

ПОЛУЧЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ЙОДА В ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ ОПАЛА

Нанокompозит I / опал получен путём введения наночастиц йода из паров в матрицу опала. Методами спектроскопии брэгговского отражения и эллипсометрии измерены оптические характеристики образца I / опал. Обнаружен рост эффективного показателя преломления нанокompозита I / опал по сравнению с показателем преломления исходной опаловой матрицы.

Ключевые слова: наночастицы йода, матрица опала, нанокompозиты, фотонные кристаллы.

В последние годы интерес многих исследователей вызывают физические свойства нанокompозитов, полученных матричным методом В. Н. Богомолова [1, 2] путём введения наночастиц йода в регулярные пористые диэлектрические матрицы цеолитов [3] и цеолитоподобных алюмофосфатов [4–7]. С другой стороны, формирование устойчивых ансамблей наночастиц йода в пористых опаловых матрицах и изучение физических свойств получаемых при этом нанокompозитов *I / опал* представляет собой более сложную экспериментальную задачу, поскольку размеры полостей в матрицах опалов на 2 порядка превосходят соответствующие значения для пор цеолитов [8, 9]. Это облегчает выход летучего вещества — «гостя» (йода) из полостей опаловой матрицы — «хозяина», что приводит к быстрому разрушению нанокompозиционного материала.

Тем не менее, в настоящей работе удалось получить нанокompозит *I / опал* и исследовать оптические характеристики свежеприготовленного образца методами спектроскопии брэгговского отражения и эллипсометрии. Диспергирование йода в опаловой матрице проводилось посредством ее прогрева в течение 11 часов при температуре 607 К и парциальном давлении паров йода ~ 7 атм. Полученный образец нанокompозита *I / опал* имел неравномерную коричневую окраску, при этом наиболее интенсивно окрашенные области демонстрировали и наибольшие отличия оптических характеристик от соответствующих значений для исходной матрицы опала (до введения в нее йода).

Для экспериментального изучения спектров брэгговского отражения с угловым разрешением исследуемых фотонно-кристаллических структур — образцов исходного опала и нанокompозита *I / опал* — использовалась модернизированная установка [10], в которой источником белого света являлся волоконный осветитель ОВ–12 (производство Санкт-Петербургского оптико-механического объединения), а отраженный свет анализировался спектрометром USB650 Red Tide (Ocean Optics, Inc.). Эллипсометрические измерения [11] проводились с помощью спектроэллипсометра «Эллипс–1891» (производство Института физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск).

Спектральная зависимость эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и нормированные спектры отражения $R(\lambda)$ исходной матрицы опала при различных углах падения света представлены на Рис. 1. Как видно из рисунка, наблюдаются обнаруженная нами [12] корреляция спектров $\Psi(\lambda)$ и $R(\lambda)$, а также сдвиг максимумов в спектрах обоих типов в «синюю» область при увеличении угла падения.

Как видно из сравнения спектров отражения исходной матрицы опала и нанокompозита *I / опал* (Рис. 2), введение наночастиц йода в опал приводит к заметному сдвигу максимумов брэгговского отражения фотонного кристалла в «красную» область при определенных значениях угла падения света ($\theta = 15^\circ$ и $\theta = 30^\circ$). При этом в ряде случаев неравномерность распределения вещества-«гостя» в опале проявляется в том, что в процессе измерения спектров отражения нанокompозита *I / опал* световое пятно на образце частично попадает также и на области, не занятые йодом. В результате спектр $R(\lambda)$ данной фотонно-кристаллической системы оказывается сложным: в нем дополнительно присутствует более слабая полоса, характерная для исходной матрицы опала (Рис. 2).

Как показывает Рис. 3, угловая дисперсия брэгговского резонанса во всех исследованных образцах хорошо описывается известной формулой [9]:

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

Уравнение (1) можно получить, используя законы Брэгга-Вульфа ($2a \cos \beta = k\lambda / n$) и Снеллиуса ($n \sin \beta = \sin \theta$). Здесь θ — угол падения, β — угол преломления света, $a = 0,816D$ — межплоскостное расстояние для плоскостей (111) ГЦК структуры опала, D — диаметр сфер, k — порядок максимума, n — эффективный показатель преломления исследуемого фотонного кристалла.

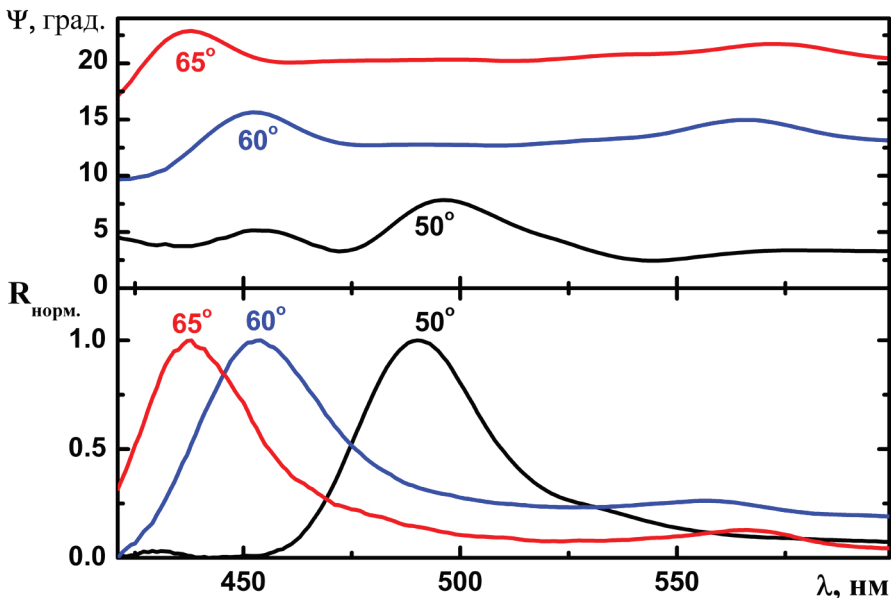


Рис. 1. Спектральная зависимость эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и нормированные спектры отражения $R(\lambda)$ исходной матрицы опала при различных углах падения света

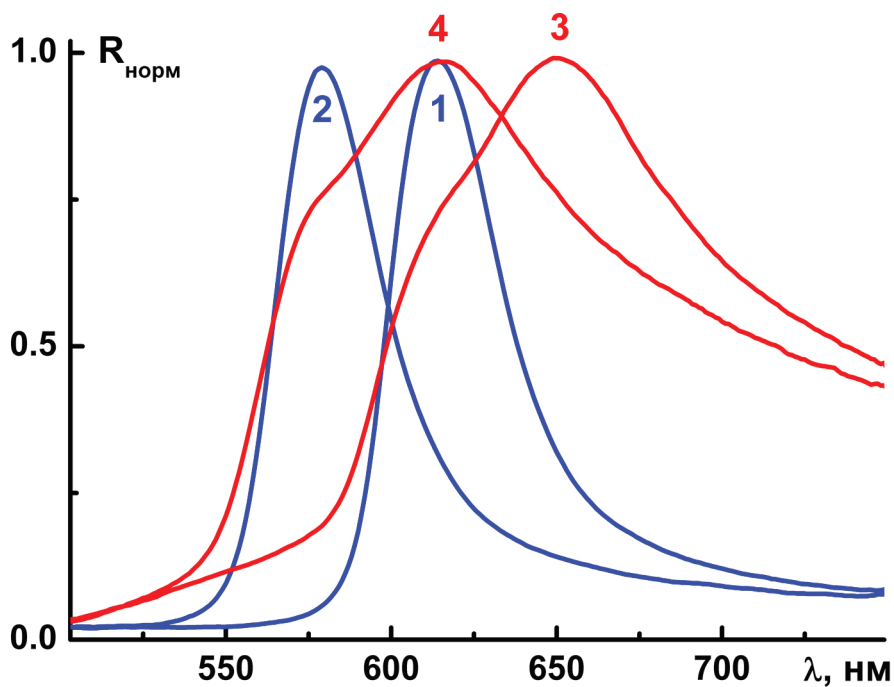


Рис. 2. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 2) и нанокompозита *I / опал* (3, 4) при углах падения света 15° (1, 3) и 30° (2, 4)

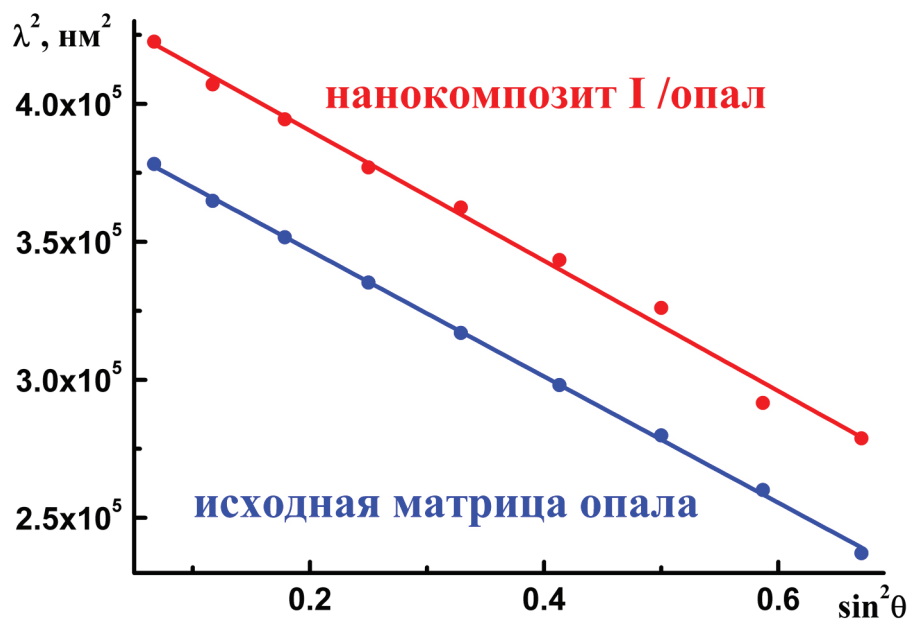


Рис. 3. Угловая дисперсия брэгговского резонанса в исходной матрице опала и в нанокompозите *I / опал*

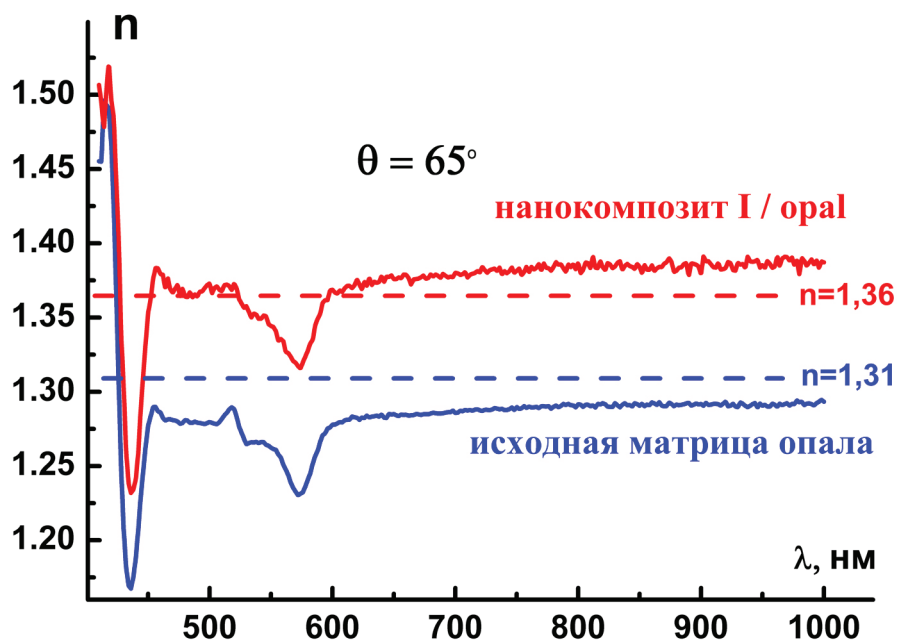


Рис. 4. Спектральные зависимости показателей преломления $n(\lambda)$ исходной матрицы опала и нанокompозита *I/opal*, полученные на основе эллипсометрических данных при угле падения света $\theta = 65^\circ$. Пунктиром показаны эффективные значения показателя преломления, вычисленные на основе спектров брэгговского отражения

Рассчитанные из графиков, изображенных на Рис. 3, по формуле (1) эффективные показатели преломления образцов исходного опала и нанокompозита *I/opal* (пунктирные линии на Рис. 4) коррелируют с соответствующими значениями показателей преломления $n(\lambda)$, полученными на основе эллипсометрических данных, в длинноволновой области спектра [12]. При этом увеличение эффективного показателя преломления нанокompозита *I/opal* по сравнению с образцом исходного опала мы связываем с частичным заполнением полостей матрицы — «хозяина» (опала) наночастицами вещества — «гостя» (йода).

Авторы признательны М. И. Самойловичу (Центральный научно-исследовательский технологический институт «Техномаш», г. Москва) за предоставление образцов опаловых матриц для исследования, С. Г. Романову (Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург) за полезные обсуждения. Работа поддержана АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Богомолов В. Н. Жидкости в ультраотонких каналах (Нитяные и кластерные кристаллы) // Успехи физических наук. 1978. Т. 124. № 1. С. 171–182.
2. Astratov V. N., Bogomolov V. N., Kaplyanskii A. A., Prokofiev A. V., Samoilovich L. A., Samoilovich S. M., Vlasov Yu. A. Optical spectroscopy of opal matrices with *CdS* embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects // *Il Nuovo Cimento*. 1995. V. 17D. P. 1349–1354.

3. Вейсман В. Л., Иванова М. С., Прохоренко М. М., Соловьёв В. Г., Трифонов С. В., Гербрер В. И., Огурцов А. С. Оптические свойства нанокompозитов I/NaA // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». 2013. Вып. 2. С. 189–193.
4. Ye J. T., Tang Z. K., Siu G. G. Optical characterizations of iodine molecular wires formed inside the one-dimensional channels of an $AlPO_4$ -5 single crystal // Applied Physics Letters. 2006. V. 88. P. 073114 (1–3).
5. Ye J. T. Fabrication and optical characterization of nanostructures formed inside zeolite single crystals // PhD Thesis. Hong Kong, 2006. 163 p.
6. Трифонов С. В., Ванин А. И., Вейсман В. Л., Ганго С. Е., Кондратьева М. Н., Соловьёв В. Г. Экспериментальное исследование электрофизических свойств микрообразцов нанокompозитов I/AFI // Нанотехника. 2011. № 2 (26). С. 78–82.
7. Трифонов С. В. Электрофизические свойства матричных нанокompозитов на основе синтетических цеолитоподобных алюмофосфатов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. СПб., 2011. 16 с.
8. Балакирев В. Г., Богомолов В. Н., Журавлёв В. В., Кумзеров Ю. А., Петрановский В. П., Романов С. Г., Самойлович Л. А. Трёхмерные сверхрешетки в матрицах опалов // Кристаллография. 1993. Т. 38. № 3. С. 111–120.
9. Кумзеров Ю. А., Соловьёв В. Г., Ханин С. Д. Физика регулярных матричных композитов и слоистых систем с наноструктурированными неорганическими и органическими веществами. Псков: ПГПУ, 2009. 288 с.
10. Яников М. В., Романов С. Г., Соловьёв В. Г. Изучение оптических свойств фотонных кристаллов и основ наноплазмоники в университетском курсе физики // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». 2013. Вып. 2. С. 205–213.
11. Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Михайлов Н. Н. Эллипсометрия — прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 3. С. 72–84.
12. Alekseeva N., Cema G., Lukin A., Pan'kova S., Romanov S., Solovyev V., Veisman V., Yanikov M. Experimental investigation of self-assembled opal structures by atomic force microscopy, spectroscopic ellipsometry and reflectometry // Journal of Self-Assembly & Molecular Electronics. 2013. V. 1. No. 2. P. 209–222.

M. Yanikov, V. Veisman, A. Gonyan, V. Solovyev, G. Cema

PREPARATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO OPTICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED IODIDE IN OPAL POROUS MATRIX

Opal-based nanocomposite with iodide nanoparticles (I / opal) prepared by vapour phase adsorption technology has been investigated. Sample optical characteristics have been measured by Bragg reflectance spectroscopy and ellipsometry techniques. The results showed enhanced effective refractive index value of I / opal nanocomposite, when compared with that of initial opal matrix.

Key words: *iodide nanoparticles, opal matrix, nanocomposites, photonic crystals.*