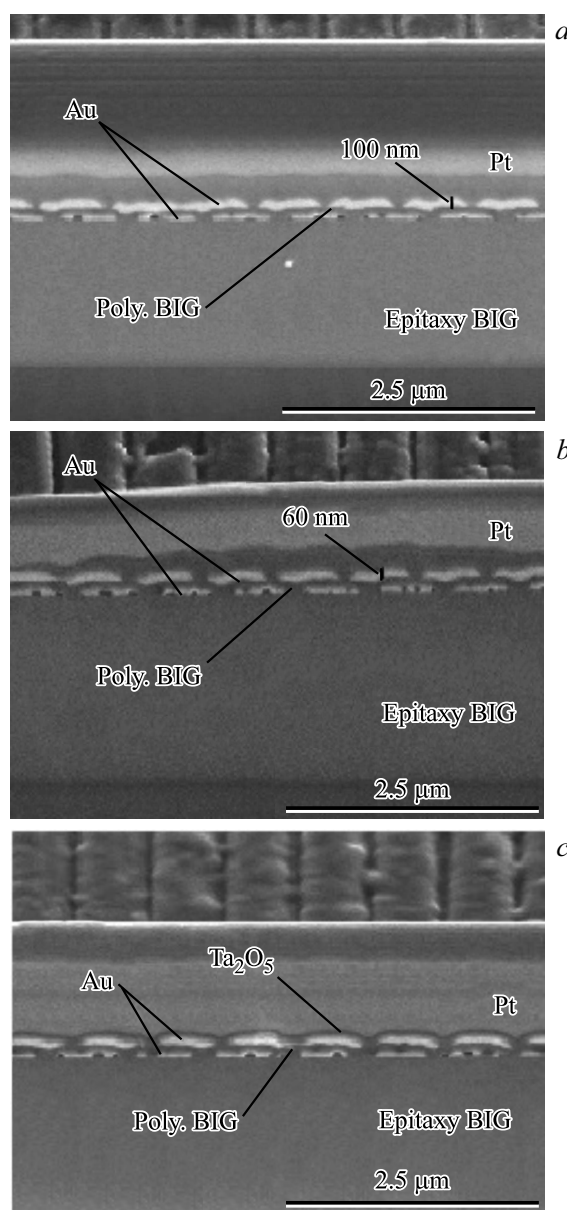


Рис. 4. СЗМ-изображения поперечного сечения, формируемого МПК на этапах: *a* — формирования плазмонной решетки; *b* — утонения плазмонной решетки; *c* — осаждение пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

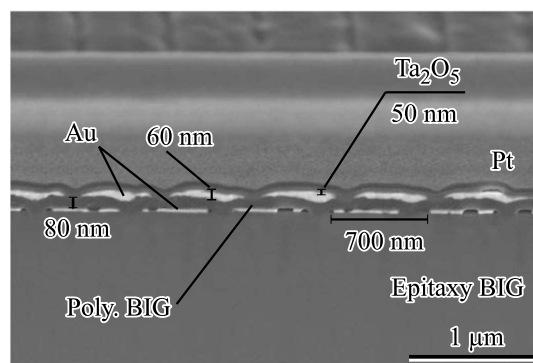
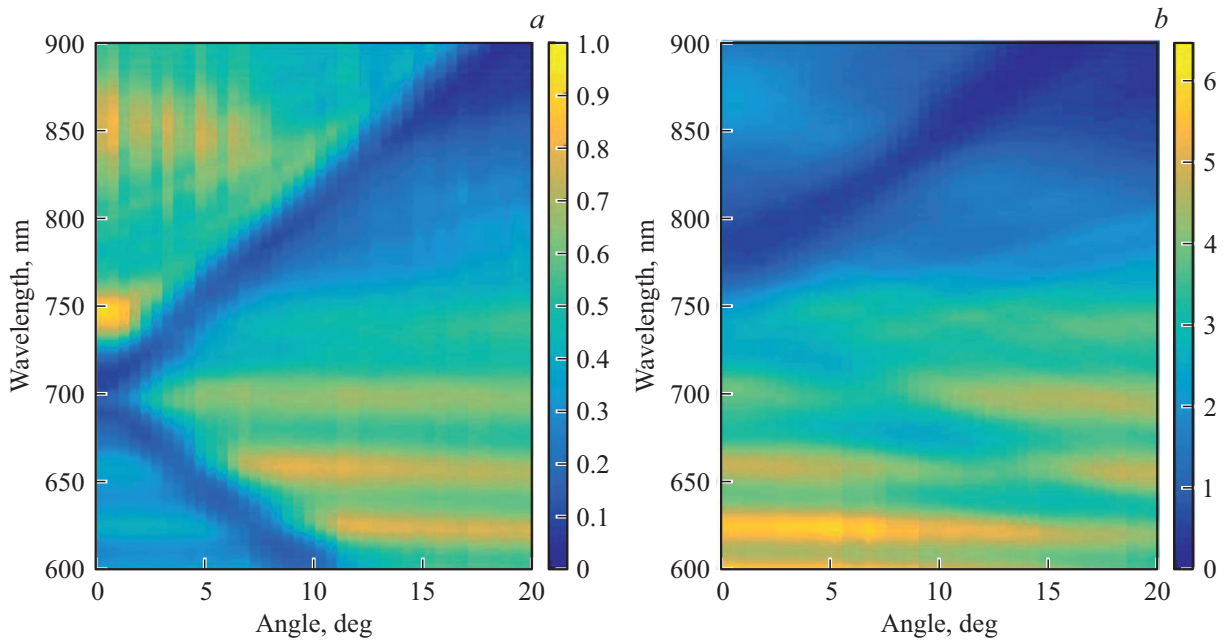


Рис. 5. СЭМ-изображение участка, сформированного 2D МПК с характерными размерами, полученной структуры.



**Рис. 6.** Спектры пропускания 2D МПК после изготовления плазмонной решетки: *a* — после изготовления плазмонной решетки толщиной около 100 нм; *b* — после утонения плазмонной решетки до 50–60 нм.

для кристаллизации промежуточного поликристаллического слоя граната, так и, вероятно, последующей обработкой ионным пучком при формировании верхней плазмонной решетки. В то же время необходимо отме-

тить, что периодическая структура распределения металла под слоем граната сохранилась, что принципиально важно для функционирования магнитного плазмонного кристалла. Из приведенных изображений следует, что осаждение пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> не привело к нарушению структуры сформированного МПК.

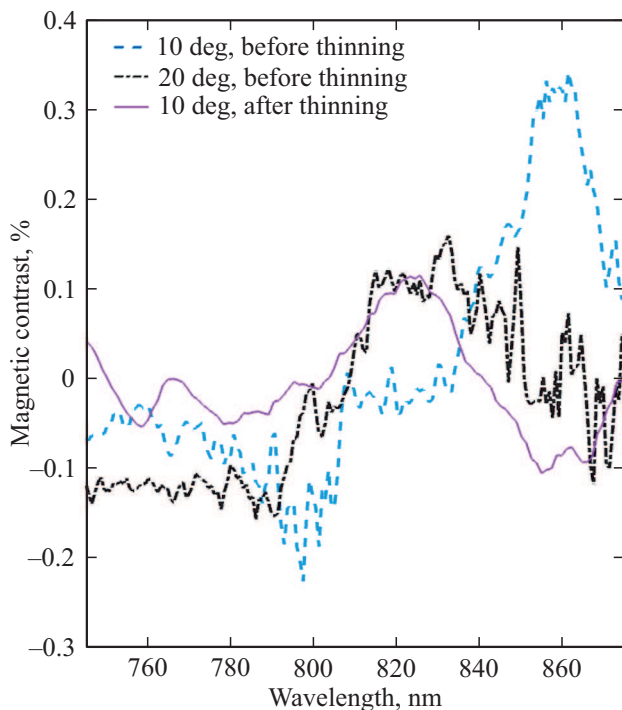
В изготовленных двухрешеточных плазмонных структурах были исследованы магнитооптические эффекты; на рис. 6 и 7 приведены частотно-угловые спектры пропускания и магнитного контраста двухрешеточной структуры после изготовления второй плазмонной решетки (рис. 6, *a*, 7), ее утонения до 50–60 нм и формирования пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (рис. 6, *b*, 7). На первом этапе обнаружено значительное ухудшение пропускания МПК, что ограничивало возможности практического использования и изучения таких структур. Тем не менее, видны характерные минимумы пропускания, связанные с резонансным возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), для которых закон дисперсии имеет вид

$$k_{\text{ППП}} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Au}} \epsilon_{\text{BIG}}}{\epsilon_{\text{Au}} + \epsilon_{\text{BIG}}}} = k_0 \sin \theta \pm m\mathbf{G},$$

где  $\theta$  — угол падения излучения накачки,  $k_0$  — его волновой вектор,  $\mathbf{G}$  — вектор обратной решетки,  $m$  — порядок моды. При малых углах падения резонансный угол падения, соответствующий возбуждению ППП, дается выражением

$$k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Au}} \epsilon_{\text{BIG}}}{\epsilon_{\text{Au}} + \epsilon_{\text{BIG}}}} = k_0 \sin \theta \pm m\mathbf{G},$$

где  $d$  — период плазмонной решетки,  $m$  — целое число; т. е. резонансная длина волны ППП линейно зависит от



**Рис. 7.** Магнитный контраст 2D МПК: после изготовления плазмонной решетки толщиной около 100 нм (угол падения излучения накачки 10 и 20 deg) и после (угол падения излучения накачки 10 deg) утонения плазмонной решетки до 50–60 нм.

угла падения. Такой вид спектра соответствует экспериментальному.

При измерении магнитооптического эффекта измерялся магнитный контраст пропускания  $T$ , определяемый как относительное изменение пропускания, измеренного для противоположных направлений приложенного поперечного магнитного поля,  $\rho = \frac{T(H) - T(-H)}{T(H) + T(-H)}$ . Из рис. 7 следует, что в структуре с толстой верхней решеткой золота в окрестности возбуждения ППП наблюдается магнитный контраст, знак которого различен для противоположных направлений распространения ППП (соответствующих разному знаку угла наклона ветви ППП к оси  $\theta$ ), однако ошибка измерений очень велика ввиду низкого пропускания двухрешеточной структуры.

После утонения плазмонной решетки до 50–60 nm (рис. 7) наблюдались увеличение пропускания до 2% и появление максимумов МО эффекта в области возбуждения ППП на интерфейсе золото/BIG. Видно, что наблюдается смена знака магнитного контраста вблизи резонанса ППП, что связано с магнитоиндуцированным смещением дисперсионных зависимостей ППП и появлением модуляции интенсивности пропускания для фиксированных длин волн. Кроме того, в частотно-угловом спектре магнитного контраста появляются дополнительные ветви ППП, слабо проявленные в спектрах пропускания, что связано с более высокой чувствительностью магнитооптического отклика к резонансным свойствам структуры.

Было показано, что дальнейшее утонение решетки золота привело к уменьшению МО эффектов. Кроме того, нанесение на решетку слоя  $Ta_2O_5$  не привело к значительным изменениям спектров кроме некоторого смещения плазмонного резонанса в сторону больших длин волн.

## 4. Заключение

Таким образом, развит метод формирования плазмонных гетероструктур и получен магнитный плазмонный кристалл, образованный двумя решетками золота, разделенные слоем висмутового граната, в котором плазмонные решетки смещены друг относительно друга на половину периода. Пленка золота второй плазмонной решетки осаждена конформно, нарушений структуры капсулирующей пленки BIG не выявлено. Морфология и адгезионные свойства пленки золота позволяют провести процесс ионно-лучевой постобработки для создания плазмонной решетки.

Показано, что применение повторного процесса отжига усугубляет процессы латерального растекания золота нижней решетки. Главным образом это может быть связано со снижением энергии активации процесса диффузии.

Полученная структура обладает характерными для МПК оптическими и магнитооптическими эффектами, связанными с резонансным возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов в решетках.

Представленный метод является удобным инструментом для создания новых композитных МПК с несколькими границами раздела золото/гранат. В таких структурах возможны качественно новые МО эффекты, вызванные взаимодействием ППП, распространяющихся на различных интерфейсах (как, например, в статье [8]). Для этих целей необходимо провести дополнительные исследования и численные расчеты отклика двухрешетчатых МПК в зависимости от таких геометрических параметров как толщины золотых пленок, величины периодов решеток, а также их относительное смещение.

## Благодарности

Авторы благодарны А.И. Стогнию за помощь в изготовлении образцов.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-02-00826.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*. Taylor and Francis, N. Y. (1997). 404 с.
- [2] S. Tomita, T. Kato, S. Tsunashima, S. Tsunashima, S. Iwata, M. Fujii, S. Hayashi. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 167402 (2006).
- [3] I.A. Kolmychek, A.N. Shaimanov, A.V. Baryshev, T.V. Murzina. *JETP Lett.* **102**, 46–50 (2015).
- [4] G. Armelles, A. Cebollada, A. García-Martín, M.U. González. *Adv. Opt. Mater.* **1**, 10 (2013).
- [5] A.V. Baryshev, H. Uchida, M. Inoue. *Opt. Soc. Am. B* **30**, 2371 (2013).
- [6] I. Razzolski, D. Makarov, O.G. Schmidt, A. Kirilyuk, T. Rasing, V.V. Temnov. *ACS Photonics* **3**, 2, 179 (2016).
- [7] F. Galvez, J. Del Valle, A. Gomez, M.R. Osorio, D. Granados, D. Perez, de Lara, M.A. Garcia, J.L. Vicent. *Opt. Mater. Express* **6**, 10, 3086 (2016).
- [8] V.I. Belotelov, I.A. Akimov, M. Pohl, V.A. Kotov, S. Kasture, A.S. Vengurlekar, A.V. Gopal, D.R. Yakovlev, A.K. Zvezdin, M. Bayer. *Nature Nanotechnol.* **6**, 370 (2011).
- [9] B. Sepulveda, L. Lechuga, G. Armelles, J. Light. *Technol.* **24**, 945 (2006).
- [10] D.O. Ignatyeva, G.A. Knyazev, P.O. Kapralov, G. Dietler, S.K. Sekatskii, V.I. Belotelov. *Sci. Rep.* **6**, 28077 (2016).
- [11] A.L. Chekhov, V.L. Krutyanskiy, V.A. Ketsko, A.I. Stognij, T.V. Murzina. *Opt. Mater. Express* **5**, 1647 (2015).
- [12] П.Н. Найденов, О.Л. Голикова, В.А. Кецко, А.Л. Чехов, Т.В. Мурзина. *Поверхность* **1**, 83–87 (2019).
- [13] A.L. Chekhov, P.N. Naydenov, M.N. Smirnova, V.A. Ketsko, A.I. Stognij, T.V. Murzina. *Opt. Express* **26**, 21086 (2018).
- [14] V. Bepalov, O.L. Golikova, S.S. Savin, A.I. Stognij. *Inorgan. Mater.* **48**, 12, 1190 (2012).

Редактор Д.В. Жуманов