

09,12

Оптические свойства металлodieлектрических структур на основе фотонно-кристаллических опаловых матриц*

© А.И. Ванин¹, А.Е. Лукин¹, С.Г. Романов², В.Г. Соловьев^{1,¶}, С.Д. Ханин^{3,4}, М.В. Яников¹

¹ Псковский государственный университет,
Псков, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

³ Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: solovyev_v55@mail.ru

Исследованы оптические свойства новых металлodieлектрических нанокomпозиционных материалов на основе опаловых матриц. Положение оптических резонансов нанокomпозитов, полученных введением серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии, объяснено брэгговской дифракцией, а асимметричная форма резонансных кривых — резонансом Фано.

Обнаружено аномальное пропускание и поглощение света гибридными плазмонно-фотонными слоистыми гетероструктурами, связанное, по-видимому, с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границ раздела „металл—диэлектрик“.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (НИР № 576 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/700 за 2014 г.).

DOI: 10.21883/FTT.2018.04.45691.06D

1. Введение

В последние десятилетия особую актуальность приобрели исследования фотонных кристаллов (ФК), которые используются для управления потоками электромагнитного (ЭМ) излучения. В качестве модельных объектов при исследовании оптических свойств ФК, могут выступать как синтетические опаловые матрицы [1], состоящие из одинаковых по размеру субмикронных сфер из SiO₂, упакованных в гранецентрированную кубическую структуру, способную играть роль трехмерной дифракционной решетки для видимого света, так и опалоподобные пленки, образованные глобулами из полимерного материала.

Фотонно-энергетическую структуру (ФЭС) подобных систем, определяющую их оптические свойства, можно изменять, создавая на их основе пространственно-неоднородные нанокomпозиционные материалы. В их число входят гибридные плазмонно-фотонные металлodieлектрические структуры, дающие возможность целенаправленно формировать оптический отклик систем, что значительно расширяет их функциональные возможности [2–6]. При этом физика процессов, вызывающих модификацию исходной ФЭС, определяется как дизайном создаваемой гетероструктуры, так и методом

введения в опаловую матрицу различных веществ, а также их оптическими свойствами.

Цель настоящей работы заключалась в установлении физических закономерностей оптических явлений в двух типах металлodieлектрических структур на основе фотонно-кристаллических опаловых матриц:

1) в нанокomпозиционных материалах Ag/опал на основе „массивных“ опаловых матриц, в которые серебро вводилось методом электротермодиффузии;

2) в слоистых металлodieлектрических структурах Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag, полученных последовательным напылением металлических (Ag) и диэлектрических (SiO₂) пленок на монослой (ML) опаловых глобул.

2. Методика эксперимента

Объектами исследования в настоящей работе служили „массивные“ образцы нанокomпозитов Ag/опал (рис. 1, *a*) и слоистые тонкопленочные гетероструктуры Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag (рис. 1, *b*).

Нанокomпозиты Ag/опал получены введением серебра в опаловую матрицу методом электротермодиффузии при значениях напряженности электрического поля $E = 1.70–3.75$ kV/cm и температурах $T = 660–800$ К.

Для образцов Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag (рис. 1, *b*) нанесение пленочных покрытий на монослой (ML) опаловых глобул из полиметилметакрилата (ПММА) производилось методом магнетронного распыления на установке ATC ORION SERIES SPUTTERING SYSTEM. Отметим, что

* Доклад на XIV Международной конференции „Физика диэлектриков“, Санкт-Петербург, 29 мая–2 июня 2017 г.

Материалы симпозиума частично опубликованы в выпуске № 3 за 2018 г. журнала „Физика твердого тела“.

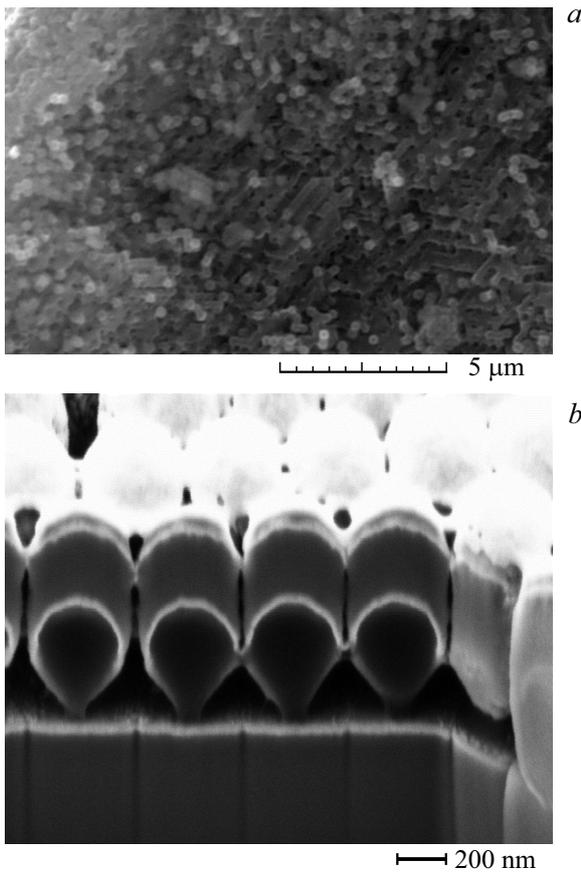


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения образцов Ag/опал (a) и Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag (b).

наружная поверхность тонкого слоя металла (или диэлектрика), покрывающего опаловые глобулы, при этом сохраняет форму и пространственную периодичность, характерную для границы раздела между опаловой матрицей и этим слоем [7].

Оптические свойства полученных ФК исследовались методом брэгговской спектроскопии с угловым разрешением при помощи экспериментальных установок на базе спектрометров Ocean Optics QE65000 и USB650 Red Tide.

3. Результаты и их обсуждение

Введение серебра в опаловую матрицу методом электротермодиффузии существенным образом модифицирует спектры отражения образца (рис. 2). Сравнение спектров отражения исходной матрицы опала (рис. 2, кривые 1 и 3) и нанокompозита Ag/опал (рис. 2, кривые 2 и 4) показывает, что введение серебра в матрицу опала приводит к длинноволновому сдвигу максимумов брэгговского отражения ФК при фиксированных значениях угла падения света. Этот эффект, неоднократно наблюдавшийся многими исследователями и ранее при введении различных веществ в опаловые матрицы,

можно связать с увеличением эффективного показателя преломления системы при диспергировании в исходной матрице вещества-„гостя“.

Из рис. 2 видно также, что в спектрах отражения матрицы-„хозяина“ и нанокompозита Ag/опал наблюдается обычный коротковолновый сдвиг максимумов при увеличении угла падения. При этом угловая дисперсия брэгговского резонанса первого порядка в спектрах обоих типов (рис. 3) хорошо описывается известной формулой, которая следует из законов Вульфа–Брэгга и Снеллиуса:

$$\lambda^2 = 4a^2n^2 - 4a^2\sin^2\theta, \quad (1)$$

где θ — угол падения, $a = 0.816$ — межплоскостное расстояние для плоскостей (111) ГЦК структуры опала, D — диаметр сфер, n — эффективный показатель преломления исследуемого фотонного кристалла.

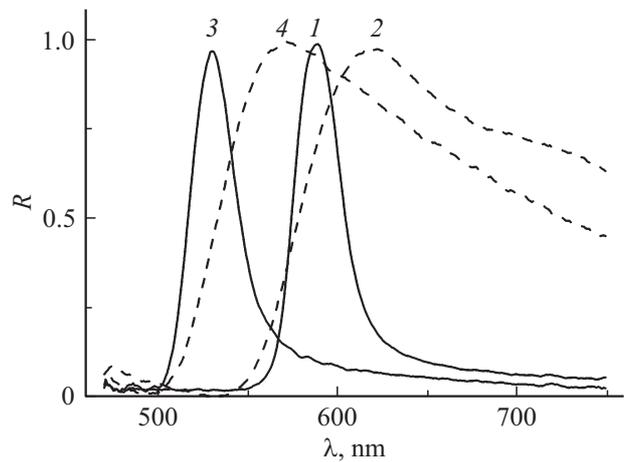


Рис. 2. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и нанокompозита Ag/опал (2, 4) при углах падения света 20° (1, 2) и 40° (3, 4).

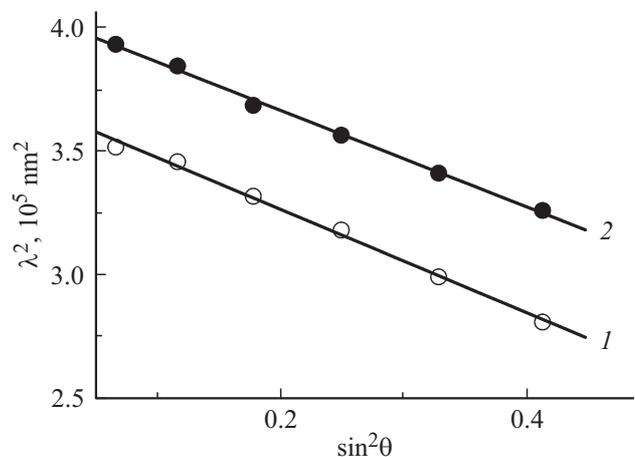


Рис. 3. Угловая дисперсия брэгговского резонанса первого порядка исходной матрицы опала (1) и нанокompозита Ag/опал (2).

Вместе с тем обращает на себя внимание ярко выраженная асимметрия широких полос в спектрах отражения нанокompозита Ag/опал (рис. 2, кривые 2 и 4), существенно отличающихся от соответствующих кривых $R(\lambda)$ исходной опаловой матрицы (рис. 2, кривые 1 и 3).

Подобный профиль характерен для резонанса Фано [8], который впервые наблюдался на брэгговских линиях в оптических спектрах чистых (без примесей) синтетических опалов авторами работ [9–11]. Как следует из сравнения кривых 2 и 4 с кривыми 1 и 3 (рис. 2), введение серебра в опаловую матрицу приводит к еще более яркому проявлению резонанса Фано, который может быть описан теоретически [6] на основе модельных представлений об интерференции двух волновых процессов. В данном случае в роли одного из них, по-видимому, выступает брэгговский дифракционный резонанс в ФК, а второй представляет собой излучение, рассеянное на случайных нарушениях структуры матрицы опала и неоднородностях (дендритах) в местах проникновения серебра в опаловую матрицу (рис. 1, *a*).

Спектры пропускания $T(\lambda)$ исследованных в работе тонкопленочных слоистых металлодиэлектрических структур при угле падения света $\theta = 15^\circ$ представлены на рис. 4. Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 4, *a*) показывает, что нанесение профилированной металлической пленки на монослой опаловых глобул приводит не только к ожидаемому общему уменьшению оптического пропускания образца, но также к появлению двух областей аномального пропускания (extraordinary transmission — EOT) — вблизи 590 и 500 nm. Как отмечалось в работе [5], возникновение указанных особенностей может быть связано с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [12,13] на границах раздела профилированной металлической пленки с диэлектрическим монослоем глобул из ПММА и воздухом соответственно. Спектральное положение коротковолновых пиков на кривой 2 соответствует особенностям, наблюдаемым в оптических спектрах металлического серебра [12–14], связанным с его электронной зонной структурой. На рис. 4, *b* (кривая 1) наглядно показаны относительные изменения спектра, обусловленные нанесением металлической пленки на монослой опаловых глобул.

Если последовательно с системой соединить оптический резонатор Ag/SiO₂/Ag с пиками пропускания при 395 и 760 nm (рис 4, *a*, кривая 3), то наблюдается дальнейшее уменьшение коэффициента пропускания рассматриваемой системы (рис. 4, *a*, кривая 4). Однако при этом происходит не только относительное увеличение аномального пропускания (EOT), но и превращение максимумов пропускания резонатора (рис. 4, *a*, кривая 3) в максимумы поглощения (extraordinary absorption — EOA) гибридного плазмонно-фотонного кристалла (рис. 4, *b*, кривая 2). Этот экспериментальный результат дает основание предположить, что в гибридных плазмонно-фотонных кристаллах со сложной

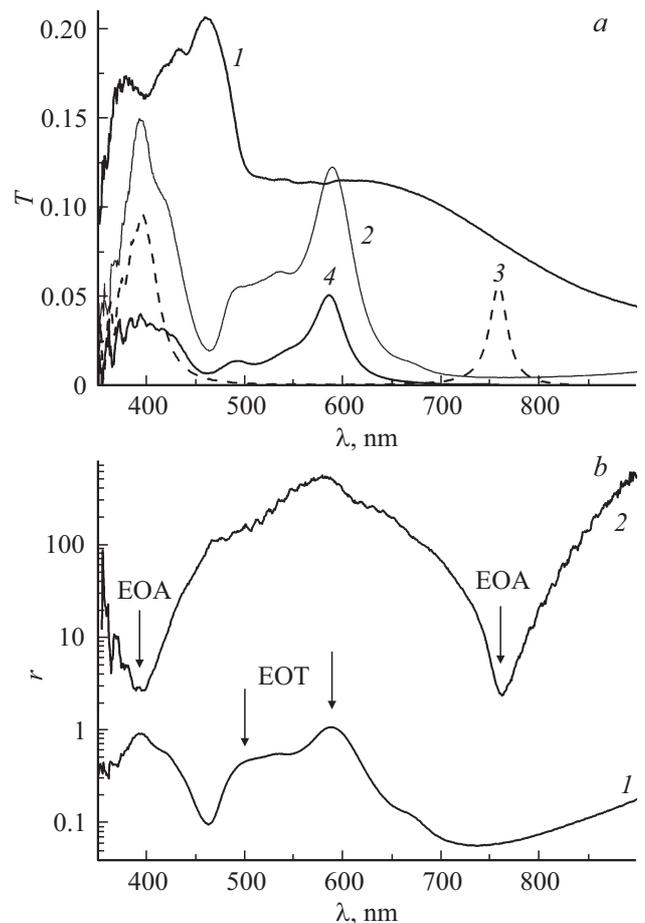


Рис. 4. *a*) Спектры пропускания монослоя опаловых глобул ($T_1(\lambda)$, кривая 1), плазмонно-фотонного кристалла Ag/ML/Ag ($T_2(\lambda)$, кривая 2), резонатора Ag/SiO₂/Ag ($T_3(\lambda)$, кривая 3), гибридного плазмонно-фотонного кристалла Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag ($T_4(\lambda)$, кривая 4) при угле падения света $\theta = 15^\circ$. *b*) Отношения $r_1 = T_2(\lambda)/T_1(\lambda)$ (кривая 1) и $r_2 = T_4(\lambda)/(T_2(\lambda) \times T_3(\lambda))$ (кривая 2).

архитектурой возможно возбуждение ППП двух типов: „светлых“, отвечающих за аномальное пропускание, и „темных“, вызывающих аномальное поглощение.

4. Заключение

Таким образом, в работе показана возможность практической реализации двух различных подходов к созданию металлодиэлектрических композитов на основе опаловых матриц. Первый из них осуществляется посредством введения металла в матрицу опала методом электротермодиффузии, второй — с помощью последовательного напыления тонких слоев металла и диэлектрика на поверхность опаловых глобул.

В обоих случаях происходит существенная модификация фотонно-энергетической структуры исходной диэлектрической матрицы за счет гибридных взаимо-

действий собственных фотонных мод и возбужденных в металле возмущений, природа которых различна.

Предложенные подходы к разработке архитектуры металлodieлектрических структур на основе фотонно-кристаллических опаловых матриц могут найти практическое применение в фотонике и наноплазмонике при создании оптических систем, управляющих потоками электромагнитного излучения.

Авторы признательны М.И. Самойловичу, В.И. Гербредеру, А.С. Огурцову, А.В. Цветкову, У. Пешелю и Д. Плоссу за предоставление образцов для исследования и помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] V.N. Astratov, V.N. Bogomolov, A.A. Kaplyanskii, A.V. Prokofiev, L.A. Samoilovich, S.M. Samoilovich, Yu.A. Vlasov. *Il Nuovo Cimento* **17D**, 1349 (1995).
- [2] V.S. Gorelik, L.I. Zlobina, V.A. Karavanskii, O.A. Troitskii, R.I. Chanieva. *Inorg. Mater.* **46**, 862 (2010).
- [3] S.G. Romanov, A. Korovin, A. Regensburger, U. Peschel. *Adv. Mater.* **23**, 2515 (2011).
- [4] V.L. Veisman, S.G. Romanov, V.G. Solovyev, M.V. Yanikov. *Proc. X Int. Sci. and Practical Conf. „Environment. Technology. Resources“*. Rēzekne, Latvia (2015). P. 230.
- [5] A.V. Cvetkov, V.I. Gerbreder, S.D. Khanin, A.E. Lukin, A.S. Ogurcovs, S.G. Romanov, V.G. Solovyev, A.I. Vanin, M.V. Yanikov. *Proc. XI Int. Sci. and Practical Conf. „Environment. Technology. Resources“*. Rēzekne, Latvia (2017). P. 37.
- [6] А.И. Ванин, В.Г. Соловьев. Сб. науч. тр. VI междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М., НИЯУ МИФИ (2017). С. 140.
- [7] Н.О. Алексеева, В.Л. Вейсман, А.Е. Лукин, С.В. Панькова, В.Г. Соловьев, М.В. Яников. *Нанотехника*, **3 (31)**, 23 (2012).
- [8] U. Fano. *Phys. Rev.* **124**, 1866 (1961).
- [9] M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, K.B. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov. *Phys. Rev. Lett.* **103**, 023901 (2009).
- [10] M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, A.K. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov. *Photon. Nanostruct. — Fundamentals and Appl.* **8**, 86 (2010).
- [11] M.F. Limonov, M.V. Rybin, A.N. Poddubny, Y.S. Kivshar. *Nature Photonics* **11**, 543 (2017).
- [12] S.A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer, NY (2007). 223 p.
- [13] В.В. Климов. *Наноплазмоника*. Физматлит, М. (2010). 480 с.
- [14] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. Наука, М. (1970). 856 с.