

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА В РЕЗОНАНСНОМ ОТРАЖЕНИИ КВАЗИКРИСТАЛЛА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Е. В. Тимощенко, В. А. Юревич, Ю. В. Юревич

(Учреждение образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»,
кафедра программного обеспечения информационных технологий)

В рамках теоретической модели нелинейного резонансного отклика, представленной нелинейной системой дифференциальных уравнений, моделируется явление внутренней оптической бистабильности. Получены соотношения для равновесных состояний модели, позволяющие анализировать условия оптического гистерезиса в квазидвумерном кристалле из квантовых точек.

Развитие нанотехнологий позволило создавать метаматериалы – объекты с эффективными оптическими свойствами, выходящими за пределы свойств образующих их компонентов. Среди них выделяют метаповерхности – низкоразмерные пленки квазикристалла, образованные квантовыми точками (КТ). КТ могут быть представлены дипольными «мета-атомами», значительно превышающими размер собственного атома, но с наличием дискретной энергетической структуры состояний. Квазикристаллы из КТ составлены на основе используемых в оптике и лазерной физике полупроводников и органических полимеров. Реакция подобных объектов на резонансное оптическое излучение существенно нелинейна [1], что делает их предпочтительными в разработке управляемых внешним излучением компактных устройств нанофотоники.

В основу модели расчета резонансного отражения наноразмерных пленок нередко полагают приближение сверхтонкого слоя. Этот подход, используемый для решения задачи об оценке нелинейного отражения слоя, основан на допущении того, что длина волны действующего в квазикристалле светового поля значительно меньше толщины пленки. Поле, действующее на активные КТ, при таком условии считается однородным.

Оптическая бистабильность представляет собой особый эффект, крайнее выражение нелинейности отклика физической системы, который проявляется в возможности двух ее стабильных состояний при одном и том же значении светового поля внешнего сигнала. В возникновении бистабильности, кроме нелинейности, нужна положительная обратная связь, поэтому кроме активной среды в схеме необходимо внешнее зеркало. Бистабильность в оптическом слое с резонансным откликом называют внутренней, поскольку ее проявление возможно без зеркала. Обратная связь возникает за счет действия взаимосвязанных нелинейных эффектов, следствия которых в определенных стабильных состояниях отражения или пропускания слоя могут усиливать или компенсировать друг друга. С бистабильностью связан оптический гистерезис, область которого на шкале уровня возбуждения обозначена скачками в отражении или резонансном поглощении из-за резкого переключения состояний.

Задача об отражении решена в применении к физической модели наноразмерного суперкристалла, способного активно (с насыщением поглощения) реагировать на световое поле и отражать его на частотах в области оптического резонанса. Нелинейным эффектом, снижающим действенность насыщения, явля-

ется частотная перестройка поля в условиях существования реакции на когерентное излучение квазирезонансных переходов в энергетической структуре КТ. В основе расчета – приведенная далее модификация нелинейной системы дифференциальных уравнений, нормированной аналогично модели, использованной в работе [2]:

$$\begin{aligned} e(\tau) &= t_0 e_i - \kappa \left[\rho \sqrt{\sigma} + 2i\beta \sigma n e(\tau) \right], & e_r(\tau) &= -r_0 e_i - \kappa \left[\rho \sqrt{\sigma} + 2i\beta \sigma n e(\tau) \right], \\ \frac{d\rho}{d\tau} &= \frac{n e}{\sqrt{\sigma}} - \left[1 - i(\Delta\omega - \beta |e|^2) \right] \rho, & \frac{dn}{d\tau} &= \frac{1-n}{\sigma} - \frac{1}{2\sqrt{\sigma}} (\rho^* e + \rho e^*). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ и n – вероятностные переменные резонансной поляризованности и разности заселенности, e_i – напряженность возбуждающего поля, $e(\tau)$ и $e_r(\tau)$ – напряженности действующего и отраженного полей, которые определяются сверхизлучательным компонентом отражения (резонансной поляризацией среды слоя) и нормированы по уровню напряженности, соответствующей мощности насыщения резонансного перехода, t_0 и r_0 – френелевы коэффициенты пропускания и отражения слоя, κ – коэффициент нелинейности резонансного поглощения, $\sigma = \tau_1/\tau$ – отношение времен спонтанной и фазовой релаксации перехода, β – коэффициент штарковского смещения частоты основного перехода, $\Delta\omega$ – нормированная по спектральной ширине резонанса линейная отстройка частоты действующего поля от центра линии поглощения (дефект резонанса).

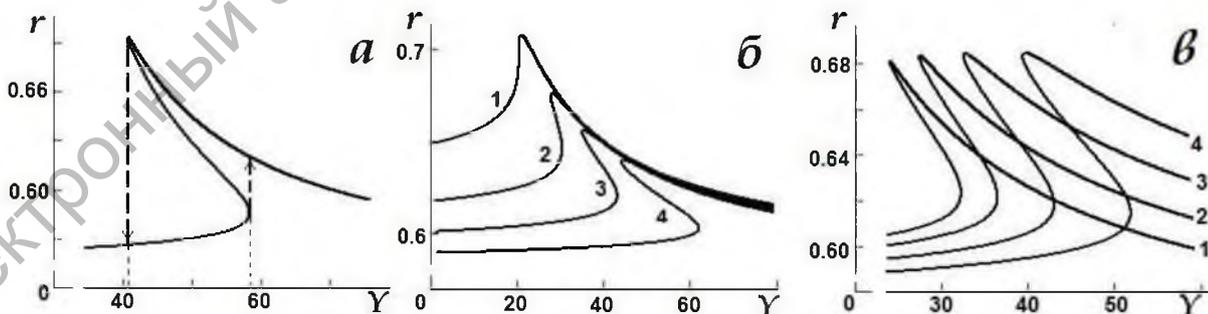
В сингулярных пределах уравнений (1) при условии постоянного уровня возбуждения суперкристалла когерентным полем $e_i(t) = e_0$ нетрудно получить нетривиальные стационарные решения предложенной модели. Этими решениями определяются равновесные значения r_s , n_s , а также e_s , и может быть характеризована зависимость амплитудного коэффициента отражения суперкристалла от нормированной интенсивности $Y = e_0^2$.

Соотношения, полученные в результате определения установившихся состояний модели (1) и позволяющие аналитическую оценку нелинейной зависимости $r(Y) = \text{Re}(e_r/e_0)$, представляется удобным записать в виде:

$$\begin{aligned} |e_s|^2 &= t_0^2 Y / \left\{ [1 + \kappa n_s / (1 + \Delta_s^2)]^2 + \kappa^2 n_s^2 [\Delta_s / (1 + \Delta_s^2) + 2\beta\sigma]^2 \right\}, \\ r &= r_0 + \kappa n_s t_0 [1 + \kappa n_s / (1 + \Delta_s^2)] / \left\{ [1 + \kappa n_s / (1 + \Delta_s^2)]^2 + \kappa^2 n_s^2 [\Delta_s / (1 + \Delta_s^2) + 2\beta\sigma]^2 \right\}, \\ n_s &= (1 + \Delta_s^2) / (1 + \Delta_s^2 + |e_s|^2), \quad \Delta_s = \Delta\omega - \beta |e_s|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ зависимости r от величины нормированной мощности Y на основе решений (2) можно проводить параметрическим расчетом – полагая $|e_s|^2$ линейно нарастающим аргументом. Вариации нормированной интенсивности возбуждения при расчете характеристики $r(Y)$ предполагаются адиабатическими. Величина Y изменяется настолько медленно, что в каждый момент времени дипольный ансамбль КТ, образующих слой суперкристалла, достигает равновесного состояния.

На рисунке приведены типичные бистабильные (неоднозначные) кривые зависимости $r(Y)$, рассчитанные для параметров модели (1), согласованных с данными работы [1]. Оптический гистерезис при подобном характере бистабильности отражения должен проявляться для циклического изменения Y . На фрагменте *а* указано направление гистерезисных скачков («кинков») и обозначены характерные размеры гистерезисной петли. На фрагментах рисунка *б*, *в* демонстрируется развитие гистерезисного изгиба по мере изменения коэффициента β и вариаций дефекта частоты $\Delta\omega$.



Зависимость резонансного отражения от интенсивности (в относительных единицах): $\kappa = 2.0$, $\beta = 4 \cdot 10^{-4}$, $\Delta\omega = -1.0$ (а); $\kappa = 1.6$, $\beta = 2 \cdot 10^{-4}$ (кривая 1), $2.5 \cdot 10^{-4}$ (2), $3 \cdot 10^{-4}$ (3), $3.6 \cdot 10^{-4}$ (4), $\Delta\omega = -0.5$ (б); $\kappa = 1.5$, $\beta = 3.5 \cdot 10^{-4}$, $\Delta\omega = -0.4$ (1), -0.6 (2), -0.8 (3), -1.0 (4) (в); $\sigma = 1 \cdot 10^3$, $r_0 = 0.57$

Гистерезисное поведение резонансного отклика оптического элемента на основе суперкристаллов с возможностью «кинков» перспективно для использования при разработке сверхбыстрых устройств модуляции света.

Литература

1. Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment / W. H. Evers [et al.] // Nano Letters. – 2013. – V. 13. – P. 2317–2325.
2. Yurevich, V. A. Resonant reflection by active thin layer / V. A. Yurevich, Yu. V. Yurevich, E. V. Timoschenko // Журн. прикл. спектр. – 2016. – Т. 83, спецвып. 6–16. – С. 307–308.