

В. Л. Вейсман, Д. С. Лобарёв, Н. И. Пучков,  
С. Г. Романов, В. Г. Соловьёв, М. В. Яников

## НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСА ФАНО В НАНОСИСТЕМЕ Ag / ОПАЛ

Проведена математическая обработка экспериментальных данных, полученных ранее в ходе исследования оптических свойств нового нанокomпозиционного материала Ag / опал. Приведены аргументы в пользу интерпретации наблюдаемых оптических спектров на основе резонанса Фано между электромагнитными волнами, испытывающими брэгговское отражение и рассеяние дендритной фрактальной структурой.

**Ключевые слова:** резонанс Фано, фотонные кристаллы, брэгговское отражение, рассеяние света, матричные нанокomпозиты на основе опалов.

### Введение

В работах [1–3] проведено экспериментальное исследование оптических свойств нового нанокomпозиционного материала Ag / опал, полученного путем введения серебра в матрицу опала методом электротермомодиффузии. При этом обнаружена асимметричная форма широких полос в спектрах брэгговского отражения нанокomпозита Ag / опал, резко отличающихся от соответствующих симметричных кривых исходной опаловой матрицы (рис. 1 [1]). Подобный профиль, характерный для резонанса Фано [4–6], теоретически описывается формулой

$$I(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon + q)^2}{(\varepsilon^2 + 1)(q^2 + 1)}, \quad (1)$$

где  $I(\varepsilon)$  — приведенная (нормированная) энергия (или частота) ЭМ волны,  $q$  — феноменологический параметр асимметрии формы линии, определяющий отношение вероятностей перехода в дискретное состояние и в непрерывный континуум. График нормированной функции (1) при  $q = 2$  представлен на рис. 2.

Как известно, резонанс Фано возникает вследствие деструктивной интерференции двух колебательных процессов. Авторы работ [1–3] предположили, что в данном случае в этой роли выступает брэгговский дифракционный резонанс в фотонном кристалле на фоне широкополосного электромагнитного излучения, рассеянного дендритной фрактальной структурой нанокomпозита Ag / опал.

В настоящей работе предложен метод математической обработки полученных экспериментально спектров отражения с целью более точного определения параметра  $q$ , что позволило подтвердить указанное предположение о роли нерезонансного рассеяния света в наблюдаемом эффекте.

### Определение параметра $q$ из экспериментальных оптических спектров

Функция  $I(\varepsilon)$  (1) имеет в общем случае два экстремума, что подтверждает ее график (рис. 2). Положение экстремумов — в точках  $A(-q, 0)$  и  $B(1/q, 1)$  — определяется стандартными методами математического анализа. Отметим, что в случаях, когда  $q = 0$  или  $q \rightarrow \infty$ , функция (1) имеет лишь один экстремум при  $\varepsilon = 0$  (графики функции  $I(\varepsilon)$  при различных значениях параметра  $q$  представлены на рис. 3).

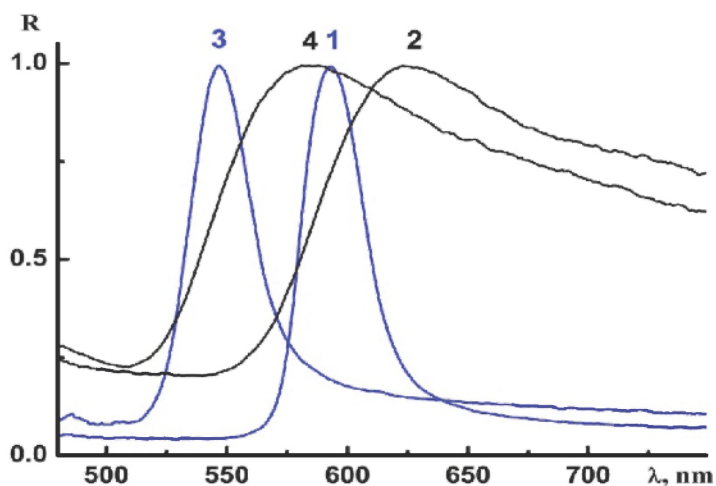


Рис. 1 [1]. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и нанокompозита *Ag/opal* (2, 4) при углах падения света  $15^\circ$  (1, 2) и  $35^\circ$  (3, 4)

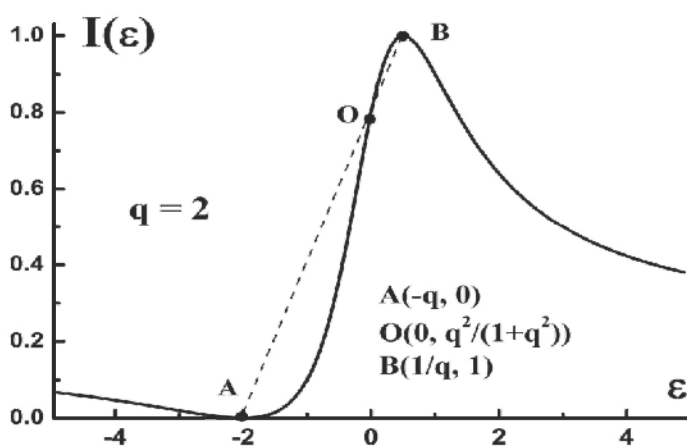


Рис. 2. График функции  $I(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon + q)^2}{(\varepsilon^2 + 1)(q^2 + 1)}$ , описывающей резонанс Фано

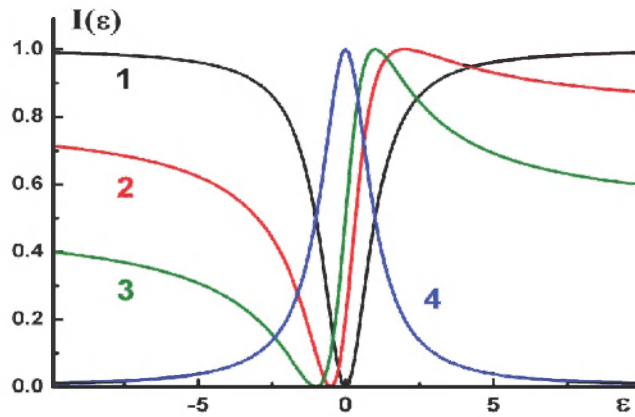


Рис. 3. Нормированные резонансные профили, построенные по формуле Фано (1) при  $q_1 = 0$ ,  $q_2 = 0.5$ ,  $q_3 = 1$ ,  $q_4 \rightarrow \infty$ .

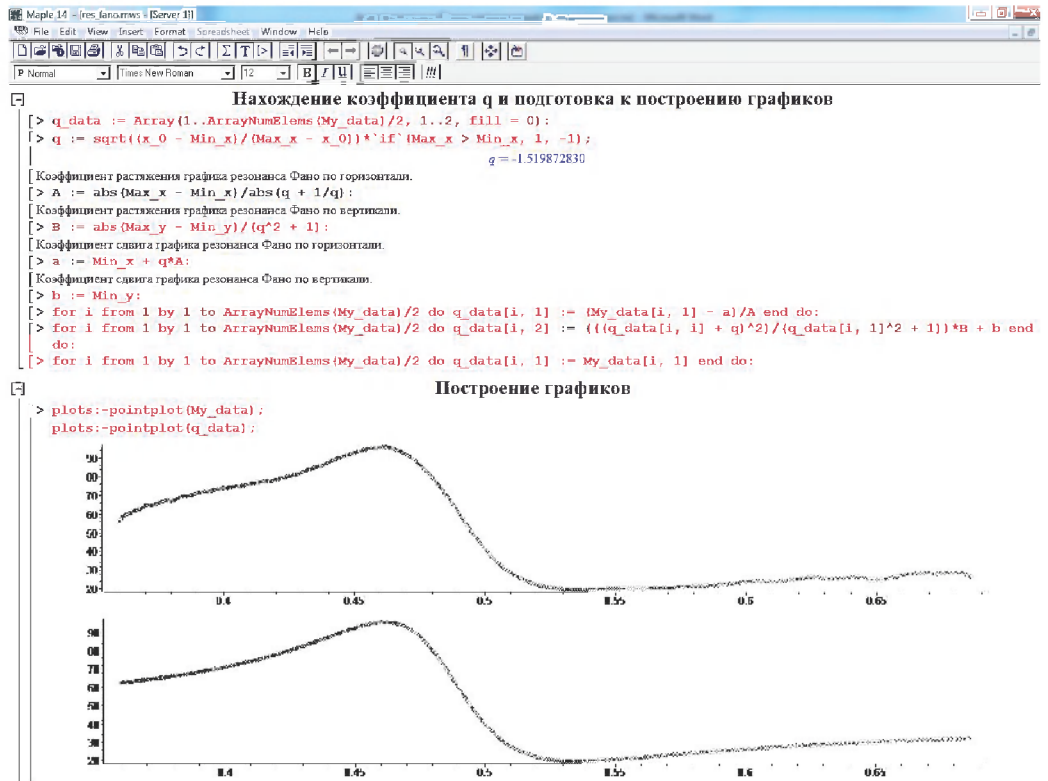


Рис. 4. Часть окна программы Maple 14 с полученными результатами

Зная координаты точек А и В (рис. 2), легко показать, что прямая АВ пересе-

кает график функции  $I(\varepsilon)$  в точке  $O\left(0, \frac{q^2}{1+q^2}\right)$ . При этом важно подчеркнуть, что отношение  $\frac{AO}{OB} = q^2$  сохраняется неизменным независимо от выбора системы координат, в которой изображается резонансный профиль Фано. Это обстоятельство и положено в основу предлагаемого нами алгоритма определения величины  $q$  из экспериментальных оптических спектров, который состоит из следующих шагов:

1. Сглаживание экспериментального оптического спектра отражения  $R(\varepsilon)$ . При этом в качестве независимой переменной  $\varepsilon$  удобно выбрать отношение  $D/\lambda$ , где  $D$  — диаметр сфер опала.

2. Определение координат точек  $A(\varepsilon_A, R_A)$  и  $B(\varepsilon_B, R_B)$ , в которых экспериментально найденная зависимость  $R(\varepsilon)$  достигает минимума и максимума соответственно.

3. Составление уравнения прямой АВ:

$$R = k\varepsilon + b, \quad (2)$$

где  $k = \frac{R_B - R_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A}$ ,  $b = \frac{\varepsilon_B R_A - \varepsilon_A R_B}{\varepsilon_B - \varepsilon_A}$ .

4. Определение координат точки пересечения графика  $R(\varepsilon)$  с прямой (2):  $O(\varepsilon_O, R_O)$ .

5. Вычисление феноменологического параметра асимметрии формы линии по формуле:

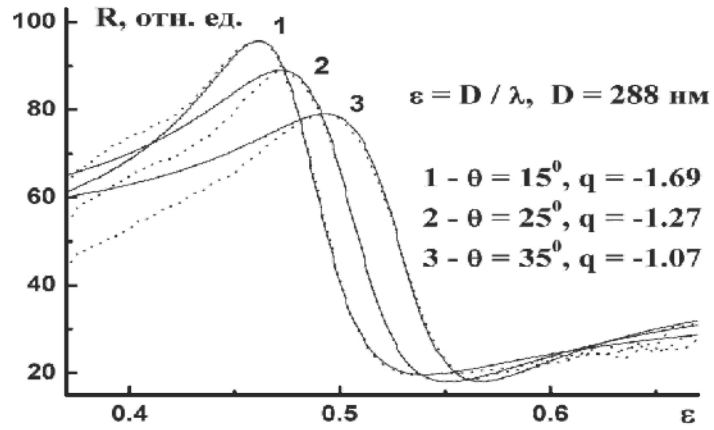
$$q = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon_O - \varepsilon_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_O}}. \quad (3)$$

При этом параметр  $q$  будет положительным, если  $\varepsilon_B > \varepsilon_A$ , и отрицательным, если  $\varepsilon_B < \varepsilon_A$ .

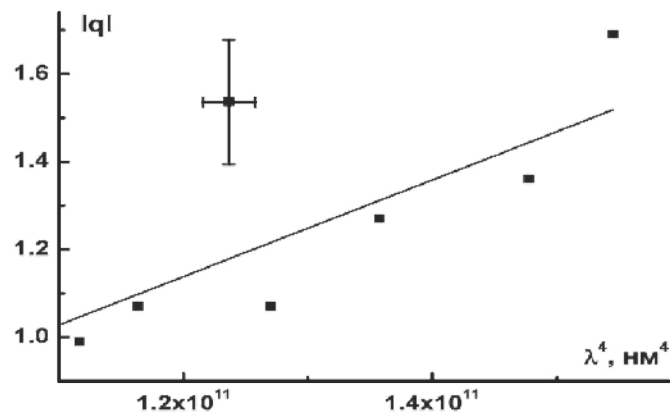
6. Проверка согласия теоретически ожидаемой зависимости с результатами эксперимента. Изменение масштабов по осям с целью совмещения экстремумов функций  $I(\varepsilon)$  и  $R(\varepsilon)$ , построение их графиков.

Для реализации этого алгоритма нами была разработана IBM PC совместимая компьютерная программа в системе Maple 14 (рис. 4). Программа осуществляет поиск коэффициента  $q$  на основе массива экспериментальных данных, которые вводятся путём экспорта листа таблицы Microsoft Office Excel. Находятся три точки (А, В, О), дающие возможность однозначно определить значение параметра  $q$  в уравнении (1). Вычисляется коэффициент  $q$ . Производятся преобразования получившегося графика  $I(\varepsilon)$  для сравнения с экспериментальными данными. В итоге строятся два графика — график экспериментальных данных  $R(\varepsilon)$  и график функции  $I(\varepsilon)$ , аппроксимирующей экспериментальные данные. Программа, работающая с операционными системами MS Windows и Linux, состоит из трёх блоков:

1. Импорт данных и подготовка к нахождению параметра  $q$ . Нахождение положения трёх точек, необходимых для определения коэффициента  $q$ .
2. Нахождение параметра  $q$  и подготовка к построению графиков. Создание массива значений, вычисленных по формуле (1), описывающей резонанс Фано.
3. Построение графиков.



**Рис. 5.** Нормированные экспериментальные оптические спектры отражения нанокompозита *Ag / opal* (пунктир) и соответствующие резонансные профили, построенные по формуле Фано (сплошные линии), при различных углах падения света  $\theta$



**Рис. 6.** Зависимость модуля феноменологического параметра асимметрии формы линии от длины волны, на которую приходится максимум брэгговского отражения (коэффициент корреляции прямой, проведенной через точки на графике,  $r = 0,85$ )

### Обсуждение результатов

Как показывает рис. 5, предлагаемый метод позволяет достичь вполне удовлетворительного согласия теории с экспериментом (во всяком случае, вблизи резонансной частоты).

Из рисунка 5 видно также, что модуль феноменологического параметра асимметрии формы линии  $|q|$  уменьшается с ростом угла падения света  $\theta$ , т. е. с уменьшением длины волны  $\lambda$ , на которую приходится максимум брэгговского отражения. Величина  $|q|$ , обратно пропорциональная вероятности перехода в непрерывный континуум, должна уменьшаться с ростом интенсивности рассеянного света, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна четвертой степени длины волны  $\lambda$  в соответствии с формулой Рэлея [7, 8]. Таким образом, в этом приближении следует ожидать зависимости вида  $|q| \approx const \cdot \lambda^4$ . Полученные нами результаты с учетом ошибок измерений в целом согласуются с этой моделью (рис. 6).

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).

### Литература

1. Яников М. В., Вейсман В. Л., Гонян А. А., Лукин А. Е., Романов С. Г., Соловьёв В. Г., Гербрер 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. Вып. 5. С. 196–201.
2. Veisman V. L., Romanov S. G., Solovyev 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 10<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 2015. Vol. 1. P. 230–231.
3. Яников М. В., Вейсман В. Л., Романов С. Г., Соловьёв В. Г. Экспериментальное изучение резонанса Фано в университетском курсе физики // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Вып. 25. М.: ИСМО РАО, 2015. С. 96–98.
4. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts // Physical Review. 1961. V. 124. P. 1866–1878.
5. Miroshnichenko A. E., Flach S., Kivshar Yu. S. Fano resonances in nanoscale structures // Reviews of Modern Physics. 2010. V. 82. No. 3. P. 2257–2298.
6. Rybin M. V., Khanikaev A. B., Inoue M., Samusev K. B., Steel M. J., Yushin G., Limonov M. F. Fano Resonance between Mie and Bragg Scattering in Photonic Crystals // Physical Review Letters. 2009. V. 103. P. 023901 (1–4).
7. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966. 552 с., С. 273.
8. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с. С. 581.

### Об авторах

**Вейсман Виктор Львович** — доцент кафедры физики, физико-математический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

**Лобарёв Дмитрий Сергеевич** — старший преподаватель кафедры алгебры и геометрии, физико-математический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: lds1979@mail.ru

**Пучков Николай Игоревич** — студент 1 курса физико-математического факультета, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: muxanin@mail.ru

**Романов Сергей Геннадьевич** — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория физики анизотропных материалов, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; Институт технологии частиц, университет Эрланген-Нюрнберг, Германия.

E-mail: sergei.romanov@mpl.mpg.de

**Соловьёв Владимир Гаевич** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, физико-математический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: solovyev\_v55@mail.ru

**Яников Михаил Владимирович** — старший преподаватель кафедры физики, физико-математический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: losthighway@mail.ru

*V. Veisman*, *D. Lobaryov*, *N. Puchkov*,  
*S. G. Romanov*, *V. Solovyev*, *M. Yanikov*

## OBSERVATION OF THE FANO RESONANCE IN THE Ag / OPAL NANOSYSTEM

*In the paper we carry out the mathematical procession of the experimental data, which has been previously obtained during the research of the optical properties of the new nanocomposite material Ag / opal. We give the arguments in favour of the interpretation of the observed optical spectra based on the Fano resonance between the electromagnetic waves, which have undergone Bragg reflection and dispersion by silver dendrite fractal structure.*

**Key words:** *Fano resonance, photonic crystals, Bragg reflectance, light dispersion, opal based matrix nanocomposites.*

### About the authors

**Victor Veisman**, Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Physics and Mathematics, Pskov State University, Russia

**Dmitry Lobaryov**, Senior lecturer, Department of Algebra and Geometry, Faculty of Physics and Mathematics, Pskov State University, Russia

E-mail: lds1979@mail.ru

**Nikolai Puchkov**, first-year student, Faculty of Physics and Mathematics, Pskov State University, Russia

E-mail: muxanin@mail.ru

Dr. Sci. **Sergei G. Romanov**, Research professor, Laboratory of anisotropic materials, Ioffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia; Institute of Particle Technology, University of Erlangen-Nuremberg, Germany

E-mail: sergei.romanov@mpl.mpg.de

Prof. Dr. Sci. **Vladimir Solovyev**, Head of the Department of Physics, Faculty of Physics and Mathematics, Pskov State University, Russia

E-mail: solovyev\_v55@mail.ru

**Mikhail Yanikov**, Senior lecturer, Department of Physics, Faculty of Physics and Mathematics, Pskov State University, Russia

E-mail: losthighway@mail.ru