*ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 2, с. 302–304*

*УДК 535.2*

# ДВУХКВАНТОВЫЕ ТРАНЗИЕНТ-ГОЛОГРАММЫ НА ЭКСИТОННЫХ УРОВНЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК[1]

**© 2021 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-производственное объединение "Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь*

**E-mail: dr_samartsev39@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.
После доработки 25.09.2020 г.
Принята к публикации 28.10.2020 г.

Теоретически исследованы возможность и условия записи и считывания двухквантовых транзиент-голограмм на экситонных уровнях полупроводниковых квантовых точек типа CdSe/CdS/ZnS.

**DOI:** 10.31857/S0367676521020241

## ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые квантовые точки (ПКТ) находят все большее применение в квантовой оптике [1]. На авторов данной статьи наибольшее впечатление произвели работы экспериментальной группы из Института спектроскопии РАН (Москва, Троицк) с двухоболочечными ПКТ CdSe/CdS/ZnS (пр-во QD-Light, Россия) размером 3–7 нм [2–8]. Отметим, что эти квантовые точки были выращены методом коллоидного синтеза так, что излучающее ядро CdSe оказалось окружено двумя оболочками из CdS и ZnS, улучшающими фотостабильность и квантовый выход ПКТ, Согласно [9], при возбуждении таких ПКТ лазерным излучением на длине волны 580 нм, соответствующей максимуму экситонного поглощения, время необратимой релаксации при температуре 10 K составляет 0.75 пс. Недавние работы [10–13] показывают, что для практических целей необходимо учитывать дисперсию ПКТ по размерам [10], а также концентрационные эффекты [11, 12] и влияние окружающей матрицы [13]. Кроме того, важно изучать механизмы быстропротекающих процессов в твердотельных нанокомпозитах [14, 15], в особенности, развивать теоретические подходы для описания эволюции экситонной когерентности [16–18].

Квантовые точки типа CdSe/CdS/ZnS характеризуются дискретным набором энергетических состояний, подобно атомам, из-за чего их нередко называют "искусственными атомами", а размеры таких ПКТ практически совпадают с размерами экситонов Ванье–Мотта [19] (см. также монографии [20, 21]). Поэтому нами было сделано предположение об экситонной природе наблюдавшихся в [6–9] когерентных явлений [17, 22]. Новизна данного теоретического рассмотрения состоит в том, что рабочими объектами являются экситоны, а не примесные центры (как в обзоре [23]). Кроме того, вслед за А.К. Ребане и его коллегами [24], мы считаем, что возбуждение ПКТ осуществляется в двухквантовом режиме двумя лазерными пучками пикосекундной длительности, один из которых – объектный (т.е. имеет неплоский волновой фронт), а другой – референтный. В этом режиме, при возбуждении ПКТ в области экситонного поглощения, лазер должен иметь длину волны 1160 нм. Для облегчения детектирования оптическая схема установки должна позволять каждому пучку иметь свой волновой вектор ($\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$), чтобы обеспечить угол между $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$, равный 60°. В этом случае реализуется режим формирования коррелированных транзиент-голограмм [25]. Таким образом, в данной статье речь идет об экситонной транзиент-голографии. Возбуждающие пучки формируют в области возбуждения ПКТ две "решетки" неравновесной экситонной поляризации, на которых рассеива-

[1] Данная статья была представлена для опубликования в тематическом выпуске "Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия" (см. № 12, том 84, 2020).

ются во взаимно-противоположных направлениях сигналы свободной экситонной индукции, волновой фронт которых совпадает с волновым фронтом объектного пучка.

## ЭКСИТОННАЯ ТРАНЗИЕНТ-ГОЛОГРАФИЯ НА ПКТ CdSe/CdS/ZnS

Двухквантовый режим возбуждения коррелированных сигналов свободной индукции (free induction decay – FID) рассмотрен в работе [26], а процесс формирования волнового фронта этих когерентных откликов изучен в [25]. Согласно [26] электрическое поле возбужденных в двухквантовом режиме коррелированных сигналов свободной индукции (FID) в приближении малых импульсных площадей может быть записано в виде:

$$\vec{E}_{FID}(t) = E_0^2\hbar^{-1}\Delta t Q\Phi_{FID}\mathrm{th}^2\frac{\hbar\omega}{2k_Б T} f \times \\ \times \sum_j^N \left[ e^{-i(\vec{k}_{FID}-\vec{k}_1+\vec{k}_2)\vec{r}_j} + e^{-i(\vec{k}_{FID}-\vec{k}_2+\vec{k}_1)\vec{r}_j} \right], \quad (1)$$

где $\vec{E}_0$ – амплитуда электрического поля, $\Delta t$ – длительность возбуждающих импульсов, $Q$ – параметр двухквантового возбуждения, $\Phi_{FID}$ – форм-фактор формы FID, $\omega$ – частота возбуждения, $k_Б$ – параметр Больцмана, $T$ – рабочая температура, $f \approx 1$ – параметр, регулирующий размерность, $N$ – число участвующих экситонов.

При формировании двухквантовых коррелированных транзиент-голограмм (correlated transient holograms – CTH) один из возбуждающих пучков является объектным и имеет неплоский волновой фронт:

$$\vec{E}_1(\vec{r}_j,t) = \sum_{\eta=1}^{m} \vec{E}_{0_\eta}^{(1)} \exp\left\{ i\left[ \omega t - \vec{k}_1\vec{r}_j - \varphi_1(\vec{r}) \right] \right\} \quad (2)$$

(где $\vec{E}_{0_\eta}^{(1)}$, $\omega$ и $\varphi_1(\vec{r})$ – амплитуда электрического поля, частота возбуждения и фаза объектной волны) и, согласно правил транзиент-голографии, его электрическое поле должно быть разложено в ряд Фурье по плоским волнам. Второй пучок – референтный, с плоским волновым фронтом

$$\vec{E}_2(\vec{r}_j,t) = \vec{E}_0^{(2)} \exp\left\{ i\left[ \omega t - \vec{k}_2\vec{r}_j - \varphi_2(\vec{r}) \right] \right\}, \quad (3)$$

и не требует разложения. Здесь $\vec{E}_0^{(2)}$ – амплитуда электрического поля, $\omega$ – частота возбуждения, $\varphi_2(\vec{r})$ – фаза референтной волны. Параметры $\varphi_1(\vec{r})$ и $\varphi_2(\vec{r})$ определяют волновые фронты соответствующих пучков.

Согласно [25] электрическое поле двухквантовой коррелированной транзиент-голограммы имеет вид:

$$\vec{E}_{CTH}(\vec{r},t) = \vec{E}_0(\vec{r})\{\exp[-i(\vec{k}_1 - \vec{k}_2 - \vec{k}_{CTH})\vec{r} - \\ - [\omega(t-\Delta t) - (\varphi_{CTH}(\vec{r}) - \varphi_1(\vec{r}) + \varphi_2(\vec{r}))] + \\ + \exp[-i(\vec{k}_2 - \vec{k}_1 - \vec{k}_{CTH})\vec{r} - \omega(t-\Delta t) - \\ - (\varphi_{CTH}(\vec{r}) - \varphi_2(\vec{r}) + \varphi_1(\vec{r}))]\}, \quad (4)$$

где $\vec{E}_0(\vec{r}) = E_0^{(1)}E_0^{(2)}\hbar^{-1}\Delta t Q\Phi_{CTH}\mathrm{th}^2\frac{\hbar\omega}{2k_Б T} f e^{-(t-\Delta t)/T_2}$, $T_2$ – время фазовой релаксации. Видно, что коррелированные сигналы экситонной свободной индукции (EFID1 и EFID2) распространяются во взаимно противоположных направлениях:

$$\vec{k}_{EFID1} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 \ \text{ и } \ \vec{k}_{EFID2} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (5)$$

и имеют обращенные волновые фронты:

$$\varphi_{CTH1}(\vec{r}) = \varphi_1(\vec{r}) \ \text{ и } \ \varphi_{CTH2}(\vec{r}) = -\varphi_1(\vec{r}). \quad (6)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана возможность записи и считывания двухквантовых экситонных транзиент-голограмм. Возникает вопрос о природе экситонов в ПКТ CdSe/CdS/ZnS, о которых идет речь в работах [6–9]. Если бы речь шла о свободных экситонах Ванье-Мотта, то время необратимой релаксации $T_2$ составляло бы 5 фс [27]. В нашем случае $T_2$ экситонов равно 1 пс, т.е. мы имеем дело с локализованными экситонами Ванье–Мотта. Поэтому и теория таких транзиент-голограмм на ансамбле экситонов такая же, что и у примесных центров [23] (см. также монографию [28]). Заметим, что лазерное возбуждение и считывание когерентных откликов с плоских пленочных образцов удобно вести с помощью призм полного внутреннего отражения [29].

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № АААА-А18-118030690040-8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bera D., Qian L., Tseng T.K., Holloway P.H.* // Materials. 2010. V. 3. P. 2260.
2. *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. No 12. P. 1336.
3. *Karimullin K.R., Mikhailov M.A., Georgieva M.G. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 951. Art. No 012011.
4. *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., Vasilieva I.A., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 126. No 1. P. 41.

5. *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. Spectrosc. 2013. V. 114. No 6. P. 859.
6. *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. P. 1386.
7. *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Arzhanov A.I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 859. Art. No 012010.
8. *Аржанов А.И., Каримуллин К.Р., Наумов А.В.* // Кр. сооб. 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. No 3. P. 91.
9. *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.
10. *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Eremchev I.Yu. et al.* // Laser Phys. 2019. V. 29. No 12. Art. No 124009.
11. *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 K.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No 1. P. 40.
12. *Eskova A.E., Arzhanov A.I., Magaryan K.A. et al.* // EPJ Web Conf. 2020. V. 220. Art. No 03014.
13. *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Es'kova A.E. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1461. Art. No 012114.
14. *Fedyanin V.V., Karimullin K.R.* // Laser Phys. 2019. V. 29. No 12. Art. No 124008.
15. *Федянин В.В., Каримуллин К.Р.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 3. С. 361.
16. *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. P. 1450.
17. *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.
18. *Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г., Хасанов О.Х.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 12. С. 1729; *Samartsev V.V., Mitrofanova T.G., Khasanov O.K.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No 12. P. 1469.
19. *Ikezawa M., Nairs S., Masumoto Y. et al.* // J. Lumin. 2007. V. 122–123. P. 809.
20. *Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики. Москва: Физматлит, 2009. 482 с.
21. *Осадько И.С.* Флуктуирующая флуоресценция наночастиц. Москва: Физматлит, 2011. 315 с.
22. *Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1283. Art. No 012012.
23. *Nefediev L.A., Samartsev V.V.* // Laser Phys. 1992. V. 2. P. 617.
24. *Rebane A.K., Drobizhev M., Karotki A.* // J. Lumin. 2002. V. 98. P. 341.
25. *Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 714. Art. No 012014.
26. *Leontiev A.V., Lobkov V.S., Mitrofanova T.G. et al.* // Laser Phys. Lett. 2012. V. 9. P. 654.
27. *Нолль Г., Зингер У., Шевель С.Г., Гебель Э.О.* // Письма ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 361; *Noll G., Sienger W., Shevel S.G., Gobel E.O.* // JETP Lett. 1990. V. 51. No 7. P. 409.
28. *Евсеев И.В., Рубцова Н.Н., Самарцев В.В.* Когерентные переходные процессы в оптике. М.: Физматлит, 2009. 536 с.
29. *Власов Р.А., Гадомский О.Н., Гадомская 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. P. 1134.

## Two-quantum transient holograms on the exciton levels of semiconductor quantum dots

**V. V. Samartsev[a, *], T. G. Mitrofanova[a], O. Kh. Khasanov[b]**

[a] *Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia*

[b] *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 the conditions of the recording and reading out of two-quantum transient holograms on the exciton levels of the semiconductor quantum dots of CdSe/CdS/ZnS type are studied theoretically.