

Рисунок 3 – Кулисный механизм

$$\sum^3 m_C = 0 \rightarrow F_{03}^n, \sum^{2-3} m_B = 0 \rightarrow F_{03}^r, \sum^{1-2-3} m_A = 0 \rightarrow M_y,$$

$$\sum^1 m_B = 0 \rightarrow F_{01}^r, \sum^{1-2-3} m_D = 0 \rightarrow F_{01}^n, \sum^1 m_A = 0 \rightarrow F_{21}^r,$$

$$\sum^3 Y_3 = 0 \rightarrow F_{23}, \sum^3 m_C = 0 \rightarrow e, \sum^1 X_1 = 0 \rightarrow F_{21}^n.$$

УДК 539.216:535.3

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО ВВЕДЕНИЕМ СЕРЕБРА В ПОРИСТУЮ МАТРИЦУ ОПАЛА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕРМОДИФФУЗИИ

Цветков А.В., студ., Соловьев В.Г., проф., Яников М.В., ст. преп.

Псковский государственный университет, г. Псков, Российская Федерация

**Реферат.** В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования оптических свойств нового нанокomпозиционного материала Ag / опал, полученного путем введения серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии при различных условиях.

**Ключевые слова:** матричные нанокomпозиционные материалы, электротермодиффузия, опалы, фотонные кристаллы, брэгговское отражение, резонанс Фано.

На протяжении последних десятилетий большой интерес вызывают физические свойства

наноконпозитов, полученных методом В.Н. Богомолова [1, 2] – диспергированием различных веществ в регулярной системе пористых диэлектрических матриц (цеолитов, опалов и др.).

Гранецентрированная кубическая структура опала [3] построена из плотно упакованных сфер субмикронных размеров (рис. 1) и выступает как трехмерная дифракционная решетка для видимого света. Благодаря этому опалы рассматривают как фотонные кристаллы (ФК) [4-9], способные управлять потоком электромагнитного излучения. В последние годы выделился особый класс гибридных металлодиэлектрических плазмонно-фотонных кристаллов [10] на основе опалов, перенос света в которых определяется совместно действующими дифракционными и плазмонными резонансными транспортными механизмами.

Нами проведено экспериментальное исследование фотонно-кристаллических свойств нового наноконпозиционного материала Ag / опал, полученного путем введения серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии при различных условиях.

Сравнение спектров отражения исходной матрицы опала и наноконпозита Ag / опал (рис. 2) показывает, что введение серебра в опаловую матрицу приводит к заметному сдвигу максимумов брэгговского отражения ФК в «красную» область при фиксированных значениях угла падения света. Подобное «красное» смещение максимумов в спектрах отражения по сравнению с соответствующими спектрами отражения исходной матрицы, обусловленное ростом эффективного показателя преломления композита при диспергировании вещества-«гостя» в полостях матрицы-«хозяина», наблюдалось ранее при введении многих веществ в опаловые матрицы. Как видно из рис. 2 и 3, наблюдается также «синий» сдвиг максимумов в спектрах обоих типов при увеличении угла падения, обусловленный брэгговской дисперсией.

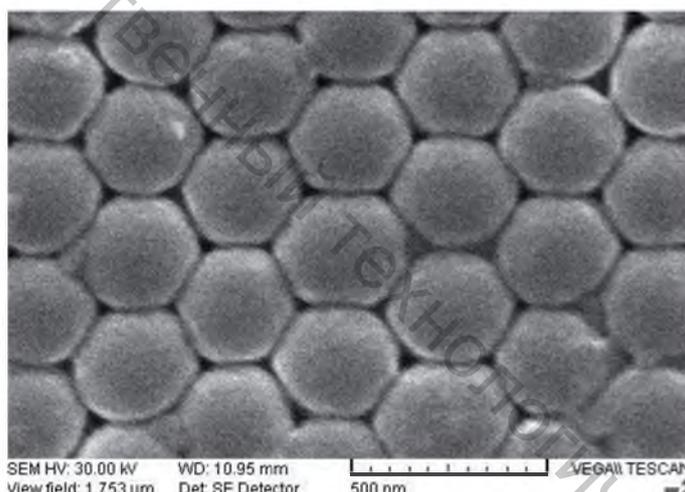


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение упаковки сфер из  $SiO_2$  в матрице опала [11].

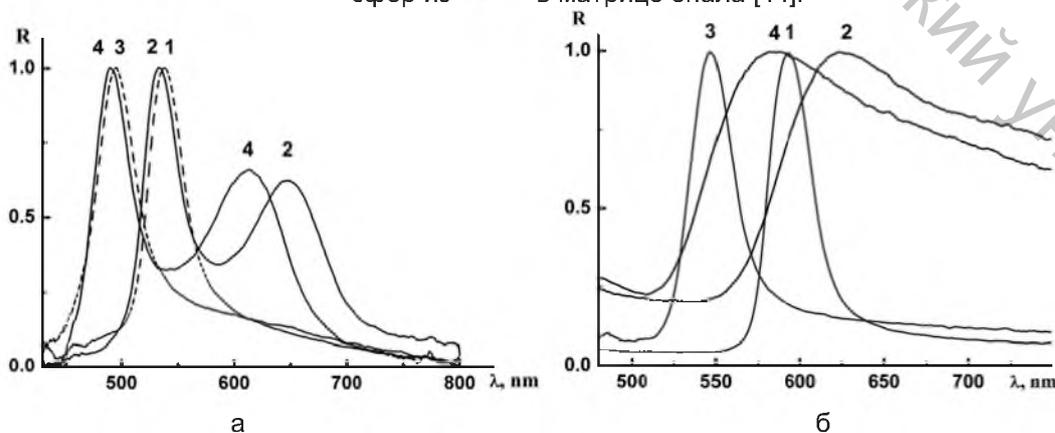


Рисунок 2 – Спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и наноконпозита Ag / опал (2, 4) при углах падения света 15° (1, 2) и 35° (3, 4). Условия введения серебра в опаловые матрицы:

а)  $t = 4$  ч,  $E = 1,1$  кВ/см,  $T = 707$  К; б)  $t = 2,5$  ч,  $E = 1,7$  кВ/см,  $T = 664$  К.

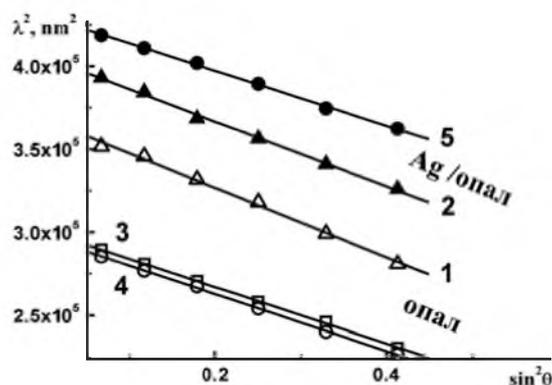


Рисунок 3 – Угловая дисперсия брэгговского резонанса первого порядка для исходных опаловых матриц с диаметрами глобул 288 нм (1), 251 нм (3, 4) и нанокompозитов Ag / опал, полученных введением серебра в матрицу опала методом электротермомодиффузии при напряженности электрического поля 1,7 кВ/см (2) и 1,1 кВ/см (5).

Как видно из рисунка 2, форма спектров отражения нанокompозита Ag / опал существенно зависит от условий введения серебра в опаловую матрицу. При небольшой напряженности электрического поля  $E$  плотность тока, протекающего через образец с прижимными серебряными электродами, почти не меняет своего значения ( $j \approx 2,5 \text{ мкА/см}^2$ ) на протяжении опыта. В этом случае в спектрах отражения нанокompозита Ag / опал наряду с полосой исходной опаловой матрицы возникает более слабая длинноволновая полоса (рис. 2 – а), связанная, по-видимому, с появлением наночастиц серебра на поверхности опаловых глобул. С другой стороны, при достаточно большой

величине  $E$ , когда плотность тока в процессе электролиза возрастает от  $j_1 = 2,6 \text{ мкА/см}^2$

до  $j_2 = 1,3 \text{ мА/см}^2$ , в образце возможно образование дендритов, рассеяние света на которых может приводить к образованию несимметричных полос в спектрах отражения нанокompозита Ag / опал (рис. 2 – б). В работах [11-14] этот эффект объясняется созданием условий для наблюдения резонанса Фано [15].

Таким образом, оптические свойства нанокompозита Ag / опал, полученного методом электротермомодиффузии, существенно зависят от условий введения серебра в матрицу опала.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (НИР № 576 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/700 за 2014 год).

#### Список использованных источников

1. Богомолов В.Н. Жидкости в ультратонких 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 // II Nuovo Cimento. 1995. V. 17D. No. 11-12. P. 1349-1354.
3. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. Трехмерные сверхрешетки в матрицах опалов // Кристаллография. 1993. Т. 38. № 3. С. 111-120.
4. Sakoda K. Optical Properties of Photonic Crystals. Springer, 2001. 223 p.
5. Photonic crystals: Advances in design, fabrication, and characterization / Ed. by K. Busch, S. Lölkes, R.B. Wehrspohn, and H. Föll. Wiley-VCH, 2004. 354 p.
6. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic crystals – molding the flow of light. Princeton University press, 2008. 286 p.
7. Быков В.П. Спонтанное излучение в периодической структуре // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 2. С. 505-513.
8. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. No. 20. P. 2059-2062.
9. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys.

- Rev. Lett. 1987. V. 58. No. 23. P. 2486 -2489.
10. Romanov S.G., Korovin A.V., Regensburger A., Peschel U. Hybrid colloidal plasmonic-photonic crystals // *Advanced Materials*. 2011. V. 23. P. 2515-2533.
11. Яников М.В., Вейсман В.Л., Гонян А.А., Лукин А.Е., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Гербредер В.И., Огурцов А.С. Экспериментальное исследование физических свойств наночастиц серебра, введенных методом электротермодиффузии в пористую матрицу опала // *Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки»*. 2014. Выпуск 5. С. 196-201.
12. Яников М.В., Вейсман В.Л., Романов С.Г., Соловьев В.Г. Экспериментальное изучение резонанса Фано в университетском курсе физики // *Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов*. Выпуск 25. М.: ИСМО РАО, 2015. С. 96-98.
13. Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyeu V.G., Yanikov M.V. Optical properties of nanostructured silver, embedded by electro-thermo-diffusion in opal photonic crystal // *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. – Rezekne, Latvia, 2015. Vol. 1. P. 230-231.
14. Вейсман В.Л., Лобарев Д.С., Пучков Н.И., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Яников М.В. Наблюдение резонанса Фано в наносистеме Ag/опал // *Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки»*. 2015. Выпуск 6. С. 106-113.
15. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts // *Physical Review*. 1961. V. 124. P. 1866-1878.

УДК 534.321.9: 621.762.4

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

**Асветимская Е.В.<sup>1</sup>, студ., Рубаник О.Е.<sup>1</sup>, ст. преп.,  
Шилин А.Д.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доц., Шилина М.В.<sup>2</sup>, к.б.н., доц.,  
Пушкарёв А.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., Радюш Ю.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., доц.,  
Чернов П.А.<sup>4</sup>, инж.**

<sup>1</sup>*Витебский государственный технологический университет,*

<sup>2</sup>*Витебский государственный университет им. П.М. Машерова,*

<sup>3</sup>*ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,*

<sup>4</sup>*ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассматривается применение ультразвуковых колебаний к получению материалов с магнитоэлектрическими свойствами.

Ключевые слова: сегнетомагнетики, перовскит, ультразвук.

Материалы, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств – сегнетомагнетики, привлекают интерес исследования в связи с возможностью управления их взаимными свойствами с помощью электрических и магнитных полей. Это прогнозируется в перспективе использованием их в многочисленных практических приложениях и разработке на их основе новых многофункциональных электронных устройств.

Перспективами практического использования сегнетомагнитных материалов предполагается спиновая электроника [1,2], фотоника [3-5], медицина [6], информационные и энергосберегающие технологии. На основе сегнетомагнетиков можно создавать магнитные сенсоры, емкостные электромагниты, элементы магнитной памяти, невзаимные СВЧ фильтры и другие устройства, не предполагающие протекания постоянных электрических токов и сопряженных с ними тепловых потерь. Некоторые из них, например сенсоры, уже нашли практическое применение.

Такой широкий спектр возможного использования магнитоэлектриков показывает перспективность их практического получения с использованием новых технологий, таких как применение высоких давлений и ультразвуковых колебаний, исследования свойств получаемых материалов. Данные исследования в настоящее время носят лабораторный характер, но уже в настоящее время являются прорывными и привели к значительному прогрессу в понимании фундаментальной природы магнитоэлектрических взаимодействий, хотя находятся в стадии становления.