

Передача и преобразование электромагнитного излучения фотонно-кристаллическими металлodieлектрическими системами на основе опалов

© А.И. Ванин¹, Ю.А. Кумзеров^{1,2}, С.Г. Романов², В.Г. Соловьев^{1,3,¶}, С.Д. Ханнин³,
А.В. Цветков¹, М.В. Яников¹

¹ Псковский государственный университет,
180000 Псков, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Военная академия связи им. С.М. Буденного,
194064 Санкт-Петербург, Россия

¶e-mail: solovyev_v55@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

В окончательной редакции 20.05.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2020 г.

Проведено экспериментальное исследование оптических свойств двух видов металлodieлектрических композитов на основе опаловых матриц:

- 1) слоистых структур, полученных последовательным напылением металлических и диэлектрических пленок на монослой опаловых глобул, где обнаружено аномальное пропускание и поглощение света вследствие возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов различных типов;
- 2) „массивных“ образцов опалов, в которые металл вводился методом электротермодиффузии, где наблюдалась асимметричная форма брэгговских резонансных кривых, обусловленная резонансом Фано.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, опалы, поверхностные плазмон-поляритоны, металлodieлектрические системы, резонанс Фано.

DOI: 10.21883/OS.2020.12.50330.156-20

Введение

Под фотонными кристаллами (ФК) понимают оптические материалы, обладающие пространственной периодичностью показателя преломления (ПП) [1,2]. В результате возникают запрещенные энергетические состояния для света с длиной волны, сопоставимой с периодом структуры, — фотонные запрещенные зоны (ФЗЗ), что экспериментально проявляется в возникновении максимумов в спектрах отражения и коррелирующих с ними минимумов в спектрах пропускания. Возможность целенаправленно влиять на положение и ширину ФЗЗ, выбирая используемый материал и меняя геометрию структуры, позволяет применять ФК на практике при изготовлении устройств, управляющих потоками электромагнитного (ЭМ) излучения.

В роли трехмерных ФК могут успешно выступать синтетические опалы, состоящие из одинаковых субмикронных сфер (глобул), образующих гранецентрированную кубическую решетку [3]. Поскольку фотонно-энергетическая структура (ФЭС) опала определяется особенностями его строения, необходимым условием расширения функциональных возможностей образца по управлению потоками ЭМ излучения является ее модификация. Диспергирование различных веществ в опаловых матрицах [4], обладающих регулярной системой

полостей первого и второго порядков [5], позволяет осуществлять модификацию ФЭС вследствие изменения функции распределения ПП входящих в состав образца компонент.

Модификацию ФЭС ФК можно также осуществить путем гибридизации собственных фотонных мод опала с волнами рассеяния на дефектах кристалла или возбуждения плазмонных резонансов при введении наночастиц металлического наполнителя [6,7].

Альтернативным вариантом построения гибридных систем является создание металлodieлектрических плазмонно-фотонных гетерокристаллов (ПФГК), состоящих из различных комбинаций слоев коллоидных ФК в контакте с тонкопленочными плазмонными кристаллами [8]. В этом случае функциональные возможности управления потоками ЭМ излучения (как и возможности управления движением электронов) значительно расширяются благодаря дополнительным эффектам переноса энергии вдоль границы металл-диэлектрик за счет поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [9–11]. Практическая реализация подобных структур возможна в случае, если морфология связанного металлического покрытия отвечает решетке исходного ФК.

Цель данной работы, продолжающей предшествующие исследования [12–15], — детализировать информацию об оптических явлениях, происходящих в двух ти-

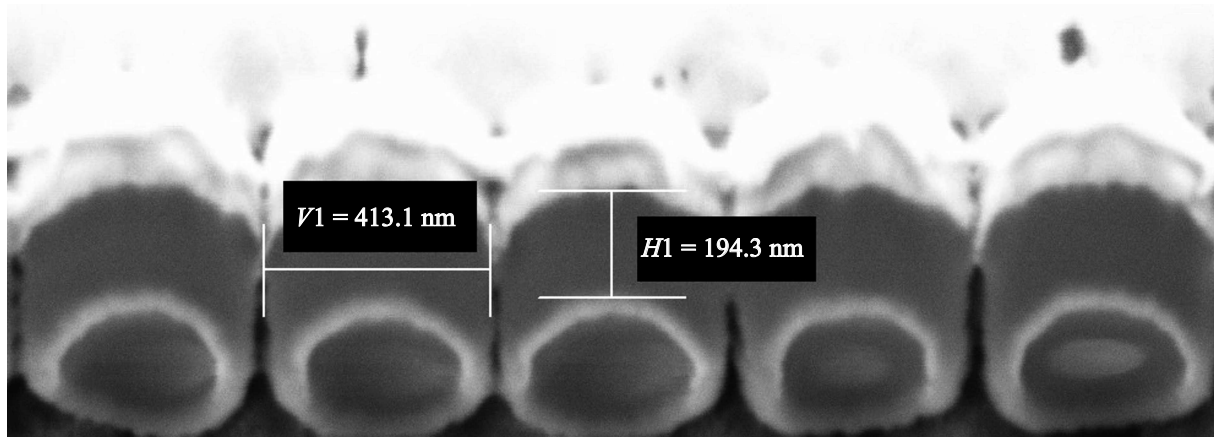


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения образца гибридного плазмонно-фотонного кристалла $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{ML}/\text{Ag}$.

пах фотонно-кристаллических металлодиэлектрических структур на основе опалов:

1) в слоистых металлодиэлектрических структурах, полученных последовательным напылением металлических и диэлектрических пленок на монослой (ML) опаловых глобул;

2) в нанокпозиционных материалах $\text{Ag}/\text{опал}$ или $\text{Sn}/\text{опал}$ на основе „массивных“ опаловых матриц, в которые металл вводился методом электротермодиффузии.

Экспериментальная часть

В настоящей работе исследованы оптические свойства слоистых тонкопленочных гетероструктур $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{ML}/\text{Ag}$ и „массивных“ образцов нанокпозиционных $\text{Me}/\text{опал}$ ($\text{Me} = \text{Ag}, \text{Sn}$).

Образцы $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{ML}/\text{Ag}$ получены посредством последовательного нанесения металлических (Ag) и диэлектрических (SiO_2) пленочных покрытий заданной толщины на монослой (ML) опаловых глобул из полиметилметакрилата (ПММА) методом магнетронного распыления на установке ATC ORION SERIES SPUTTERING SYSTEM. В качестве контрольного образца использовался резонатор Фабри-Перо (интерференционный фильтр) $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ со слоем диэлектрика такой же толщины, отдельно сформированный на плоской поверхности.

Изображение поперечного сечения образца $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{ML}/\text{Ag}$ (рис. 1) получено после его обработки сфокусированным пучком ионов аргона на сканирующем электронном микроскопе ZEISS FIB-SEM GEMINI.

Опыт показал [13–15]), что наружная поверхность тонкого слоя вещества, покрывающего опаловые глобулы, сохраняла форму и пространственную периодичность, характерную для границы раздела между опалоподобной пленкой и этим слоем.

Нанокпозиционные $\text{Me}/\text{опал}$ получены введением металла (серебра или олова) в „массивные“ образцы опаловых матриц методом электротермодиффузии при значениях напряженности постоянного электрического поля $E = 1.10\text{--}3.75\text{ kV/cm}$. Введение серебра осуществлялось при температурах $T = 660\text{--}800\text{ K}$, введение олова — при $T = 500\text{ K}$.

Спектры пропускания s - и p -поляризованного света слоистыми тонкопленочными гетероструктурами (когда вектор напряженности электрического поля ЭМ волны перпендикулярен или параллелен плоскости падения соответственно) исследовались с угловым разрешением с помощью экспериментальной установки на базе спектрометра Ocean Optics QE65000. Для изучения спектров отражения естественного света „массивными“ металлодиэлектрическими образцами на основе опалов использовалась установка на базе спектрометра USB650 Red Tide.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2,а представлены спектры пропускания исследованных в работе тонкопленочных слоистых металлодиэлектрических структур при нормальном падении света. Монослой опаловых глобул, выращенный на стеклянной подложке, взаимодействует со светом подобно двумерной дифракционной решетке. Вместе с тем, как показано в работе [16], локализация ЭМ поля в монослое позволяет рассматривать его как плоский волновод. Эти два возможных сценария взаимодействия ЭМ волн с монослоем (поверхностная дифракция света и волноводные резонансы) и определяют сложный характер спектра пропускания $T_1(\lambda)$ монослоя (рис. 2,а, кривая 1). При этом наиболее интенсивный минимум пропускания (расположенный на кривой 1 при 509 nm) с ростом угла падения сдвигается в область более длинных волн. При малых углах падения положение этого минимума позволяет по известным формулам,

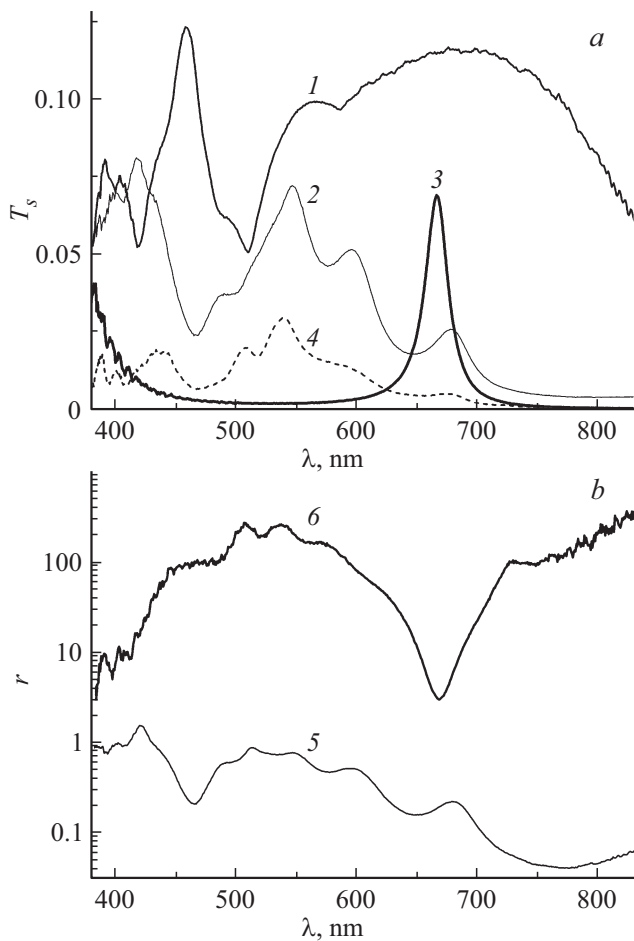


Рис. 2. (а) Спектры пропускания монослоя опаловых глобул ($T_1(\lambda)$, кривая 1), плазмонно-фотонного кристалла Ag/ML/Ag ($T_2(\lambda)$, кривая 2), резонатора $\text{Ag/SiO}_2/\text{Ag}$ ($T_3(\lambda)$, кривая 3), гибридного плазмонно-фотонного кристалла $\text{Ag/SiO}_2/\text{Ag/ML/Ag}$ ($T_4(\lambda)$, кривая 4) при нормальном падении света. (б) Отношения $r_5(\lambda) = T_2(\lambda)/T_1(\lambda)$ (кривая 5) и $r_6(\lambda) = T_4(\lambda)/(T_2(\lambda)T_3(\lambda))$ (кривая 6).

описывающим возбуждение поверхностных ЭМ волн на периодической структуре [9,16,17], оценить ее период: $d \approx \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}}$, где $n_{\text{eff}} \approx 1.32$ — эффективный показатель преломления монослоя, который можно определить из соотношения: $n_{\text{eff}}^2 = f n_{\text{PMMA}}^2 + (1-f)n_{\text{air}}^2$, где показатель преломления опаловых глобул $n_{\text{PMMA}} \approx 1.49$, а их объемная доля в монослое $f = \frac{\pi}{3\sqrt{3}}$. Полученное значение $d \approx 385 \text{ nm}$ находится в разумном согласии с одним из параметров двумерной дифракционной решетки [16]: $a = \frac{D\sqrt{3}}{2} \approx 357 \text{ nm}$, где в соответствии с данными электронной микроскопии (рис. 1) диаметр опаловых глобул $D \approx 413 \text{ nm}$.

Как показывает эксперимент, вблизи минимумов в спектрах пропускания монослоя наблюдается поляризационная анизотропия: коэффициент пропускания света T_p , имеющего ориентацию вектора напряженности электрического поля в плоскости падения ЭМ волны,

примерно вдвое превышает коэффициент пропускания света T_s , для которого электрический вектор перпендикулярен этой плоскости. Подобные явления наблюдались ранее в пленках опалов в работе [18] и связывались с более сильным ослаблением s -поляризованного света в образцах.

Если монослой опаловых глобул поместить между двумя тонкими пленками металлического серебра (т.е. создать систему Ag/ML/Ag), то наряду с ожидаемым небольшим уменьшением величины оптического пропускания системы в соответствующем спектре $T_2(\lambda)$ мы обнаруживаем также наиболее заметные пики пропускания при 597 и 547 nm (рис. 2, а, кривая 2). Этот эффект аномального пропускания (extraordinary transmission, EOT), по-видимому, обусловлен возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся вдоль границ раздела “профилированный слой серебра—монослой опаловых глобул” и “профилированный слой серебра—воздух” соответственно. Отметим, что пик пропускания вблизи 400 nm (рис. 2, а, кривая 2), вероятно, связан с межзонными переходами в металлическом серебре [10,11,19].

График функции $r_5(\lambda) = T_2(\lambda)/T_1(\lambda)$ (рис. 2, б, кривая 5) иллюстрирует относительные изменения спектра пропускания, вызванные пленками серебра, между которыми располагается монослой опаловых глобул.

Однако наиболее интересные эффекты (как и в случаях, рассмотренных нами ранее в работах [13,14]) возникают при последовательном соединении с системой Ag/ML/Ag оптического резонатора $\text{Ag/SiO}_2/\text{Ag}$, в спектре пропускания которого $T_3(\lambda)$ обнаруживается резкий пик при 667 nm (рис. 2, а, кривая 3). В спектре $T_4(\lambda)$ полученного при этом гибридного плазмонно-фотонного кристалла $\text{Ag/SiO}_2/\text{Ag/ML/Ag}$ наблюдается дальнейшее падение коэффициента пропускания, имеющее селективный характер: в наибольшей степени пропускание уменьшается как раз в области максимального пропускания резонатора (рис. 2, а, кривая 4). Это убедительно демонстрирует график функции $r_6(\lambda) = T_4(\lambda)/(T_2(\lambda)T_3(\lambda))$ (рис. 2, б, кривая 6).

В идеальном случае для последовательно расположенных друг за другом “пассивных” оптических элементов при отсутствии взаимодействия между ними имело бы место соотношение $T_4(\lambda) = T_2(\lambda)T_3(\lambda)$, так что отношение r_6 равнялось бы единице. В действительности, как показывает рис. 2, б, наблюдается отчетливая спектральная зависимость $r_6(\lambda)$, причем на графике наряду с небольшими максимумами возникает глубокий минимум пропускания, или максимум аномального поглощения, который по аналогии можно назвать “extraordinary absorption”, EOA. Подчеркнем, что спектральное положение EOA отвечает максимуму в спектре пропускания резонатора $\text{Ag/SiO}_2/\text{Ag}$, что подтверждают рис. 3 и 4, где представлена угловая дисперсия положения этих экстремумов для двух резонаторов с разной толщиной диэлектрического слоя.

Отметим, что расщепление полосы пропускания интерференционного фильтра (рис. 3), обусловленное, по-видимому, различием в фазовых сдвигах при отражении от слоя серебра *s*- и *p*-компонент светового пучка, наблюдалось еще в ранних классических работах [20].

Эксперименты, проведенные нами по той же схеме с аналогичным гибридным плазмонно-фотонным кристаллом Au/SiO₂/Au/ML/Au, где серебро было заменено на золото, оказались неудачными, по-видимому, вследствие высокого поглощения света в области межзонных переходов (в золоте эта область начинается с 2 eV, тогда как в серебре — лишь с 4 eV [9,10]). Не удалось также наблюдать аномальное оптическое поглощение в ПФГК Ag/ML/Ag/SiO₂/Ag, когда монослой опаловых глобул выращивался на плоской (а не профилированной, необходимой для образования поверхностных плазмон-поляритонов) поверхности резонатора Ag/SiO₂/Ag, предварительно сформированного на стеклянной подложке.

Перейдем теперь к рассмотрению металлодиэлектрических структур другого типа — нанокомпозитов Me/опал, полученных введением металла в „массивный“ образец опаловой матрицы методом электротермодиффузии.

Как показывает опыт, форма оптических спектров отражения нанокомпозита Ag/опал существенно зависит от условий введения серебра в опаловую матрицу. При этом в наших экспериментах наблюдались два различных случая.

При сравнительно небольшой напряженности электрического поля ($E \approx 1.1 \text{ kV/cm}$), при которой происходила электротермодиффузия, плотность тока, протекающего через образец с прижимными серебряными элект-

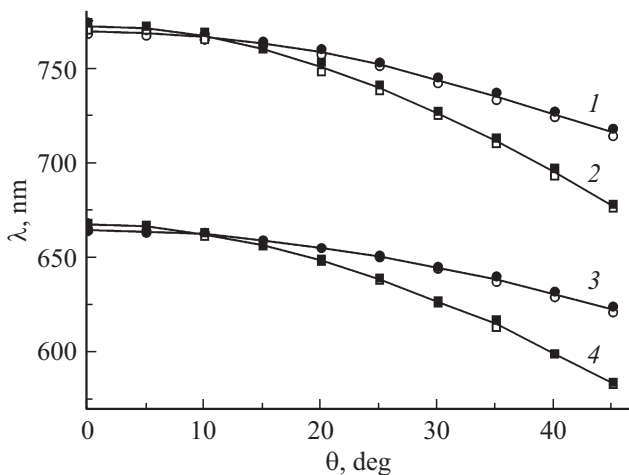


Рис. 3. Угловая дисперсия максимумов первого порядка в спектрах пропускания резонаторов (интерференционных фильтров) Ag/SiO₂/Ag (светлые кружки и квадраты) и минимумов в спектральных зависимостях отношения $r_6(\lambda) = T_4(\lambda)/(T_2(\lambda)T_3(\lambda))$ (темные кружки и квадраты) при различных значениях толщины диэлектрического слоя резонатора (1,2 — 250 нм; 3,4 — 194 нм) и различных поляризациях падающего света (1,3 — *p*-поляризация; 2,4 — *s*-поляризация).

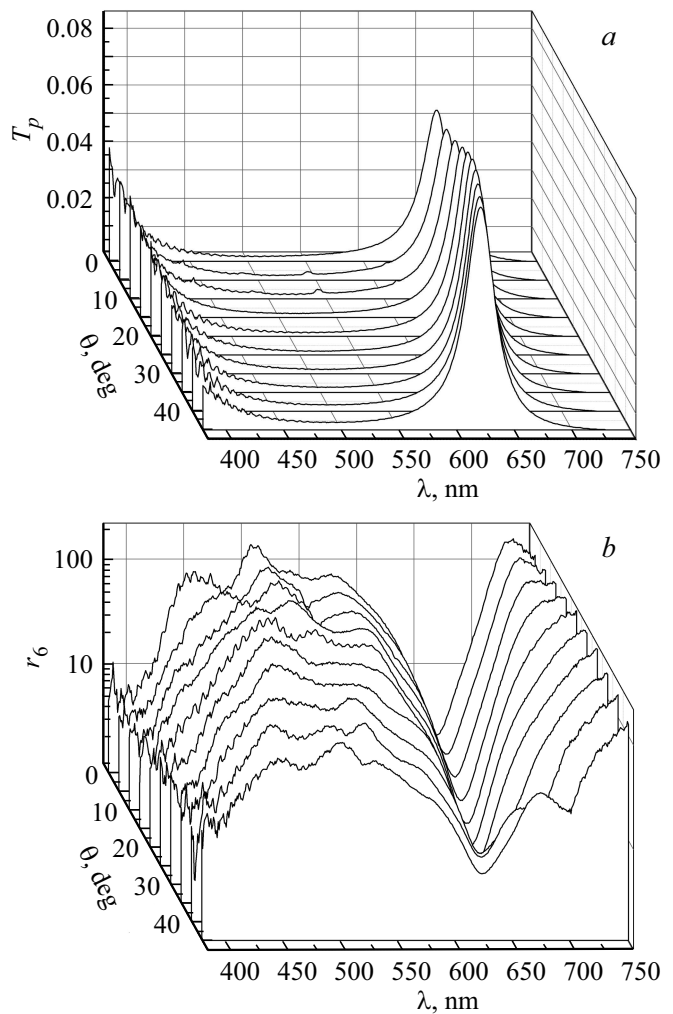


Рис. 4. (а) Спектры пропускания резонатора Ag/SiO₂/Ag с толщиной диэлектрического слоя 194 нм при различных углах падения света θ на образец (*p*-поляризация). (б) Отношение $r_6(\lambda) = T_4(\lambda)/(T_2(\lambda)T_3(\lambda))$, определяющее положение ЕОА при различных углах падения света θ на образец (*p*-поляризация).

тродами при температуре $T \approx 700 \text{ K}$, почти не меняла своего значения ($j \approx 2.5 \text{ mA/cm}^2$) на протяжении всего времени опыта ($t = 4 \text{ h}$).

В этом случае в спектрах отражения нанокомпозита Ag/опал наряду с полосой исходной опаловой матрицы возникала более слабая длинноволновая полоса (рис. 5), связанная предположительно с появлением наночастиц серебра на поверхности (или внутри — в порах второго порядка) некоторых опаловых глобул.

С другой стороны, при увеличении напряженности электрического поля в образце до значений $E \approx 1.7 \text{ kV/cm}$ плотность тока при тех же температурах возрастала в процессе электролиза в 500 раз (от $j_1 \approx 2.6 \text{ mA/cm}^2$ до $j_2 \approx 1.3 \text{ mA/cm}^2$). При этих условиях в образце возможно образование дендритов, рассеяние света на которых может приводить к несим-

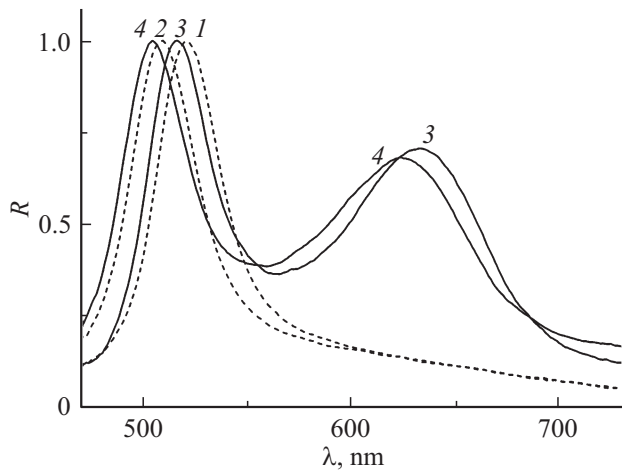


Рис. 5. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 2) и нанокompозита Ag/опал (3, 4), полученного методом электротермодиффузии при небольших плотностях тока, измеренные при углах падения света 25° (1, 3) и 30° (2, 4).

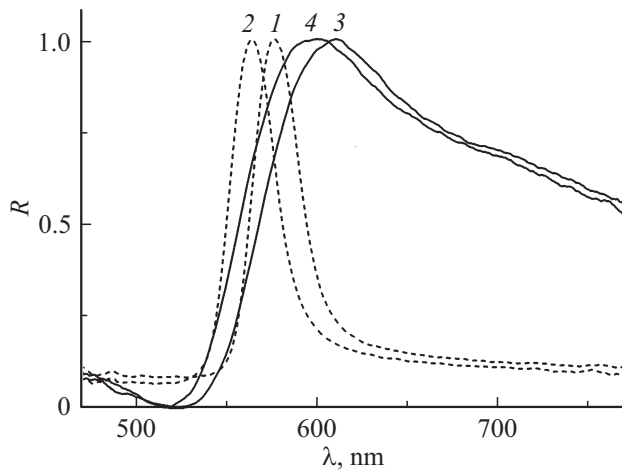


Рис. 6. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 2) и нанокompозита Ag/опал (3, 4), полученного методом электротермодиффузии при больших плотностях тока, измеренные при углах падения света 25° (1, 3) и 30° (2, 4).

метричности полос в спектрах отражения нанокompозита Ag/опал (рис. 6). Подобный несимметричный профиль характерен для резонанса Фано [21], который ранее наблюдался на брэгговских линиях в оптических спектрах чистых (без примесей) синтетических опалов в работах [22–24]. Как следует из сравнения кривых 3 и 4 с кривыми 1 и 2 (рис. 6), введение серебра в опаловую матрицу приводит к яркому проявлению резонанса Фано, который может быть описан теоретически [25] на основе модельных представлений об интерференции двух ЭМ волн. В данном случае в роли одной из них, по-видимому, выступает узкополосное излучение, обусловленное брэгговской дифракцией в ФК, а вторая представляет собой широкополосное излучение, возникающее в результате рассеяния на случайных нарушени-

ях структуры матрицы опала и неоднородностях (дендритах), образующихся в местах проникновения серебра в трехмерную систему взаимосвязанных пор опаловой матрицы, что убедительно подтверждают соответствующие электронно-микроскопические изображения [13,14].

Аналогичные (хотя и менее ярко выраженные) эффекты наблюдались нами и в нанокompозитах Sn/опал [26], полученных введением олова в опаловую матрицу при напряженности электрического поля $E \approx 1.9 \text{ kV/cm}$ и температуре 500 К (на 5 К ниже точки плавления „массивного“ Sn). Отметим, что формирование микро- и нанодендритов из Sn в нанопористом стекле в результате электролиза наблюдалось ранее в работе [27].

Как видно из рис. 7, демонстрирующего „синий“ сдвиг максимумов в спектрах отражения, представленных на рис. 5 и 6, при увеличении угла падения θ наблюдается линейная зависимость $\lambda^2 = f(\sin^2 \theta)$, отвечающая известному соотношению, которое легко получить из законов Вульфа–Брэггов (для резонанса первого порядка) и Снеллиуса:

$$\lambda^2 = 4d^2 - 4d^2 \sin^2 \theta,$$

где $d = 0.816D$ — межплоскостное расстояние для плоскостей (111) ГЦК структуры опала, D — диаметр опаловых глобул.

Заметим, однако, что в случаях, когда исходная опаловая матрица обладала частичным разупорядочением, представляя собой так называемое „фотонное стекло“, в соответствующих спектрах отражения нами наблюдались также и максимумы отражения, положение которых не менялось при увеличении угла падения света на образец [13].

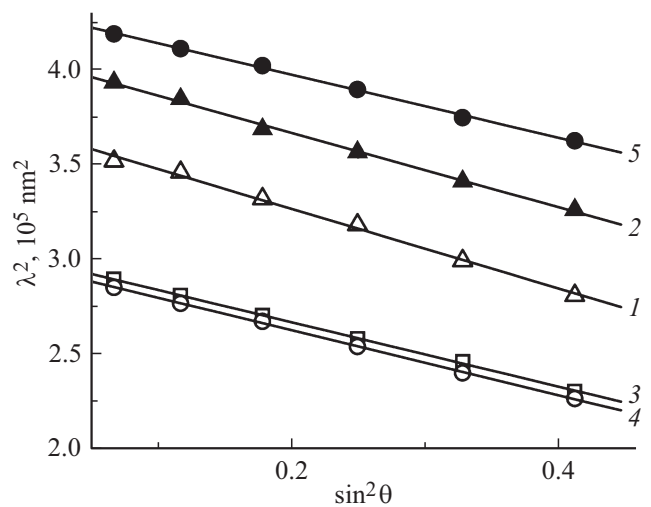


Рис. 7. Угловая дисперсия брэгговского резонанса первого порядка для исходных опаловых матриц с диаметрами глобул 288 (1), 251 нм (3) и нанокompозитов Ag/опал, полученных введением серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии при значениях напряженности электрического поля 1.7 (2) и 1.1 kV/cm (4, 5).

Заключение

В работе представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования процессов передачи и преобразования электромагнитного излучения в полученных авторами двух типах металлодиэлектрических фотонно-кристаллических композиционных систем на основе опалов: 1) слоистых металлодиэлектрических гетероструктурах, сформированных путем последовательного напыления металлических и диэлектрических пленок на опалоподобные монослои, и 2) „массивных“ образцов синтетических опалов, в которые металл вводился методом электротермомодиффузии.

В оптических спектрах слоистых плазмонно-фотонных гетероструктур наряду с аномальным пропусканием света обнаружено также его интенсивное аномальное поглощение, что связано, по-видимому, с возбуждением на границах раздела „профилированный слой металла—монослой опаловых глобул“ поверхностных плазмон-поляритонов различных типов.

Положение оптических резонансов наноконструкций, полученных введением металла в опаловую матрицу методом электротермомодиффузии, обусловлено брэгговской дифракцией, а асимметричная форма резонансных кривых — резонансом Фано.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработчиков при создании оптических систем, управляющих потоками электромагнитного излучения, в фотонике и наноплазмонике.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Германской службы академических обменов (DAAD) и РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90003.

Благодарность

Авторы признательны М.И. Самойловичу, У. Пешелю и Д. Плоссу за предоставление образцов для исследования, полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, 2008. 286 p.
- [2] Photonic crystals: Advances in design, fabrication, and characterization / Ed. by Busch K., Lölkes S., Wehrspohn R.B., Föll H. Wiley-VCH, 2004. 354 p.
- [3] Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлев В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. // Кристаллография. 1993. Т. 38. № 3. С. 111.
- [4] Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskiy A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A. // Il Nuovo Cimento. 1995. V. 17D. P. 1349.
- [5] Богомолов В.Н., Парфеньева Л.С., Прокофьев А.В., Смирнов И.А., Самойлович С.М., Ежовский А., Муха Я., Мисерек Х. // ФТТ. 1995. Т. 37. № 11. С. 3411.
- [6] Горелик В.С. // ФТТ. 2009. Т. 51. № 7. С. 1252; Gorelik V.S. // Physics Solid State. 2009. V. 51. N 7. P. 1321.
- [7] Саласюк А.С., Щербakov А.В., Акимов А.В., Грудинкин С.А., Дукин А.А., Каплан С.Ф., Певцов А.Б., Голубев В.Г. // ФТТ. 2010. Т. 52. № 6. С. 1098; Salasyuk A.S., Shcherbakov A.V., Akimov A.V., Grudinkin S.A., Dukin A.A., Kaplan S.F., Pevtsov A.B., Golubev V.G. // Phys. Sol. State. 2010. V. 52. N 6. P. 1170.
- [8] Romanov S.G., Korovin A., Regensburger A., Peschel U. // Advanced Materials. 2011. V. 23. P. 2515.
- [9] Поверхностные поляритоны (Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред) / Под ред. Аграновича В.М., Миллса Д.Л. М.: Наука, 1985. 526 с.
- [10] Maier S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. NY: Springer, 2007. 223 p.
- [11] Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010. 480 с.
- [12] Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyev V.G., Yanikov M.V. // Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Rēzekne, Latvia, 2015. V. 1. P. 230. doi 10.17770/etr2015vol1.197
- [13] Svetkov A.V., Gerbreder V.I., Khanin S.D., Lukin A.E., Ogurcovs A.S., Romanov S.G., Solovyev V.G., Vanin A.I., Yanikov M.V. // Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Rēzekne, Latvia, 2017. V. III. P. 37. doi 10.17770/etr2017vol3.2660
- [14] Ванин А.И., Лукин А.Е., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Ханин С.Д., Яников М.В. // ФТТ. 2018. Т. 60. № 4. С. 770; Vanin A.I., Lukin A.E., Romanov S.G., Solovyev V.G., Khanin S.D., Yanikov M.V. // Phys. Sol. State. 2018. V. 60. N 4. P. 774.
- [15] Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Панькова С.В., Соловьев В.Г., Яников М.В. // Нанотехника. 2012. № 3 (31). С. 23.
- [16] Романов С.Г. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 7. С. 1329; Romanov S.G. // Phys. Sol. State. 2017. V. 59. N 7. P. 1356.
- [17] Физическая энциклопедия / Главный редактор А.М. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. Т. 3. С. 651.
- [18] Романов С.Г. // ФТТ. 2010. Т. 52. № 4. С. 788; Romanov S.G. // Phys. Sol. State. 2010. V. 52. N 4. P. 844.
- [19] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.; Born M., Wolf E. Principles of optics. Oxford: Pergamon Press, 1964.
- [20] Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз, 1958. 570 с.
- [21] Fano U. // Phys. Rev. 1961. V. 124. P. 1866.
- [22] Rybin M.V., Khanikaev A.B., Inoue M., Samusev K.B., Steel M.J., Yushin G., Limonov M.F. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. P. 023901.
- [23] Rybin M.V., Khanikaev A.B., Inoue M., Samusev A.K., Steel M.J., Yushin G., Limonov M.F. // Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications. 2010. V. 8. P. 86.

- [24] *Limonov M.F., Rybin M.V., Poddubny A.N., Kivshar Y.S.* // Nature Photonics. 2017. V. 11. P. 543.
- [25] *Ванин А.И., Соловьев В.Г.* // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 140.
- [26] *Ванин А.И., Панькова С.В., Соловьев В.Г., Цветков А.В., Яников М.В.* // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 573.
- [27] *Сидоров А.И., Тунг Нго Дуи, Ву Нго Ван, Антропова Т.В., Нащекин А.В.* // Опт. и спектр. 2019. Т. 127. № 5. С. 841; *Sidorov A.I., Tung Ngo Dui, Wu Ngo Van, Antropova T.V., Nashchekin A.V.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. N 5. P. 914. doi 10.21883/OS.2019.11.48525.135-19