

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИСПЕРСИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛАНАРНЫМ
СУПЕРКРИСТАЛЛОМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК**

Юревич В.А., Тимощенко Е.В.

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
г. Могилёв, Беларусь

Развитие нанотехнологий позволило создавать так называемые метаматериалы (объекты с оптическими свойствами, отсутствующими у составляющих их материалов), среди которых структуры квантовых точек (КТ) с относительно высокой концентрацией. Важной закономерностью, присущей отклику таких сред на световое поле, является их способность изменять фазу действующего излучения. Этой способности свойственна нелинейная дисперсия, которая выражена в зависимости фазового изменения излучения от интенсивности и частоты светового поля. К объектам такого рода относят особым образом составленные низкоразмерные планарные массивы из КТ, именуемые метаповерхностями [1] и применяемые в качестве активных элементов нанофотоники.

Представленными далее расчетными оценками нелинейной дисперсии отражения и поглощения метаповерхностей на основе суперкристаллов (СК) характеризованы особые свойства резонансной реакции метаповерхностей на когерентное излучение. Анализ нелинейной дисперсии в низкоразмерном массиве проводится в рамках обоснованной в [2] системы для нормированных квазистационарных величин напряжённости полей (действующего на активные центры – $e'(\tau)$, прошедшего – $e_i(\tau)$ и отражённого – $e(\tau)$) и переменных оптического отклика – комплексной вероятности поляризованности ρ и разности населённостей уровней резонансного перехода n :

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

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

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

Здесь e_i – напряжённость инициирующего (нормально падающего извне) поля, κ – показатель резонансного поглощения слоя суперкристалла, β – показатель резонансной нелинейной рефракции, γ – нормирующий коэффициент в локальной поправке Лоренца, τ_1 и τ_2 – характерные времена продольной и поперечной (фазовой) релаксации, Δ – нормированная по ширине спектрального резонанса ($2/\tau_2$) отстройка частоты от центра линии поглощения, t_0 и r_0 – френелевы (нерезонансные) значения пропускательной и отражательной способностей метаповерхности.

Равновесные состояния кинетической модели (1) определяются нелинейными соотношениями, связывающими при условии $e_i(\tau) = e_0$ стационарные значения переменных ρ_s и n_s и материальных характеристик, использованных в (1):

$$\operatorname{Re} \frac{\rho_s}{e_0} = R = \frac{[1 + \beta\kappa\gamma(1 - n_s)] (1 + \kappa N) - \beta\kappa(1 - n_s) (\Delta + \kappa PN)}{(1 + \kappa N)^2 + (\Delta + \kappa PN)^2} t_0 N,$$

$$\operatorname{Im} \frac{\rho_s}{e_0} = S = \frac{[1 + \beta\kappa\gamma(1 - n_s)] (\Delta + \kappa PN) + \beta\kappa(1 - n_s) (1 + \kappa N)}{(1 + \kappa N)^2 + (\Delta + \kappa PN)^2} t_0 N, \quad (2)$$

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

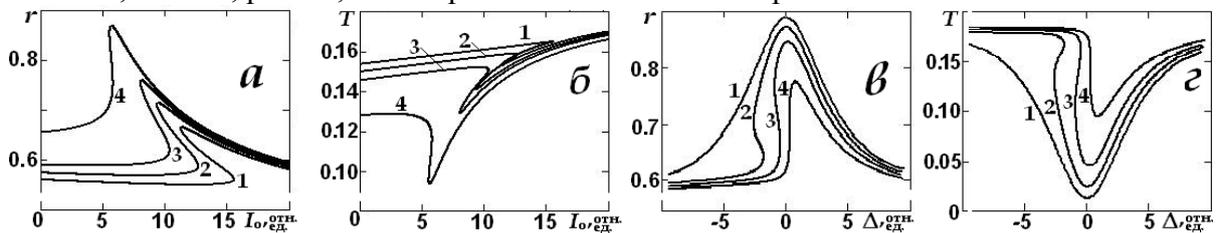
$$\text{где } N = \frac{n_s}{[1 + \beta\kappa\gamma(1 - n_s)]^2 + [\beta\kappa(1 - n_s)]^2}, \quad P = \gamma + \beta\kappa(1 + \gamma^2)(1 - n_s).$$

Изменение нормированной иницирующей мощности $I_0 = e_0^2$ при оценке переменных (2) предполагалось адиабатическим, то есть I_0 изменялось настолько медленно, что в каждый момент времени ансамбль диполей, образующих квазидвумерный СК, достигал равновесного состояния. Расчёт нелинейных коэффициентов отражения $r(I_0)$ и пропускания $T = |e_t/e_0|^2$ возможен при использовании соотношений для полей e , e_t и e_0 из (1) и осуществлялся параметрически (то есть, полагая n_s неотрицательной величиной, линейно нарастающей в пределах (0, 1)) на основе сформулированных выражений:

$$\begin{aligned} r &= r_0 + \kappa \left[R + \beta\kappa(1 - n_s) (\beta(1 - n_s) - PR - S) N/n_s \right], \\ T &= t_0^2 - \kappa^2 \left[R + \beta\kappa(1 - n_s) (\beta(1 - n_s) - PR - S) N/n_s \right]^2 + \\ &\quad \kappa^2 \left[S - \beta(1 - n_s) (1 + \beta\kappa\gamma(1 - n_s) + \kappa(R - PS) N/n_s \right]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Оценка дисперсии проводилась для параметров (2), (3), перекрывающихся с их реальными значениями, известными из литературы. Мощность насыщения поглощения, определяющая I_0 , по порядку соответствовала примерно $10^4 \dots 10^5$ Вт/см² для диапазона длин волн $\sim (1.25 \dots 1.30) \cdot 10^{-6}$ м.

Судя по фрагментам *a*, *б* рисунка, которые иллюстрируют функции $r(I_0)$ и $T(I_0)$, зависимости отражения или пропускания на шкале интенсивности могут иметь области неоднозначности. Соответствующие «бистабильные» кривые принимают форму сильно деформированных резонансных линий. В отражении или пропускании при циклическом изменении интенсивности зондирующего поля оказываются возможными «кинки», то есть, резкие, с гистерезисным свойством переключения.



$\Delta = -3.0$ (кривая 1), -2.0 (2), -1.5 (3), -1.0 (4), $\kappa = 2.0$ (*a*, *б*); $I_0 = 1$ (2), 8 (2), 20 (3), 25 (4), $\kappa = 2.5$ (*в*, *г*), $r_0 = 0.57$, $\beta = 0.05$, $\gamma = 3.0$

Рисунок 1 – Зависимости отражения и пропускания квазидвумерного СК от нормированных величин интенсивности и отстройки резонанса

На дисперсионной шкале (рисунок, *в*, *г*) зависимости $r(\Delta)$ и $T(\Delta)$ с увеличением зондирующей интенсивности I_0 приобретают форму асимметричных смещённых относительно центра линии поглощения резонансов. Физически предсказываемая расчётами (2), (3) нелинейная трансформация дисперсионных свойств отражения и пропускания метаповерхностей из СК означает возможность их использования в качестве основы компактных модуляторов типа оптических затворов или фильтров в нанофотонике.

Список использованных источников

1. Quantum metasurfaces with atom arrays / R. Bekenstein [et al.] // *Nature Physics*. – 2020. – Vol. 16. – P. 676-681.
2. 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.