

Бистабильность нелинейного отражения квазидвумерного суперкристалла

Е. В. Тимошенко¹, В. А. Юревич², Ю. В. Юревич²

¹Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Могилёв, Беларусь;
e-mail: timoshchenko@msu.by

²Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,
Могилев

Представлены и рассчитаны соотношения, позволяющие анализировать следствия оптического эффекта Штарка как фактора бистабильных свойств отражения квазидвумерного суперкристалла.

Ключевые слова: суперкристаллы квантовых точек, оптический эффект Штарка, диполь-дипольное взаимодействие, оптический гистерезис.

Введение

Из основных функциональных элементов устройств, применяемых для управления светом и востребованных в фотонике, нанооптике и оптоэлектронике, исключительный интерес привлечён к планарным квазидвумерным структурам из суперкристаллов [1]. Среди них особое место занимают суперкристаллы на основе материалов, для которых типичны квантоворазмерные эффекты [2]. Высокая чувствительность их оптических свойств к вариациям интенсивности действующего излучения объясняется большими значениями дипольных моментов образующих активных центров (квантовых точек) в условиях относительно плотной упаковки в среде. Внедрение подобных нелинейных низкоразмерных элементов в схему оптического устройства может без нарушения его компактности обусловить изменение реакции всей системы на излучение [3].

Ряд задач анализа условий бистабильных свойств реакции квазидвумерных суперкристаллов обращен на изучение динамики действующего на эти объекты светового поля. Бистабильность в его отражении или пропускании представляет высшее проявление нелинейности отклика оптической системы, развивающееся в условиях действия нескольких механизмов нелинейности. Эффективностью этого особого свойства реакции суперкристаллов в зависимости от сочетания параметров объясняют многообразие динамических режимов резонансного отражения [4].

Постановка задачи

Оптический (квадратичный) эффект Штарка находится в ряду механизмов нелинейности резонансного отклика активных сред на световое поле. Эффект получил объяснение на основе квантовой механики и наблюдался в спектроскопических измерениях в материалах с квантоворазмерными эффектами [5]. Активный центр (в структурах из суперкристаллов им может быть метаатом, то есть образование типа экситона, превышающее размер атома, но с дискретным спектром энергий) в состоянии с определённой энергией приобретает во внешнем поле световой волны дополнительную энергию вследствие поляризуемости и появления индуцированного дипольного момента. Уровень энергии, которому соответствует одно возможное состояние (невыврожденный уровень), в приложенном поле будет иметь иную энергию, т. е. сместится. Это смещение в квадратичном эффекте учитывается в частотной отстройке резонанса и пропорционально квадрату напряжённости светового поля с коэффициентом, определяемым различием (дефектом) поляризуемости $\Delta\alpha$ в основном и возбуждённом состоянии. Величина этого же параметра служит характеристикой влияния поглощения в квазирезонансных переходах на диэлектрическую восприимчивость активных сред.

В работе, положенной в основу сообщения, поставлена задача оценки влияния эффекта Штарка на бистабильные свойства резонансного отражения суперкристалла. Систему уравнений взаимодействия светового поля с веществом слоя, формулируемую на основе допущения о сверхтонком слое с высокой плотностью активных центров и включающую оптические аналоги уравнений Блоха, принято рассматривать как расчетную модель нелинейной реакции суперкристалла на резонансное поле [4, 6].

Дисперсионные соотношения

Модификацией сформулированной в [6] системы кинетических уравнений может быть получена расчетная динамическая модель переходных процессов при резонансном отражении планарного квазикристалла квантовых точек, учитывающая штарковскую составляющую нелинейного смещения частоты. В сингулярных пределах уравнений из системы следуют дисперсионные соотношения, которые в неявной форме выражают связь интенсивностей световых полей – квазинепрерывного нормально падающего извне на поверхность квазикристалла и действующего на образующие его структуру активные центры. В соотношениях для полей учтены типичные для суперкристаллов нелинейные фазовые эффекты, производимые диполь-дипольным взаимодействием и поглощением в квазирезонансных переходах. Расчет стационарной интенсивности на их основе также дает возможность определить нелинейную или дисперсионную зависимость эффективного амплитудного коэффициента отражения r . Для нормированных по уровню мощности насыщения интенсивностей внешнего (S_0) и установившегося действующего поля (S) эти выражения приведены ниже:

$$r = r_0 + \kappa n_s \frac{1 + \kappa n_s}{(1 + \kappa n_s)^2 + (\Delta\omega + \kappa\gamma n_s + \beta\tau S)^2} \cdot$$

$$S_0 = (1 + B^2) \frac{1 - n_s}{n_s} \left[\left(1 + \frac{\kappa n_s}{1 + B^2} \right)^2 + (\Delta\omega + D n_s + \beta\tau S)^2 \right], \quad B = \beta\kappa(1 - n_s), \quad D = \frac{\gamma + B}{1 + B^2} \kappa,$$

$$S = \frac{1}{2\beta^2\tau^2} \left[\frac{n_s}{1 - n_s} - 2\beta\tau D n_s \pm \sqrt{\left(\frac{n_s}{1 - n_s} - 2\beta\tau D n_s \right)^2 - 4\beta^2\tau^2(1 + D^2 n_s^2)} \right].$$

Здесь n_s – равновесное значение разности населённостей резонансного перехода, $\Delta\omega$ – линейная отстройка резонанса, κ – показатель резонансного поглощения, β – коэффициент резонансной нелинейности рефракции, определяемый дефектом поляризуемости $\Delta\alpha$, r_0 – нерезонансный коэффициент отражения слоя, γ и τ – нормирующие коэффициенты в локальной поправке Лоренца и в выражении для фазовой отстройки, инициированной квадратичным эффектом Штарка. Первый из них пропорционален отношению длины световой волны λ и толщины слоя, второй – равен отношению скоростей продольной и поперечной (фазовой) релаксации.

Полученные дисперсионные соотношения допускают параметрический расчет – при построении зависимостей $r(S_0)$ и $n_s(S_0)$ величину n_s следует положить линейно нарастающим в пределах (0, 1) аргументом. На фрагментах *a*, *б* рисунка приведены результаты расчета зависимости нелинейного отражения и населенности от мощности приложенного поля. Параметры расчета, в основном, соответствовали данным измерений, приведенным в работе [5]. Судя по кривым на этих рисунках, влияние эффекта Штарка снижает порог проявления бистабильности на шкале мощности внешнего поля. Отмечается далее, что с ростом «штарковского» коэффициента β способна нарастать ширина

гистерезисной петли (расстояние между точками поворота на бистабильных кривых) и величина гистерезисного скачка (рис., б, в).

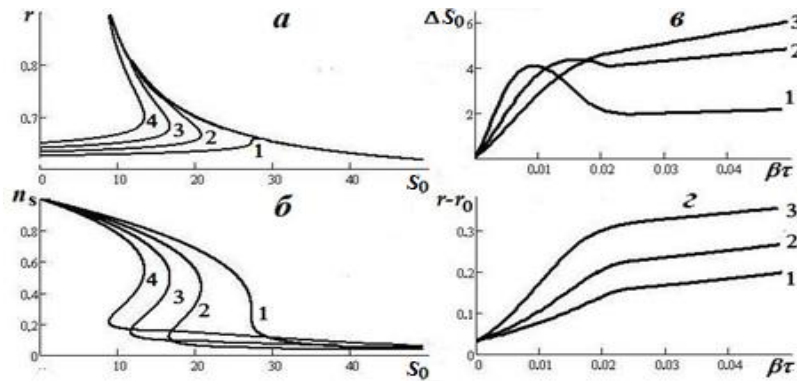


Рис. – Зависимости отражения и населённости от интенсивности приложенного поля (а, б), ширины гистерезисной петли (в) и размера гистерезисного скачка в отражении (г) от коэффициента Штарка: $\beta\tau = 0$ (кривая 1), 0.02 (2), 0.025 (3), 0.032 (4), $\kappa = 2.0$, $\Delta = -1.0$ (а, б), $\Delta = -0.5$ (1), -0.7 (2), -1.0 (3) (в), $\kappa = 2.0$ (1), 2.2 (2) 2.5 (3), $\Delta = -1.0$ (г), $\gamma = 3.17$.

Усложнение картины бистабильности и связанного с ней оптического гистерезиса по мере увеличения линейной отстройки и уровня резонансного поглощения (если сравнивать ход зависимостей на фрагментах рис. б, в) может быть объяснено конкуренцией разных (но взаимосвязанных) механизмов, обуславливающих нелинейную расстройку резонанса. Динамический фактор фазовой нелинейности, обусловленный вкладом квадратичного эффекта Штарка, следует учитывать при моделировании процессов энергообмена резонансного поля со средой суперкристаллов.

Литература

1. Nossa J. F., Camacho A.S. Optical properties of supercrystals. *Microelectronics Journal*. 2008. Vol. 38. P. 1251–1253.
2. Baimuratov A.S. [et al.] Engineering band structure in nanoscale quantum-dot supercrystals. *Optics Letters*. 2013. Vol. 38. P. 2259–2261.
3. Krasnok A., Tymchenko M., Alù A. Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics. *Materials Today*. 2018. Vol. 21, No. 1. P. 8–21.
4. Ryzhov I. V. [et al.] Nonlinear optical response of a two-dimensional quantum-dot supercrystal: Emerging multistability, periodic and aperiodic self-oscillations, chaos, and transient chaos. *Physical Review A*. 2019. Vol. 100. No. 3. P. 033820.
5. Unold T. [et al.] Optical Stark effect in a quantum dot: Ultrafast control of single exciton polarizations. *Physical Review Letters*. 2004. Vol. 92, No. 15. P. 157401.
6. Тимощенко Е. В., Юревич Ю. В. Расчёт эффективности бистабильного тонкоплёночного отражателя. *ПФМТ*. 2019. No. 3 (40). С. 43–48.

Nonlinear reflection bistability of quasi-two-dimensional crystal

E.V. Timoshchenko¹, V.A. Yurevich², Yu.V. Yurevich²

¹A. Kuleshov State University, Mogilev, Belarus; e-mail: timoshchenko@msu.by

²Belarussian State University of Food & Chemical Technologies, Mogilev, Belarus

Представлены и рассчитаны соотношения, позволяющие анализировать следствия оптического эффекта Штарка как фактора бистабильных свойств отражения квазидвумерного суперкристалла.

Keywords: Quantum-dot supercrystals, optical Stark effect, dipol-dipole interaction, optical hysteresis.