ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 12, с. 1729–1730

УДК 535.14

ВЫНУЖДЕННАЯ ЭКСИТОННАЯ ИНДУКЦИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ АНСАМБЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

© 2020 г. В. В. Самарцев[1, *], Т. Г. Митрофанова[1], О. Х. Хасанов[2]

[1]*Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук", Казань, Россия*

[2]*Государственное научно-практическое объединение "Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь*

**E-mail: samartsev@kfti.knc.ru*

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.
После доработки 10.08.2020 г.
Принята к публикации 26.08.2020 г.

Теоретически исследованы возможность и условия возникновения вынужденной экситонной индукции в тонком слое полупроводниковых квантовых точек при возбуждении непрерывным лазерным излучением.

DOI: 10.31857/S0367676520120327

Настоящая работа посвящена теоретическому анализу условий возникновения когерентного явления вынужденной экситонной индукции (ВЭИ) в ансамбле полупроводниковых квантовых точек (ПКТ) при его непрерывным лазерном возбуждении. ВЭИ является оптическим аналогом вынужденной блоховской индукции в ядерном магнитном резонансе [1]. В оптическом диапазоне это явление на частицах резонансных сред исследовано нами в [2]. Здесь мы рассматриваем в качестве активной среды коллоидные ПКТ, резонансными уровнями которых являются уровни, соответствующие экситонным состояниям.

В России нам известны несколько экспериментальных групп, занимающихся исследованиями когерентных оптических явлений в неоднородных ансамблях примесных центров, в т.ч. в тонких пленках коллоидных ПКТ. Среди них можно отметить работы экспериментальной группы из Института спектроскопии РАН (Москва, Троицк), выполненные методами люминесцентной спектроскопии [3–5], фотонного эха [6–10] и спектроскопии одиночных молекул [11], а также с использованием комбинации различных методов [12]. В качестве объектов для исследования были использованы двухоболочечные ПКТ CdSe/CdS/ZnS (пр-во QD-Light, Россия) размером 3–7 нм. Образцы были приготовлены из толуольного раствора ПКТ при помощи оригинальной методики нанесения тонких слоев ПКТ на поверхность стеклянной подложки [7]. В этих образцах были зарегистрированы сигналы четырехволнового смешения [7, 8] и некогерентного фотонного эха [9, 10]. Необходимо отметить, что квантовые точки CdSe/CdS/ZnS были выращены методом коллоидного синтеза таким образом, что излучающее ядро CdSe оказалось окружено двумя оболочками из CdS и ZnS, улучшающими фотостабильность и квантовый выход ПКТ по сравнению с обычными нанокристаллами. Согласно [10], при возбуждении ПКТ лазером на длине волны 580 нм, соответствующей максимуму экситонного поглощения, время необратимой релаксации при температуре 10 K составляет 0.75 пс. Поскольку тонкий слой ПКТ нанесен на поверхность стеклянной подложки, то для регистрации оптических когерентных откликов удобно использовать призму полного внутреннего отражения [18].

ПКТ размером несколько нанометров характеризуются дискретным набором энергетических состояний, подобно атомам, из-за чего их нередко называют "искусственными атомами". С другой стороны, размеры таких ПКТ практически совпадают с размерами экситонов Ванье–Мотта, возникающих в ПКТ при лазерном возбуждении [13, 14] (см. также монографию [15]). Поэтому авторы данной работы сделали предположение об экситонной природе когерентных явлений, наблюдавшихся в [7–10]. Рассмотрим случай возбуждения ансамбля тех же самых ПКТ непрерывным лазерным излучением. При этом будем следовать формализму, развитому в [16, 17].

Следуя [16], запишем гейзенберговские уравнения движения компонент вектора электрической поляризации:

$$\begin{gathered}\frac{d\langle P_1(\vec{\varkappa},\vec{n},t)\rangle}{dt}=\Delta\omega_\varkappa\langle P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)\rangle-\frac{P_1(\vec{\varkappa},\vec{n},t)}{T_2},\\ \frac{d\langle P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)\rangle}{dt}=-\Delta\omega_\varkappa\langle P_1(\vec{\varkappa},\vec{n},t)\rangle-\frac{\omega_f}{\omega V}E_0d_f^2\times\\ \times\left(1-2\frac{\langle N_\varkappa\rangle}{N}\right)-\frac{P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)}{T_2},\\ \frac{d\langle N_\varkappa\rangle}{dt}=-\frac{P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)}{2}VNE_0-\frac{\langle N_\varkappa\rangle}{T_1},\end{gathered}\tag{1}$$

где P_1, P_2 и $N_\varkappa$ – компоненты вектора электрической поляризации, ω и $\vec{\varkappa}$ – частота и волновой вектор возбуждающего лазерного излучения, ω_f – частота f-го резонансного перехода, $\vec{d}_f$ – электрический дипольный момент резонансного перехода, N – число экситонов в образце ПКТ, $\Delta\omega_\varkappa=\omega-E_{nf}$ (здесь и далее рассматривается система единиц с $\hbar=1$), E_{nf} – энергия f-го резонансного перехода n-й частицы, E_0 – амплитуда электрического поля световой волны, V – объем ПКТ, T_1 и T_2 – времена продольной и поперечной релаксации экситона, $\vec{n}$ – вектор, характеризующий местоположение n-й резонансной частицы, $\langle\ldots\rangle$ обозначает усреднение по начальной матрице плотности.

Решение системы (1) при стационарном лазерном возбуждении имеет вид [17]:

$$\begin{gathered}P_1(\vec{\varkappa},\vec{n},t)=d_f^2\frac{A\omega_\varkappa}{VA}E_0T_2^2,\quad P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)=-d_f^2E_0\frac{T_2^2}{VA},\\ N_\varkappa=-P_2(\vec{\varkappa},\vec{n},t)\cdot\frac{1}{2}(E_0VNT_1),\end{gathered}\tag{2}$$

где $A=1+\Delta\omega_\varkappa^2T_2^2+d_f^2E_0T_1T_2$. Интенсивность ВЭИ в единицу телесного угла $\Delta\Omega$ в направлении волнового вектора $\vec{k}=\vec{\varkappa}$ определяется выражением

$$\Delta I_{\text{ВЭИ}}\sim\frac{N_\varkappa^2}{8V^2}d_f^2E_0^2T_2^2\frac{\left(1+\Delta\omega_\varkappa^2T_2^2\right)}{A^2}\Delta\Omega.\tag{3}$$

Исследование $\Delta I_{\text{ВЭИ}}$ на экстремум показывает, что при $\Delta\omega_{1,2}=\pm\frac{1}{T_2}\sqrt{\left|d_f^2E_0^2T_1T_2-1\right|}$ существует два максимума, равных $N_\varkappa^2/8V^2d_f^2(T_2/T_1)$.

Детектирование ВЭИ можно существенно облегчить, если возбуждение слоя ПКТ осуществлять в двухквантовом режиме, когда каждый из возбуждающих квантов воздействует на ПКТ в своем направлении ($\vec{k}_1$ или $\vec{k}_2$) под углом 60° друг к другу [19]. В этом случае формируются две “решетки населенностей” ($\vec{k}_2-\vec{k}_1$) и ($\vec{k}_1-\vec{k}_2$), на которых, как в случае свободной световой индукции, будут рассеиваться во взаимно-противоположных направлениях сигналы ВЭИ.

Таким образом, нами теоретически рассмотрена возможность и условия наблюдения сигналов ВЭИ при непрерывном возбуждении ансамбля ПКТ. Исходя из размеров ПКТ и оценки времени фазовой релаксации, можно заключить, что генерация ВЭИ связана с локализованными экситонами Ванье–Мотта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-02-00545а) и Президиума РАН (программа “Актуальные проблемы физики низких температур”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрагам А.* Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1963. 551 с.
2. *Yevseev I.V., Yermachenko V.M., Samartsev V.V.* Depolarizing collisions in nonlinear electrodynamics. Boca Raton: CRC Press, 2004. 318 p.
3. *Магарян К.А., Михайлов М.А., Каримуллин К.Р. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 12. С. 1629; *Magaryan K.A., Mikhailov M.A., Karimullin K.R. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 12. P. 1336.
4. *Karimullin K.R., Mikhailov M.A., Georgieva M.G. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 951. Art. № 012011.
5. *Магарян К.А., Каримуллин К.Р., Васильева И.А., Наумов А.В.* // Опт. и спектроск. 2019. Т. 126. № 1. С. 50; *Magaryan K.A., Karimullin K.R., Vasil'eva I.A., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 126. № 1. P. 41.
6. *Каримуллин К.Р., Князев М.В., Вайнер Ю.Г., Наумов А.В.* // Опт. и спектроск. 2013. Т. 114. № 6. С. 943; *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Vainer Y.G., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2013. V. 114. № 6. P. 859.
7. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 12. С. 1581; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 12. P. 1396.
8. *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Arzhanov A.I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 859. Art. № 012010.
9. *Аржанов А.И., Каримуллин К.Р., Наумов А.В* // Кр. сообщ. по физ. ФИАН. 2018. Т. 45. № 3. С. 39; *Arzhanov A.I., Karimullin K.R., Naumov A.V.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2018. V. 45. № 3. P. 91.
10. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1620; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 11. P. 1478.
11. *Каримуллин К.Р., Князев М.В., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 12. С. 1539; *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 12. P. 1254.
12. *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Eremchev I.Yu. et al.* // Laser Phys. 2019. V. 29. № 12. Art. № 124009.
13. *Li X., Wu Y., Still D. et al.* // Science. 2003. V. 301. P. 809.
14. *Ikezawa M., Nairs S., Masumoto Y. et al.* // J. Lumin. 2007. V. 122–123. P. 730.
15. *Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики. М.: Физматлит, 2009. 482 с.
16. *Копвиллем У.Х., Самарцев В.В., Шейбут Ю.Е.* // Физ. тв. тела. 1975. Т. 17. С 1868.
17. *Kopvillem U.Kh., Samartsev V.V., Sheibut Yu.E.* // Phys. Stat. Sol. B. 1975. V. 70. P. 799.
18. *Власов Р.А., Гадомский О.Н., Гадомская И.В., Самарцев В.В.* // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. № 6. С. 1938.
19. *Leontiev A.V., Lobkov V.S. Mitrofanova T.G. et al.* // Laser Phys. Lett. 2012. V. 9. P. 654.