

Особенности Двухфотонной Оптической Нутации в Системе Биэкситонов в Полупроводниках с Учётом Упругих Межчастичных Взаимодействий

Васильев В.В.

Физико-математический факультет
Приднестровский государственный университет имени
Т.Г. Шевченко
Тирасполь
vasscorp@mail.ru

Хаджи П.И.

Институт прикладной физики АНМ
Кишинев

Abstract – The peculiarities of two-photon nutation in a system of coherent biexcitons in CuCl semiconductors are considered taking into account the elastic biexciton–biexciton interaction. It is shown that depending on the system parameters, optical nutation represents a process of periodic transformation of photon pairs into biexcitons and vice versa. The possibility of exercising the phase control of the optical nutation process is predicted.

Keywords – two-photon optical nutation, biexcitons in semiconductors, elastic interparticle interactions.

I. ВВЕДЕНИЕ

Периодическое изменение начального состояния системы под влиянием поля внешней электромагнитной волны, которое приводит к соответствующей модуляции излучения среды, называется явлением оптической нутации [1,2]. В [3] изучена теория оптической нутации в системе двухуровневых атомов, взаимодействующих с конечным числом фотонов в резонаторе. Оптическая нутация в экситонной области спектра изучена в [4–9]. Было показано, что при низких уровнях возбуждения частота нутации определяется константой экситон-фотонного взаимодействия, а при больших уровнях возбуждения она начинает зависеть от плотности экситонов. Исследовано также явление нутации в системе когерентных экситонов, фотонов и биэкситонов в области М-полосы люминесценции [7–10]. Показано, что в пределе заданной плотности фотонов (экситонов) частота нутации пропорциональна амплитуде электромагнитной (материальной) волны.

В [8–14] рассмотрена теория двухфотонной нутации в системе когерентных биэкситонов. В [13,14] показано, что частота нутации даже без учёта межчастичного взаимодействия существенно зависит от плотности фотонов и биэкситонов. Предсказано, что особенности нутации определяются начальной разностью фаз фотонов и биэкситонов, что свидетельствует о возможности фазового контроля процесса двухфотонной нутации. Однако возникает естественный вопрос о влиянии межчастичных взаимодействий на динамику нутационного

процесса. Этот вопрос особенно актуален при больших уровнях возбуждения, когда плотность биэкситонов достаточно велика и актуальными оказываются процессы упругих биэкситон–биэкситонных взаимодействий. Поэтому в данной работе изучены особенности явления двухфотонной нутации в системе когерентных биэкситонов с учётом упругих межчастичных взаимодействий.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предполагаем, что длительность импульсов τ_p намного меньше времени релаксации τ_{rel} биэкситонов ($\tau_p \ll \tau_{rel}$). В этом случае процессами релаксации биэкситонов можно пренебречь, т.к. они не успевают срабатывать за время действия импульса. Предполагая, что спектральная ширина импульсов намного меньше энергии связи биэкситонов (в кристалле CuCl она составляет 30–40 мэВ), можно пренебречь оптической экситон–биэкситонной конверсией и экситон–фотонным взаимодействием. Рассматриваемое нами явление оптической нутации состоит в попарном превращении одинаковых фотонов в биэкситоны и обратно. Гамильтониан взаимодействия рассматриваемой системы

$$H_{int} = \hbar\mu(\hat{b}^+\hat{c}\hat{c} + \hat{c}^+\hat{c}^+\hat{b}) + \frac{1}{2}\hbar\nu\hat{b}^+\hat{b}^+\hat{b}\hat{b},$$

где $\hat{b}(\hat{b}^+)$ и $\hat{c}(\hat{c}^+)$ – операторы уничтожения (рождения) биэкситона и фотона соответственно μ – константа двухфотонного возбуждения биэкситона из основного состояния кристалла, ν – константа упругого биэкситон–биэкситонного взаимодействия.

Используя гайзенберговские уравнения для операторов рождения фотонов и биэкситонов, и приближение среднего поля (mean field approximation) нами получено нелинейное уравнение для временной эволюции плотности биэкситонов. Из точных аналитических решений полученного уравнения следует, что существуют периодические и аperiodические режимы

эволюции системы. При начальной разности фаз фотонов и биекситонов $\Theta_0 = \pm k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) и расстройке резонанса $\Delta = 0$ эволюция системы существенно определяется соотношениями параметров y_0 , α (y_0 – нормированная начальная плотность биекситонов, α – нормированный параметр упругого межчастичного взаимодействия). Графики временной эволюции нормированной плотности биекситонов в зависимости от времени и параметра нелинейности α при начальной разности фаз $\Theta_0 = 0$ и при различных значениях начальной плотности биекситонов представлены на рис.1. Видно, что при начальной плотности биекситонов $y_0 = 0$ и в отсутствие межчастичного взаимодействия ($\alpha = 0$) система эволюционирует аperiodически. При этом все фотоны превращаются в биекситоны, чем эволюция и заканчивается (рис. 1a). В случае, когда начальная плотность биекситонов $y_0 \neq 0$, аperiodический режим колебаний смещён относительно нуля в сторону увеличения параметра α (рис.1b).

При начальной плотности биекситонов $y_0 \neq 0$ в системе существует критический параметр α_c , при котором в системе наступает покой, то есть плотность биекситонов не изменяется со временем. Из рис.1b видно, что при $\alpha < \alpha_c$ колебания происходят ниже плоскости $y = y_0$. В этом интервале параметра нелинейности с ростом α амплитуда колебаний сначала возрастает, затем убывает, становясь равной нулю при $\alpha = \alpha_c$. Период колебаний с ростом параметра α монотонно возрастает. При $\alpha = \alpha_c$ в системе наступает покой. При параметре нелинейности $\alpha > \alpha_c$, колебания происходят выше плоскости $y = y_0$, а амплитуда колебаний сначала возрастает, затем монотонно убывает.

Рассмотрим случай, когда начальная разность фаз $\Theta_0 = \pi/2$. На рис.2 представлены графики временной эволюции нормированной плотности биекситонов $N/(N_0 + 0.5f_0)$ в зависимости от значений параметра нелинейности α для нескольких значений начальной плотности биекситонов y_0 . Графики временной эволюции при $\Delta = 0$ являются симметричными в зависимости от параметра α , т.е. $y(-\alpha) = y(\alpha)$. Из рис.2 видно, что эволюция системы при $\alpha = 0$ является аperiodической. С течением времени все фотоны превращаются в биекситоны, чем процесс эволюции и завершается. При $\alpha \neq 0$ эволюция системы является периодической с периодом, зависящим от параметров α и

y_0 . Следовательно, при $\alpha \neq 0$ оптическая нутация представляет собой периодический процесс попарного превращения фотонов в биекситоны и обратно.

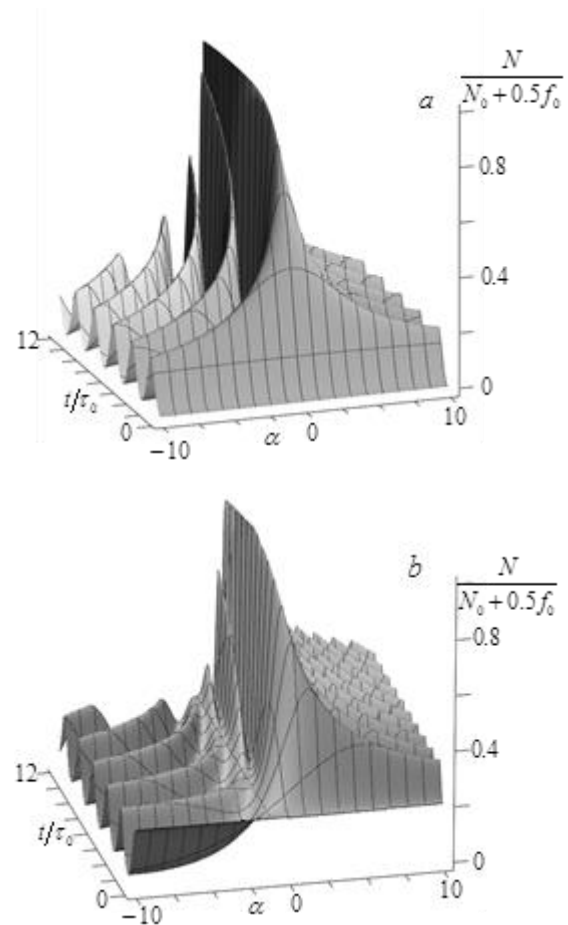


Рис.1. Временная эволюция нормированной плотности биекситонов $N/(N_0 + 0.5f_0)$ в зависимости от величины параметра α для значений нормированной начальной плотности биекситонов y_0 , равных: а) 0, б) 0.2 при начальной разности фаз $\Theta_0 = \pi k$ ($k = \pm 0, 1, 2, \dots$).

Видно, что с ростом параметра α амплитуда колебаний сначала возрастает, становясь максимальной при $\alpha = 0$, затем убывает. Период колебаний с ростом α возрастает, становясь бесконечным при $\alpha = 0$, затем монотонно убывает. Таким образом, отсюда можно сделать вывод, что при $\Theta_0 = (2k + 1)\pi/2$ учёт упругих биекситон-биекситонных взаимодействий приводит к снятию режима аperiodической эволюции системы и к уменьшению амплитуды колебаний плотности биекситонов с ростом параметра нелинейности α .

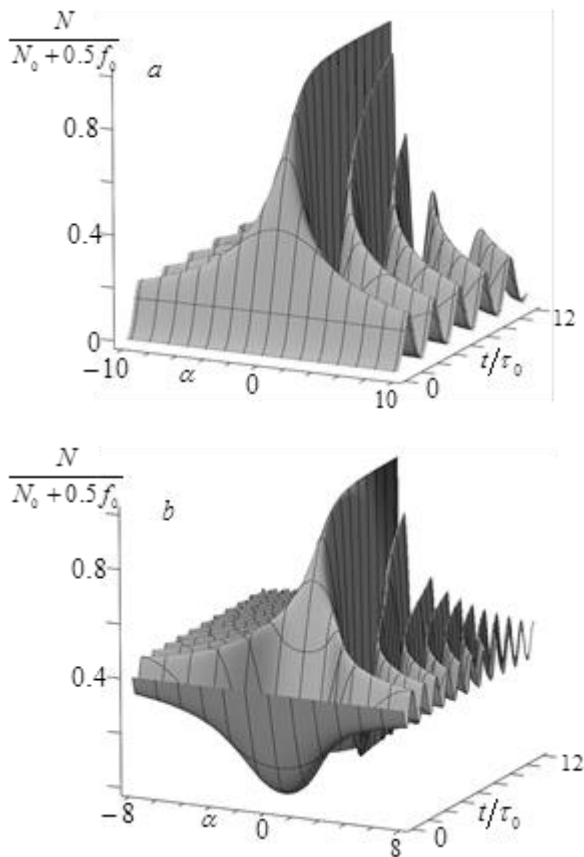


Рис.2. Временная эволюция нормированной плотности биэкситонов $N/(N_0 + 0.5f_0)$ в зависимости от величины параметра α для значений нормированной начальной плотности биэкситонов y_c , равных: а) 0, б) 0.4, при начальной разности фаз $\Theta_0 = (\pi/2)(2k + 1)$ ($k = \pm 0, 1, 2, \dots$).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учёт межчастичных столкновений в процессе двухфотонной нутации биэкситонов приводит к тому, что временная эволюция системы качественно изменяется: из аperiodической при $\alpha = 0$ она превращается в периодическую при $\alpha \neq 0$, причём с ростом $|\alpha|$ амплитуда и период нутации монотонно убывают (рис.2). Отметим также, что с ростом $|\alpha|$ во временной эволюции системы отсутствует эффект самозахвата биэкситонов. В самом деле, говорить здесь о явлении самозахвата (self-trapping), характерном для эволюции плотности бозеконденсированных атомов в двухямном потенциале, не приходится. Однако некоторые черты сходства всё же можно заметить. Дело в том, что самозахват атомов в одной из ям имеет место при значениях параметра

межатомного взаимодействия больших критического. В этом случае амплитуда колебаний атомов скачкообразно уменьшается и далее убывает с ростом этого параметра [20,21]. В нашем случае имеет место только монотонное изменение амплитуды колебаний с ростом $|\alpha|$, которое по нашему мнению, родственно, но не тождественно явлению самозахвата. При этом, чем больше y_0 , тем быстрее (в зависимости от α) наступает режим малоамплитудных колебаний плотности системы.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Нелинейная спектроскопия*, под ред. Бломбергера Н., М., Мир, 1979.
- [2] Апанасевич П.А. *Основы теории взаимодействия света с веществом*. Минск, Изд. "Наука и техника", 1977.
- [3] Бурштейн А.И., Пусеп А.Ю. *ЖЭТФ*, **69**, 1927(1975).
- [4] Davydov A.S., Sericov A.A.. *Phys. Stat. Solidi (b)*, **56**, 351(1973).
- [5] Samartsev V.V., Sheibut U.E, Ivanov U.S. *Spectroscopy Lett.*, **9**, 57 (1976).
- [6] Белкин С.Н., Москаленко С.А., Ротару А.Х. и др. *ФТТ*, **22**, 1961(1980).
- [7] Хаджи П.И., Москаленко С.А., Белкин С.И. *Письма в ЖЭТФ*, **29**, 223(1979).
- [8] Москаленко С.А., Хаджи П.И., Ротару А.Х. *Солитоны и нутация в экситонной области спектра*. Кишинёв. Штиинца, 1980.
- [9] Хаджи П.И. *Нелинейные оптические процессы в системе экситонов и биэкситонов в полупроводниках*, Кишинёв, Штиинца, 1985.
- [10] Хаджи П.И., Москаленко С.А., Белкин С.Н. и др., *ФТТ*, **22**, 749(1980).
- [11] Хаджи П.И., Белкин С.Н. *ФТТ*, **21**, 3291(1979).
- [12] Хаджи П.И., Москаленко С.А., Белкин С.Н. *УФЖ*, **25**, 361(1980).
- [13] Хаджи П.И., Васильев В.В. *ЖЭТФ*, **131**, с.922 (2007).
- [14] Хаджи П.И., Васильев В.В. *Оптика и спектроскопия*, **104**, 392 (2008).
- [15] Nanamura E. *Solid State Commun.*, **12**, 951(1973); *J.Phys. Soc. Japan*, **39**, 1506(1975).
- [16] Хаджи П.И. *Кинетика рекомбинационного излучения экситонов и биэкситонов в полупроводниках*. Кишинёв, Штиинца, 1977.
- [17] Бобрышева А.И. *Биэкситоны в полупроводниках*. Кишинёв, Штиинца, 1979.
- [18] Градштейн И.С., Рыжик И.М.. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и производений*. М., ГИФМЛ, 1963.
- [19] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*, Наука, Москва (1971).
- [20] Radhavan S., Smerzi A., Fantoni S., Shono S.R. *Phys. Rev.*, **A59**, 620 (1999).
- [21] Albiez M., Gati R., Fölling J., Hunsmann S., Cristiani M., Oberthaler M.K. *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 010402 (2005).