УДК 535.2

# ЭКСИТОННАЯ САМОИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ В СЛОЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

© 2021 г. В. В. Самарцев<sup>1,</sup> \*, Т. Г. Митрофанова<sup>1</sup>, О. Х. Хасанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Государственное научно-производственное объединение "Научно-практический центр

Национальной академии наук Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь

\*E-mail: dr samartsev39@mail.ru

С-тип. и \_зататкеv59@тип.ти Поступила в редакцию 12.03.2021 г. После доработки 05.04.2021 г. Принята к публикации 28.04.2021 г.

Теоретически исследованы возможность и условия возникновения явления самоиндуцированной прозрачности на экситонах Ванье-Мотта в слое полупроводниковых квантовых точек.

DOI: 10.31857/S0367676521080263

## введение

Работа посвящена возникновению и условиям формирования экситонной когерентности и экситонных солитонов при короткоимпульсном лазерном возбуждении полупроводниковых квантовых точек (ПКТ). Об исследованиях нанокомпозитов на основе квантовых точек с излучающим ядром CdSe различными методами селективной лазерной спектроскопии и микроскопии сообщали авторы экспериментальных работ [1-9]. Причем в [4-8] исследовали двухоболочечные коллоидные квантовые точки CdSe/CdS/ZnS (размером 3-7 нм) с излучающим ядром CdSe и оболочками из широкозонных полупроводников CdS и ZnS, а в [9] – различные композиты на их основе. Экспериментальная техника оптической эхо-спектроскопии, использованная авторами для исследования процессов фазовой релаксации, подробно описана в [10 - 13].

Поскольку число атомов в ядре CdSe невелико, то поглощение фотонов лазерного излучения ядром ПКТ очень слабое. Поэтому, согласно [14], и родилась мысль возбуждать ПКТ в полосу поглощения оболочки, сечение поглощения фотонов которой на четыре порядка больше сечения поглощения ядром ПКТ.

Возникает еще один принципиальный вопрос, связанный с короткоимпульсным (пикосекундным или фемтосекундным) возбуждением образца с ПКТ. Дело в том, что в монографии [14] и в статьях, на которых она основана, показано, что даже при непрерывном возбуждении квантовых точек их флуоресценция носит флуктуирующий характер, а время между интервалами флуктуаций (on- и off-) не короче 0.01 с. Возникает вопрос: появятся ли флуктуации излучения при короткоимпульсном возбуждении образца, содержащего ПКТ? Ответ на этот вопрос дали короткоимпульсный эксперимент [15] и наиболее полный обзор по квантовым точкам [16], в которых показано, что такие когерентные явления, как стимулированное фотонное эхо и четырехволновое смешение, происходят на ПКТ обычным образом в отсутствии флуктуаций. Отметим недавнюю работу по теоретическому исследованию особенностей быстропротекающих процессов в твердотельных примесных средах и нанокомпозитах [17]. Теоретические подходы, описывающие эволюцию экситонной когерентности в ансамблях ПКТ, рассматривались нами ранее в [18, 19].

Согласно [14], наиболее вероятной формой сушествования фотонного возбуждения в ПКТ являются свободные электронно-дырочные пары, которые, теряя энергию, превращаются в экситоны (связанные электронно-дырочные пары). Более того, в работе [16] показано, что в каждой ПКТ целесообразно возбуждать два экситона разных поляризаций и спинов, формирующих в ПКТ биэкситон. Напомним, что явление экситонной самоиндуцированной прозрачности (ЭСИП), впервые на экситонах Ванье-Мотта, наблюдалось в полупроводниковом монокристалле CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> В.С. Днепровским с коллегами [20, 21]. Согласно [22], радиус экситонов Ванье-Мотта равен 10<sup>-7</sup> см и более и, как правило, совпадает с размером ПКТ. Именно явлению ЭСИП на экситонах Ванье-Мотта в ПКТ CdSe/CdS/ZnS и посвящена данная работа.

ПКТ CdSe/CdS/ZnS были выращены методом коллоидного синтеза. Согласно [6], при возбуждении ансамбля таких ПКТ лазером на длине волны 580 нм, соответствующей максимуму экситонного поглощения, время необратимой релаксации при температуре 10 К составляет 0.75 пс. Поскольку тонкий слой ПКТ нанесен на поверхность стеклянной подложки, то при регистрации ЭСИП удобно использовать призму полного внутреннего отражения [23] и оптическую систему для точного сведения лучей, описанную в [12, 13].

Методика приготовления образцов ПКТ CdSe/CdS/ZnS дает возможность получения однородных пленок с ПКТ нужной толщины, хорошего качества с большой оптической плотностью, причем сам процесс нанесения визуализируется с помощью ССD-камеры [4]. Полученная пленка может содержать один слой ПКТ. В этом слое мы и предлагаем наблюдать ЭСИП на ПКТ CdSe/CdS/ZnS.

## ЭКСИТОННАЯ САМОИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ В СЛОЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК. ЭКСИТОННЫЕ СОЛИТОНЫ

Под самоиндуцированной прозрачностью (СИП) резонансной среды понимается ее "просветление" под действием резонансного импульса, "площадь" которого больше  $\pi$ , а длительность  $\Delta t$  короче времени поперечной необратимой релаксации Т<sub>2</sub>. Это когерентное явление было обнаружено в оптическом диапазоне длин волн Мак-Коллом и Ханом [24]. Как и в случае других когерентных явлений, при короткоимпульсном возбуждении каждая резонансная частица (например, ПКТ) переходит в суперпозиционное состояние, характеризуемое безразмерным параметром  $\theta$ , носящим название "импульсной площади", причем значению  $\theta = \pi$  соответствует состояние инверсии населенностей. Затем, по мере входа импульса на резонансную среду, все более увеличивается примесь основного состояния в суперпозиции состояний, и это приводит к деформации формы импульса, в основном, за счет роста длительности импульса. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока в слое с ПКТ не сформируется оптический импульс с  $\theta = 2\pi$ , временная форма которого описывается функцией гиперболического секанса. Первая  $\pi$ -половина такого  $2\pi$ -импульса инвертирует резонансную среду с ПКТ, а вторая  $\pi$ -половина возвращает ее в основное состояние. В результате подобный ультракороткий импульс (УКИ) распространяется в слое ПКТ без резонансных потерь. По аналогии с подобными нерезонансными сигналами это устойчивое энергетическое образование получило на-

именование "солитон". Процессы поглощения и переизлучения требуют затрат времени, поэтому групповая скорость распространения солитона меньше фазовой скорости света в резонансной среде (в ряде случаев – на несколько порядков). Явлению СИП присуща определенная кинетика деформации формы УКИ: сначала – уширение, затем – самосжатие, а далее – самоделение импульса на солитоны. Подробная теория СИП изложена в [24]. В данной работе речь идет об экситонной СИП в слое ПКТ. Поскольку теория ЭСИП на экситонах Ванье-Мотта изложена нами в [25, 26], а также в обзоре [27], то мы не будем рассматривать ее здесь, а уделим больше внимания конечным результатам, приведенным, например, в [28]. Было показано, что путем решения самосогласованной задачи для амплитуды и фазы поля, а также для поляризации среды, можно получить следующее уравнение для "площади" импульса

$$\frac{d\theta}{dz} = -\frac{\alpha}{2}\sin\theta , \qquad (1)$$

где  $\alpha = 4\pi \langle N_{ex} \rangle d_f^2 \omega g(0) (n\hbar c)^{-1}$ ,  $d_f$  — модуль электрического дипольного перехода *f*-го электронного перехода на *n*-ом атоме,  $\omega$  — частота возбуждающего лазерного излучения, g(0) — функция распределения параметра расстройки  $\Delta \omega = \omega_f - \omega$ , *n* — показатель преломления среды,  $N_{ex}$  — число экситонов, участвующих в процессе. Решение уравнения (1), носящего название "теоремы площадей", имеет вид

$$\theta(z) = 2 \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \left( \theta_0 / 2 \right) \exp \left( -\frac{1}{2} \alpha z \right) \right], \qquad (2)$$

где  $\theta_0$  — "площадь" импульса на входе в резонансную среду. Численный анализ решения (2) проведен в [24]. Там же показано, что необратимая релаксация следующим образом влияет на  $\theta$ при СИП:

$$\theta \approx 2\pi \left(1 - \frac{\tau_p}{T_2}\right),$$
(3)

где  $\tau_p$  – длительность импульса,  $T_2$  – время поперечной необратимой релаксации.

В работе [28], посвященной ЭСИП, показано, что при  $\theta_0 \ge \pi$  справедливо следующее выражение для групповой скорости импульса:

$$\upsilon = \frac{c}{n} \left[ 1 + \frac{2\pi\omega d_f^2 \langle N_{ex} \rangle \tau_p^0}{n^2 \hbar} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\Delta \omega) d(\Delta \omega)}{1 + (\Delta \omega \tau_p^0)^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где *с* — фазовая скорость света,  $\tau_{\rho}^{0}$  — длительность импульса на входе в резонансную среду,  $\langle N_{ex} \rangle$  — число экситонов Ванье—Мотта, участвующих в ЭСИП. Значение  $\langle N_{ex} \rangle$  — не может быть больше  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, поскольку при превышении этого зна-

чения начинается образование электронно-дырочной плазмы [29]. Ограничение на  $\langle N_{ex} \rangle$  заставляет ставить эксперимент по ЭСИП при температуре жидкого гелия и использовать лазерные импульсы пикосекундной длительности ( $\tau_n \approx 10^{-12}$  с). Тогда оценка значения групповой скорости импульса υ по формуле (4) при значениях, входящих в нее параметров: n = 1.5,  $d_f = 2 \cdot 10^{-18}$  ед. СГСЕ,  $\langle N_{ex} \rangle =$ =  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $\omega$  =  $3 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup>,  $\tau_p^0 = 10^{-12}$  с, дает значение групповой скорости  $\upsilon = \frac{c}{n5} \frac{1}{5} \text{ см/с}$ , при котором будет наблюдаться существенное замедление импульса. Отметим еще одно важное следствие теории: поскольку экситоны – бозоны, то явление ЭСИП будет отсутствовать, поэтому экситонов должно быть много. Тогда в коммутационных соотношениях экситонов будет присутствовать фермионная добавка, ответственная за кинематическое взаимодействие экситонов, а она, в свою очередь, вызовет появление ЭСИП.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность и обоснованы условия формирования экситонной когерентности и экситонных солитонов при короткоимпульсном лазерном возбуждении полупроводниковых квантовых точек. Рассмотрены механизмы возникновения явления самоиндуцированной прозрачности на экситонах Ванье—Мотта. Результаты исследования могут оказаться полезными при создании квантового вентиля на полупроводниковых квантовых точках [18].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-02-00545-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Magarian K.A., Fedyanin V.V., Karimullin K.R. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 478. Art. No. 012007.
- Магарян К.А., Михайлов М.А., Каримуллин К.Р. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 12. С. 1629; Magaryan К.A., Mikhailov М.А., Karimullin К.R. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. No. 12. P. 1336.
- Karimullin K.R., Mikhailov M.A., Georgieva M.G. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 951. Art. No. 012011.
- Karimullin K.R., Knyazev M.V., Arzhanov A.I. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 859. Art. No. 012010.
- 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. No. 12. Р. 1386.
- 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. No. 11. P. 1438.
- 7. *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V. et al.* // Laser Phys. 2019. V. 29. No. 12. Art. No. 124009.

- Еськова А.Е., Аржанов А.И., Магарян К.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 1. С. 48; Eskova A.E., Arzhanov A.I., Magaryan К.А. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 1. P. 40.
- Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Es'kova A.E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1461. Art. No. 012114.
- Knyazev M., Karimullin K., Naumov A. // Phys. Stat. Sol. (RRL). 2017. V. 11. No. 3. Art. No. 1600414.
- 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. No. 12. P. 1254.
- 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 Yu.G., Naumov A.V. // Opt. Spectr. 2013. V. 114. No. 6. Р. 859.
- 13. *Karimullin K., Knyazev M., Eremchev I. et al.* // Meas. Sci. Technol. 2013. V. 24. No. 2. Art. No. 027002.
- Осадько И.С. Флуктуирующая флуоресценция наночастиц. Москва: Физматлит, 2011. 315 с.
- Ikezawa M., Suto F., Masumoto Y. et al. // J. Lumin. 2007. V. 122–123. P. 730.
- Bera D., Qian L., Tseng T.K., Holloway P.H. // Materials. 2010. V. 3. P. 2260.
- Fedyanin V.V., Karimullin K.R. // Laser Phys. 2019.
   V. 29. No. 12. Art. No. 124008.
- Самарцев В.В., Камалова Д.И., Митрофанова Т.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1738; Samartsev V.V., Kamalova D.I., Mitrofanova T.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 12. P. 1574.
- Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г., Хасанов О.Х. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1609. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G., Khasanov O.K. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 12. Р. 1450.
- 20. Брюкнер Ф., Днепровский В.С., Кощуг Д.Г. // Письма ЖЭТФ. 1974. Т. 20. С. 10; Bruckner F., Dneprovskii V.S., Koshchug D.G. // JETP Lett. 1974. V. 20. Р.4.
- Брюкнер Ф., Васильев Я.Т., Днепровский В.С. и др. // ЖЭТФ. 1975. Т. 67. С. 2219; Bruckner F., Vasilev Ya.T., Dneprovskii V. S. // JETP. 1975. V. 40. P. 1101.
- 22. Давыдов А.С. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.
- Власов Р.А., Гадомский О.Н., Гадоская И.В., Самарцев В.В. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. № 6. С. 1938; Vlasov R.A., Gadomskii O.N., Gadomskaya I.V., Smartsev V.V. // JETP. 1986. V. 63. No. 6. Р. 1134.
- 24. McCall S.L., Hahn E.L. // Phys. Rev. 1969. V. 183. P. 457.
- 25. Samartsev V.V., Siraziev A.I., Sheibut Yu.E. // Spectrosc. Lett. 1973. V. 6. P. 659.
- Копвиллем У.Х., Самарцев В.В., Шейбут Ю.Е. Экситонная самоиндуцированная прозрачность в полупроводниках. Казань: КФ АН СССР, 1973.
- 27. Kopvillem U.Kh., Samartsev V.V., Sheibut Yu.E. // Phys. Stat. Sol. B. 1975. V. 70. P. 799.
- 28. Самарцев В.В., Сиразиев А.И., Шейбут Ю.Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37. С. 2175.
- 29. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры. Минск: Изд. "Университетское", 1988. 304 с.

# Excitonic self-induced transparency in a layer of semiconductor quantum dots

V. V. Samartsev<sup>a, \*</sup>, T. G. Mitrofanova<sup>a</sup>, O. Kh. Khasanov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia

<sup>b</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072 Belarus \*e-mail: dr samartsev39@mail.ru

The possibility and conditions for the occurrence of the phenomenon of self-induced transparency on Wannier–Mott excitons in a layer of semiconductor quantum dots of the CdSe/CdS/ZnS type are theoretically investigated.