

**Зависимости резонансного отражения  $\Delta r$  от интенсивности приложенного поля  $I_0$  (а), ширины гистерезисной петли  $\Delta I_0$  (б) и размера гистерезисного скачка в отражении  $\delta r$  (в) от отстройки резонанса:  $\kappa = 1.5$  (кривая 1), 2.0 (2), 2.5 (3),  $\Delta = -1.0$  (а),  $\kappa = 2.0$  (1), 2.2 (2), 2.5 (3) (б, в),  $\gamma = 2.0$ ,  $\beta = 0.05$**

Судя по дисперсионным кривым на рисунках (б, в), размер гистерезисной петли (расстояние между точками поворота бистабильной зависимости) и величина скачка отражения при переключении имеют оптимумы на шкале линейной отстройки резонанса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низкоразмерные суперкристаллы с резонансной нелинейностью и возможностью стимулированного ею проявления гистерезисных переключений отклика представляют, таким образом, объект нанофотоники, перспективный для использования в компактных схемах управления излучением.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Krasnok, A. Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics / A. Krasnok, M. Tymchenko, A. Alù // *Materials Today*. – 2018. – Vol. 21, No 1. – P. 8–21
2. Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment / W.H. Evers [et al.] // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13, No 6. – P. 2317–2323.
3. Mak, K.F. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides / K.F. Mak, J. Shan // *Nature Photonics*. – 2016. – Vol. 10. – P. 216–226.
4. Timoshchenko, E.V. Resonance reflection of light by a thin layer of a dense nonlinear medium / E.V. Timoshchenko, V.A. Yurevich, Yu.V. Yurevich // *Technical Physics*. – 2013. – Vol. 58. – P. 251–254.

## СВТОМОДУЛЯЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ОТРАЖЕНИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАНАРНЫМ СУПЕРКРИСТАЛЛОМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

**Е. В. Тимощенко<sup>1</sup>, В. А. Юревич<sup>2</sup>, Ю. В. Юревич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>) МГУ имени А.А. Кулешова, ул. Космонавтов, 1, 212022 Могилев, Беларусь,  
e-mail: timoshchenko@msu.by

<sup>2</sup>) БГУ пищевых и химических технологий, пр. Шмидта, 3, 212027 Могилев, Беларусь,  
e-mail: va\_yurevich@mail.ru

Представлены результаты моделирования динамического взаимодействия света с планарными суперкристаллами, позволяющие предсказать возможность регулярных режимов в отражении.

**Ключевые слова:** суперкристаллы квантовых точек; метаповерхности; резонансная нелинейность; самопульсации в излучении.

# LIGHT MODULATION EFFECT IN THE REFLECTION OF COHERENT RADIATION BY PLANAR SUPERCRYSTAL OF QUANTUM DOTS

E. V. Timoshchenko<sup>1</sup>, V. A. Yurevich<sup>2</sup>, Yu.V. Yurevich<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>) A.Kuleshov State University, Cosmonautov str., 1, 212022 Mogilev, Belarus,

<sup>2</sup>) Belarussian State University of Food and Chem. Technologies, Schmidt av., 3, 212027 Mogilev, Belarus

Corresponding author: E. V. Timoshchenko (timoshchenko@msu.by)

The results of modeling the dynamic interaction of light with planar supercrystals are presented, which make it possible to predict the possibility of light radiation regular regimes in reflection.

**Key words:** quantum dot supercrystals; metasurfaces; resonant nonlinearity; self-pulsations in radiation.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие нанотехнологий позволило создавать так называемые метаматериалы (объекты с оптическими свойствами, отсутствующими у составляющих их материалов), среди которых структуры из активных центров с относительно высокой концентрацией, их именуют суперкристаллами (СК) квантовых точек. В планарном исполнении с наноразмерным форматом СК образуют так называемые метаповерхности, то есть оптические объекты, способные эффективно изменять фазу действующего светового поля [1]. Характерно также, что вещество СК чаще всего полупроводники с квантоворазмерными эффектами. Эффективностью особых свойств нелинейной реакции СК в зависимости от сочетания параметров объясняют многообразие динамических режимов резонансного отражения [2], и его изучение целесообразно для обоснования применений метаповерхностей в качестве компактных модулирующих элементов нанопотоники.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе, положенной в основу сообщения, поставлена задача оценки проявления следствий бистабильности в материальном отклике наноразмерного массива СК на динамику отражённого светового поля, и оригинальность работы представлена учетом фазовой нелинейности. Ее факторами выступают диполь-дипольное взаимодействие и нелинейная рефракция, непосредственно зависящая от плотности активных центров, развивающиеся в условиях резонансного поглощения. Бистабильность в отражении или пропускании СК представляет высшее проявление нелинейности отклика оптической системы, развивающееся в условиях действия ряда механизмов нелинейности.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЗОНАНСНОГО ОТРАЖЕНИЯ

Анализ нелинейной динамики в низкоразмерном массиве СК проводится в рамках обоснованных в [3] кинетических уравнений для напряжённости полей и переменных отклика – комплексной вероятности поляризованности  $\rho$  и разности населённостей уровней резонансного перехода  $n$ . Наряду с модификацией оптических уравне-

ний Блоха использовано приближение сверхтонкого слоя, предусматривающее учёт дополнительных к френелевым сверхизлучательных компонентов в граничных условиях для полей (отражённого –  $e(\tau)$  и действующего на активные центры –  $e'(\tau)$ )

$$e'(\tau) = t_0 e_i - \kappa \left[ \sqrt{\tau_1/\tau_2} \rho - i\beta(1-n)e'(\tau) \right] (1-i\gamma), \quad e(\tau) = -r_0 e_i - \kappa \left[ \sqrt{\tau_1/\tau_2} \rho - i\beta(1-n)e'(\tau) \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \sqrt{\tau_2/\tau_1} n e' - (1-i\Delta)\rho, \quad \frac{\tau_1}{\tau_2} \frac{dn}{d\tau} = 1-n - \frac{\sqrt{\tau_2/\tau_1}}{2} (\rho^* e' + \rho e'^*)$$

Здесь  $e_i(\tau)$  – напряжённость инициирующего (нормально падающего извне) поля,  $\kappa$  – показатель резонансного поглощения слоя суперкристалла,  $\beta$  – показатель резонансной нелинейной рефракции,  $\gamma$  – нормирующий коэффициент в локальной поправке Лоренца,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – характерные времена продольной и поперечной (фазовой) релаксации,  $\Delta = (\omega - \omega_0)\tau_2$  – нормированная по спектральной ширине резонанса ( $2/\tau_2$ ) отстройка частоты  $\omega$  от центра линии поглощения  $\omega_0$ ,  $t_0$  и  $r_0$  – френелевы (нерезонансные) значения пропускательной и отражательной способностей метаповерхности.

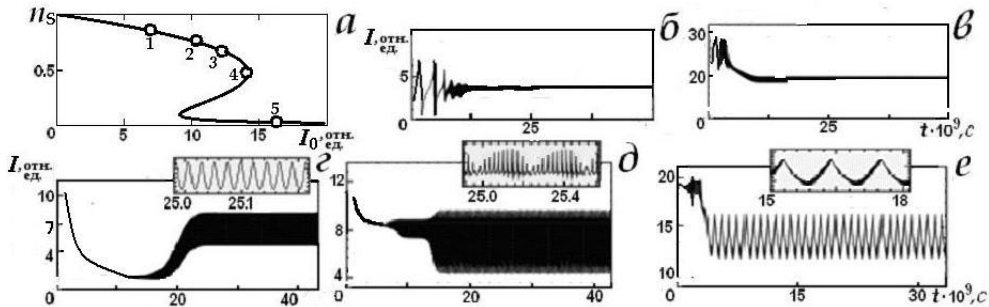
Равновесные состояния кинетической модели (1) определяются нелинейными соотношениями, неявно связывающими при условии  $e_i(\tau) = e_0$  стационарные значения переменных  $\rho_S$  и  $n_S$  с величинами материальных характеристик (1) и нормированной «входной» интенсивностью  $I_0$ :

$$\rho_S^2 + n_S^2 = n_s, \quad I_0 = (t_0 e_0)^2 = \frac{1 - n_s}{N} \left[ (1 + \kappa N)^2 + (\Delta + \kappa P N)^2 \right], \quad (2)$$

$$B = \beta \kappa (1 - n_s), \quad N = n_s / [1 - 2\gamma B + (1 + \gamma^2) B^2], \quad P = \gamma - (1 + \gamma^2) B.$$

Расчёты для временных разверток  $I(t) = |e(t)|^2$  и зависимостей  $n_S(I_0)$  проводились для параметров (1), (2), перекрывающихся с их значениями, известными из литературы (например, в соответствии с [2]). Мощность насыщения поглощения, определяющая величины  $I_0$ , по порядку соответствовала примерно  $10^4 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> для диапазона длин волн  $\sim (1.25 \dots 1.30) \cdot 10^{-6}$  м.

Зависимость  $n_S$  от интенсивности  $I_0$ , судя по расчетам (2), может быть выражено нелинейной и бистабильной – кривые  $n_S(I_0)$  могут иметь области неоднозначности, типичная зависимость приведена на рис. 1, а.



Бистабильная кривая зависимости равновесного значения вероятности населённости от нормированной интенсивности инициирующего излучения (а) и временная зависимость интенсивности отражённого излучения для разного уровня возбуждения (б–е).

Развёртки на фрагментах б, в соответствуют уровням, отмеченным цифрами 1 и 5 на бистабильной кривой рис. а, картина модуляции на фрагментах (д–е) — уровням 2–4:  $\kappa = 2.0$ ,  $\Delta = -1.0$  (а),  $\gamma = 2.0$ ,  $\beta = 0.08$ ,  $\tau_1 = 1.0 \cdot 10^{-9}$  с,  $\tau_2 = 2.0 \cdot 10^{-12}$  с,  $r_0 = 0.55$

В изменении  $n_s$  при циклическом изменении интенсивности зондирующего поля оказываются возможными «кинки», то есть, резкие, с гистерезисным свойством переключения.

Формирование регулярного режима с осцилляциями в пикосекундном диапазоне должно происходить, если отслеживать по результатам моделирования, только в зоне бистабильности равновесных состояний. За пределами этой зоны неустойчивости переход к равновесному состоянию носит чисто релаксирующий характер (рис. 1, б, в) – затухание после переходного ряда всплесков интенсивности приводит к «выходу» системы дипольных излучателей, образующих СК, на квазистационарный режим. На «нестабильных» развёртках (рис. 1, г – е), соответствующих возбуждению из области бистабильности, развиваются и принимают регулярный характер высокочастотные осцилляции. При наложении на релаксационные колебания (из-за различия характерных времён спонтанного изменения населённости и поляризованности) самодерживающиеся пульсации  $I(t)$  способны принимать сложную форму (рис. 1, д). Возникновение регулярного или квазирегулярного режима в отражении тонким слоем СК объясняется колебаниями фазовой отстройки поляризованности и поля, вызванных смещением резонанса в условиях влияния ближних полей диполей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Quantum metasurfaces with atom arrays / R. Bekenstein [et al.] // Nature Physics.– 2020. Vol. 16.– P. 676-681.
2. Nonlinear optical response of a two-dimensional quantum-dot supercrystal: Emerging multistability, periodic and aperiodic self-oscillations, chaos, and transient chaos / I.V. Ryzhov [et al.] // Phys. Rev. A.– 2019.– Vol. 100.– P. 033820 – 1–15.
3. Yurevich, V.A. Resonant reflection by active thin layer / V.A. Yurevich, Yu.V. Yurevich, E.V. Timoshchenko // Журн. прикл. спектр. – 2016. – Т. 83, вып. 6–16.– С. 307–308.

### ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ( $n,0$ ) АТОМАМИ АЗОТА НА ИХ ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА

О. Б. Томили<sup>1</sup>, Е. В. Родионова<sup>1</sup>, Е. А. Родин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, ул. Большевистская, 68, 430005 Саранск, Россия, e-mail: rodionova\_j87@mail.ru

<sup>2</sup>) Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина 23, 603022 Нижний Новгород, Россия, e-mail: evg\_rodin54@gmail.com

В настоящей работе методом DFT/B3LYP в базисе 6-31G были исследованы ультракороткие «молекулы», моделирующие одностенные открытые углеродные нанотрубки хиральности ( $n,0$ ), модифицированные атомами азота. Содержание атомов азота в углеродном каркасе исследованных нанотрубок варьировалось от 2,4 до 20 ат. %. Результаты исследования показывают, что замещение части атомов углерода в каркасе нанотрубки атомами азота приводит к изменению их эмиссионных свойств. Для нанотрубки (5,0) наблюдается улучшение эмиссионных свойств при малых концентрациях атомов азота в каркасе наноструктуры и ухудшение — при содержании атомов азота более 10%. Эмиссионные свойства нанотрубок (6,0) и (7,0) улучшаются независимо от концентрации модифицирующих атомов азота.