

УДК 535.2

## КОРРЕЛИРОВАННЫЕ НАВЕДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ И СПИНОВЫЕ «РЕШЕТКИ» В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ CdSe/CdS

*В.В. Самарцев, Т.Г. Митрофанова*

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН,  
г. Казань, 420029, Россия*

### Аннотация

Показана возможность и рассмотрены условия наведения в полупроводниковой пленке с наночастицами CdSe/CdS (являющимися квантовыми точками) коррелированных электронных и спиновых «решеток», причем наведение коррелированных спиновых «решеток» на квантовых точках рассмотрено впервые. Возбуждение пленки CdSe/CdS предлагается осуществлять в условиях двухквантового режима двумя скрещенными (под углом  $60^\circ$ ) фемтосекундными лазерными пучками, благодаря чему в области возбуждения пленки одновременно формируются две неравновесные «решетки». В случае, когда поляризации возбуждающих фемтосекундных импульсов одинаковы, в среде формируются наведенные электронные «решетки». Если же поляризации возбуждающих импульсов взаимно перпендикулярны, то формируются наведенные спиновые «решетки». Те же фемтосекундные импульсы возбуждают электроны наночастиц CdSe/CdS в суперпозиционное состояние, в котором они генерируют сигнал свободно-индуцированного спада (free induction decay), играющий в предлагаемой экспериментальной схеме роль пробного импульса. Сигнал свободно-индуцированного спада дифрагирует на индуцированных лазерным излучением «решетках» в двух взаимно противоположных направлениях. Дифрагированные сигналы будут полностью коррелированными, то есть идентичными. Их волновой фронт может нести коррелированные динамические голограммы. В работе обсуждаются и другие возможные приложения коррелированных «решеток» (в спинтронике и когерентной фемтосекундной лазерной спектроскопии).

**Ключевые слова:** коррелированные сигналы, квантовые точки, наведенные электронные и спиновые «решетки», поляризация, схема совпадений, время необратимой релаксации, когерентная спектроскопия, спинтроника

### Введение

Ранее, в работах [1, 2], нами экспериментально изучались динамические «решетки» [3] электронов и их спинов, наведенные в гетероструктуре GaAs/AlGaAs скрещенными фемтосекундными пучками, а также обсуждалось их использование в фемтосекундной когерентной спектроскопии и спинтронике. Причиной появления настоящего исследования явилось то обстоятельство, что устройства и чипы памяти, в основе которых лежит управление спинами электронов, оказались более быстродействующими и энергетически выгодными, чем их электронные аналоги. Из двух известных способов изучения спиновой степени свободы (электрического и оптического) наиболее удобным является оптический способ, которому мы будем следовать в настоящей работе. В [4, 5] наши фемтосекундные эксперименты были

продолжены с использованием так называемых наведенных электронных и спиновых «решеток» и получена спектроскопическая информация о скорости распада  $T_{gr}$  неравновесных «решеток», а также о коэффициентах диффузии  $D$  электронов и их спинов.

Обратимся теперь к цели данной работы. Экспериментально было показано [6], что в образце CdS в условиях двухквантового возбуждения двумя скрещенными фемтосекундными пучками с волновыми векторами  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  (при наличии угла  $\varphi = 60^\circ$  между ними) одновременно формируются две неравновесные коррелированные «решетки»:  $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ , на которых рассеиваются два противоположно направленных сигнала свободно-индуцированного спада (Free Induction Decay, FID). Возникает вопрос, нельзя ли методику коррелированных сигналов свободно-индуцированного спада [6] перенести на случай наведенных электронных и спиновых «решеток» [4, 5] с параллельными и перпендикулярными поляризациями возбуждающих лазерных пучков. В настоящей работе мы покажем, что это можно сделать в случае наноструктурированного образца CdSe/CdS.

### 1. Коррелированные сигналы свободно-индуцированного спада в наноструктурированных образцах CdSe/CdS

В экспериментальной работе [7] мы сообщали о синтезе и исследовании полупроводниковых наночастиц типа «ядро – оболочка» CdSe/CdS, где в качестве ядер выступали наночастицы CdSe. Было установлено, что наличие оболочки из CdS приводило к росту люминесценции в восемь раз, а сам процесс люминесценции был связан с предварительным двух- и трехквантовым поглощением фотонов излучения титан-сапфирового лазера (на длине волны  $\lambda = 800$  нм).

Первые люминесцентные эксперименты на нанобразцах CdS (с предварительным трехфотонным поглощением-излучением того же лазера) проводились в 2004 г. Дж. Чоном и М. Гу [8]. Схема энергетических зон наночастиц CdSe/CdS и рабочие переходы обсуждались нами в работе [9]. В результате трехфотонного поглощения наночастицы возбуждались в зону проводимости ЗП2, а затем за счет безызлучательного перехода ЗП2  $\rightarrow$  ЗП1 они оказывались в зоне проводимости ЗП1, из которой и люминесцировали на длине волны 540 нм в валентную зону ВЗ, что подтверждено экспериментально [7, 8]. При фемтосекундном возбуждении на переходе ЗП1  $\rightarrow$  ВЗ формируются одновременно две неравновесные коррелированные «решетки» ( $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ ), на которых и рассеиваются в противоположных направлениях два коррелированных сигнала FID на длине волны 540 нм.

В чем причина возникновения двух коррелированных «решеток» и, соответственно, двух сигналов FID в направлениях  $\mathbf{k}_{FID1} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_{FID2} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$  при возбуждении фемтосекундными пучками с волновыми векторами  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$ ? Экспериментально установлено, что для того чтобы электрон оказался в зоне проводимости ЗП1, необходимы два фотона излучения титан-сапфирового лазера. Но следует принять во внимание направления волновых векторов импульсов. Поскольку волновые векторы возбуждающих импульсов действуют под углом  $60^\circ$  друг к другу, определенная их направленность к поверхности образца (скажем,  $\mathbf{k}_1$  действует справа, а  $\mathbf{k}_2$  – слева) формирует одну из двух неравновесных «решеток»:  $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ . Поскольку, в принципе, фотоны равноправны, то на соседнем электроне также будет реализовано двухфотонное поглощение и сформируется другая неравновесная «решетка»:  $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ . Наконец, чтобы обеспечить одновременность и идентичность процесса дифракции когерентных сигналов на сформированных «решетках», должен существовать подтвержденный экспериментально механизм, связывающий эти два возбужденных электрона в пары. Такую пару можно назвать ЭПР-парой

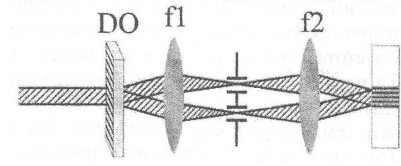


Рис. 1. Устройство для записи наведенных «решеток», состоящее из дифракционной оптики (DO) и конфокальной системы линз

(то есть парой Эйнштейна–Подольского–Розена [10]). Наночастицы CdSe/CdS, средний размер которых составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  см, являются квантовыми точками, а возбужденные электроны – экситонами [11]. Согласно экспериментальной работе [12], механизм, связывающий два экситона в пару, – биэкситонный. В силу того, что описываемые нами фемтосекундные эксперименты проводились при комнатной температуре, значительное влияние на этот механизм оказывают фононы, что требует учета влияния кулоновской экранировки [13]. Поскольку угол между  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  равен  $60^\circ$ , рассеянные на неравновесных «решетках» ( $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ ) когерентные сигналы FID1 и FID2 будут распространяться вдоль образца в противоположных направлениях и иметь ту же длину волны  $\lambda$ , что и возбуждающее излучение (так как волновые векторы  $\mathbf{k}_1$ ,  $\mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_{\text{FID}}$  образуют равносторонний треугольник). Таким образом, мы имеем столько же сигналов, сколько и поглощенных пар фотонов, и, следовательно, закон сохранения энергии будет выполняться. Для проверки коррелированности сигналов  $\mathbf{k}_{\text{FID1}}$  и  $\mathbf{k}_{\text{FID2}}$  фотодетекторы, фиксирующие эти сигналы, соединяем через общую схему совпадений.

## 2. Коррелированные наведенные электронные и спиновые «решетки» в наноструктурах CdSe/CdS и дифракция когерентных сигналов на них

Наведенные электронные и спиновые «решетки» записывались нами с помощью устройства, изображенного на рис. 1 [2, 4, 5]. Оно включает в себя дифракционную оптику (DO), предназначенную для деления лазерного пучка на два и фактически представляющую собой специально изготовленную дифракционную «решетку», которая способна направить до 30% энергии в дифракционные порядки. Фокусирующая система состоит из двух линз с фокальными длинами  $f_1$  и  $f_2$ .

В зависимости от того, какую наведенную «решетку» (электронов или их спинов) мы хотим записать, электрические поля (то есть поляризации) лазерных пучков  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  должны быть направлены по-разному. Спектроскопия наведенных «решеток» является экспериментальным методом, способным селективно создавать, а затем исследовать флуктуации зарядовой плотности. При параллельных поляризациях фемтосекундных пучков получим наведенную динамическую «решетку» электронов, а при взаимно перпендикулярных поляризациях – наведенную «решетку» спинов. Обсудим этот вопрос подробнее.

Интерференция двух одинаковых лазерных пучков, пересекающихся в образце под углом  $\theta$ , приводит к образованию стоячей волны в плоскости образца, если поля  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  взаимодействующих волн параллельны:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}'_1 e^{i\omega t + \varphi_1} + \mathbf{E}'_2 e^{i\omega t + \varphi_2},$$

где  $\mathbf{E}'_1$  и  $\mathbf{E}'_2$  – векторы поляризации возбуждающих волн,  $\omega$  и  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – частота и фазы этих волн соответственно. Усредненная интенсивность суммарного поля

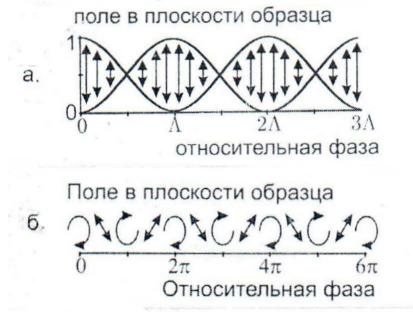


Рис. 2. Наведенные «решетки» неравновесных электронов (а) и их спинов (б): а – распределение электрического поля в области перекрытия лазерных импульсов с параллельной поляризацией; б – распределение электрического поля в области перекрытия лазерных импульсов со взаимно перпендикулярными поляризациями

в образце пропорциональна  $(\mathbf{E}'_1 + \mathbf{E}'_2)^2$  и равна

$$I = \mathbf{E}'_1{}^2 + \mathbf{E}'_2{}^2 + 2(\mathbf{E}'_1 \cdot \mathbf{E}'_2)e^{\Delta\varphi},$$

где  $\Delta\varphi$  – разность фаз возбуждающих импульсов. В этом случае образуется периодическая структура – «решетка» возбужденных электронов, повторяющая пространственное распределение электрического поля волн. Распределение электрического поля в области перекрытия лазерных импульсов с параллельной поляризацией изображено на рис. 2, а.

Обсудим второй режим, когда индуцирующие неравновесную «решетку» импульсы имеют взаимно перпендикулярные поляризации. В этом случае величина суммарного поля распределена пространственно равномерно. Однако, поляризация в этом случае оказывается промодулированной, меняясь от правой круговой до левой круговой. Например, если лучи поляризованы вдоль осей  $X$  и  $Y$ , то полное электрическое поле (в базисе круговой поляризации) записывается в виде:

$$\mathbf{E} \propto \mathbf{E}_+ \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) + \mathbf{E}_- \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $\mathbf{E}_{\pm} = \mathbf{E}_x \pm i\mathbf{E}_y$ ,  $\phi$  – фаза, а интенсивность  $I$  электромагнитного поля в образце удовлетворяет соотношению:

$$I \propto I_+ \cos^2\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) + I_- \sin^2\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $I_{\pm}$  – интенсивность волны с правой и левой круговыми поляризациями. Таким образом, электрическое поле в образце представляет собой сумму стоячих волн с правой и левой круговыми поляризациями, фазы которых сдвинуты друг относительно друга на четверть волны. Распределение электрического поля (поляризации) стоячей волны у спиновых «решеток» изображено на рис. 2, б. На этих наведенных «решетках» дифрагируют когерентные сигналы свободно-индуцированного спада (FID1 и FID2), в наших условиях выполняющие роль пробного импульса. Поляризация сигналов FID не меняется при дифракции на наведенной электронной «решетке». Однако при дифракции на наведенной спиновой «решетке» поляризация FID поворачивается на угол  $\pi/2$ . Наличие наведенных электронных и спиновых «решеток» может быть проверено по дифракции на них сигналов FID1 и FID2 в схеме, приведенной на рис. 3.

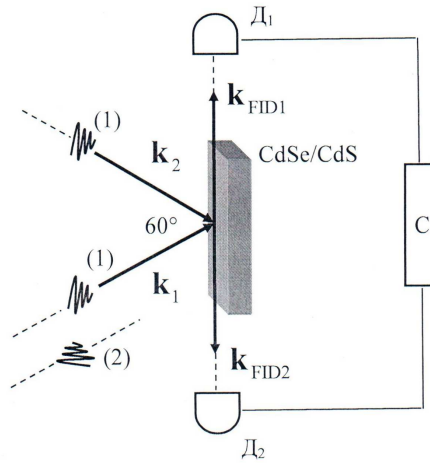


Рис. 3. Дифракция коррелированных когерентных сигналов FID1 и FID2 на одновременно наведенных (фемтосекундными импульсами  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$ ) ЭПП-«решетках». Обозначения:  $D_1$  и  $D_2$  – фотодетекторы, CdSe/CdS – образец, С – схема совпадений. Рассмотрены параллельный (1) и перпендикулярный (2) варианты поляризаций возбуждающих импульсов. Вариант (2) соответствует записи спиновых «решеток»

Период наведенных «решеток» может быть найден по формуле:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)},$$

где  $\lambda$  – длина волны возбуждающих импульсов (800 нм),  $\alpha$  – угол перекрытия между лазерными пучками [2]. В условиях, когда одновременно с релаксацией учитывается диффузия электронов (спинов), характеристическое время распада «решеток»  $T_{gr}$  рассчитывается с помощью выражения:

$$\frac{1}{T_{gr}} = \frac{8\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{2}{T_1},$$

где  $T_1$  – время релаксации электронов (спинов) в основное состояние (оно может быть найдено из спада интенсивности сигналов FID),  $D$  – коэффициент диффузии электронов (спинов). Интенсивность дифрагированного отклика пропорциональна экспоненте:

$$I(t) \propto \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{1}{T_1} \right) t \right].$$

В случае, когда процессы релаксации и диффузии протекают на сопоставимых временных масштабах, может быть использован следующий способ разделения вкладов. Измеряется спад за счет  $T_1$  при варьировании угла  $\alpha$  между лазерными пучками. Угол  $\alpha$  задает период «решетки»  $\Lambda$ . Поэтому компонента спада, отвечающая за диффузию, будет отличаться в каждом измерении, в то время как скорость релаксации электронов (спинов)  $T_1$  будет неизменной. В итоге, в эксперименте определяется и коэффициент диффузии, и время релаксации. Так, в эксперименте [2] на гетероструктуре GaAs/AlGaAs были получены значения: для электронов –  $D = 200 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $T_1 = 3 \text{ нс}$ ; для спинов –  $D = 163.2 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $T_1 = 50.7 \text{ пс}$ . Различие в значениях  $D$  у электронов и их спинов объясняется тем, что при столкновении электронов, обладающих спинами разных знаков, направление

тока зарядов сохраняется, а направление спинового тока изменяется на противоположное. Подобные измерения могут быть проведены и на нанобразцах CdSe/CdS. Возникает вопрос: как быть с устройством, изображенным на рис. 1, при создании наведенной спиновой «решетки»? Для решения этой проблемы на выходе из устройства на пути одного из пучков можно поставить поляризатор Глана–Тейлора. В силу того, что возбуждение наноструктурированных образцов (типа CdSe/CdS) носит двухквантовый характер, в выражении для фактора двухквантового перехода [14] при перпендикулярных поляризациях возбуждающих пучков, казалось бы, должен возникнуть нулевой множитель. Но это не так, поскольку в отношении образца угол импульсных воздействий равен  $60^\circ$ .

### Заключение

Новизна настоящей работы по сравнению с [6] состоит в том, что возбуждающие фемтосекундные пучки поляризованы и в том, что подобные эксперименты предлагается поставить на квантовых точках CdSe/CdS. Принимая во внимание наши предыдущие исследования в этом направлении [9, 15–18], можно сделать вывод, что сформировано новое направление коррелированных когерентных откликов (типа FID), дифрагированных на коррелированных наведенных «решетках», которые могут быть эффективно использованы в фемтосекундной когерентной спектроскопии и спинтронике [19]. Под коррелированностью когерентных откликов мы понимаем их идентичность в двух каналах, в которых могут формироваться коррелированные динамические голограммы [20] или коррелированные временные последовательности [21].

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Актуальные проблемы физики низких температур», также Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-02-00701а).

### Литература

1. *Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Петрушкин С.В., Самарцев В.В.* Фемтосекундные когерентные переходные процессы в полупроводниках и гетероструктурах и возможность создания полупроводникового лазерного рефрижератора // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2010. – Т. 152, кн. 2. – С. 87–97.
2. *Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Самарцев В.В.* Фемтосекундная диагностика ультрабыстрых процессов в гетероструктуре GaAs/AlGaAs с использованием дифракционной оптики // Материалы 6-й Межд. науч. школы «Наука и инновации – 2011». – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2011. – С. 98–100.
3. *Моисеев С.А., Невельская Н.Л., Штырков Е.И.* Оптические переходные решетки в средах с фазовой памятью // Оптика и спектроскопия. – 1995. – Т. 79, № 3. – С. 382–416.
4. *Leontyev A.V., Ivanin K.V., Mitrofanova T.G., Lobkov V.S., Samartsev V.V.* Electron dynamics at GaAs-AlGaAs heterojunction studied by ultrafast spectroscopy // J. Phys.: Conf. Ser. – 2013. – V. 478. – Art. 012020, P. 1–4. – doi: 10.1088/1742-6596/478/1/012020.
5. *Леонтьев А.В., Иванин К.В., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Хасанов О.Х.* Фемтосекундная когерентная спектроскопия четырехволнового смещения и спектроскопия наведенных «решеток» в полупроводниковых гетероструктурах (типа GaAs/AlGaAs) при комнатной температуре // Изв. РАН. Сер. Физ. – 2014. – Т. 78, № 3. – С. 276–279.
6. *Leontiev A.V., Lobkov V.S., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Shmelev A.G.* “Entangled” free-induction decay in CdS crystal under two-photon excitation by two

- crossed laser beams // *Laser Phys. Lett.* – 2012. – V. 9, No 9. – P. 654–657. – doi: 10.7452/lapl.201210055.
7. *Жарков Д.К., Шмелев А.Г., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Самарцев В.В.* Люминесцентные свойства полупроводниковых наноструктур на основе CdS и CdSe // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XVIII Межд. молодеж. науч. шк.: Сб. ст. – Казань: Казан. ун-т, 2014. – С. 109–112.
  8. *Chon J.W.M., Gu M.* Three-photon excited band edge and trap emission of CdS semiconductor nanocrystals // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – V. 84, No 22. – P. 4472–4475. – doi: 10.1063/1.1755420.
  9. *Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.* Correlated stimulated photon echo signals under three-photon femtosecond excitation of CdSe-CdS colloidal quantum dots // *Laser Phys.* – 2016. – V. 26, No 12. – Art. 125203, P. 1–4. – doi: 10.1088/1054-660X/26/12/125203.
  10. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? // *Phys. Rev.* – 1935. – V. 47. – P. 777–780. – doi: 10.1103/PhysRev.47.777.
  11. *Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики. – М.: Физматлит, 2009. – 482 с.
  12. *Hillmann F., Voight J., Redlin H.* Two-photon excited photon echo in CdS // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V. 77, No 25. – P. 4181–4183. – doi: 10.1063/1.1335847.
  13. *Samartsev V.V.* Correlated photons and their applications. – Cambridge (UK): CISP, 2015. – 182 p.
  14. *Boyd R.W.* Nonlinear optics. – San-Diego: Acad. Press, 1992. – 439 p.
  15. *Леонтьев А.В., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Хасанов О.Х.* Двухквантовый коррелятор фотонов в режиме свободно индуцированного спада в сульфиде кадмия при комнатной температуре // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 1. – С. 90–98.
  16. *Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G.* Femtosecond correlated photon echo in CdS crystal under two-photon excitation by two pairs of crossed laser beams // *Laser Phys.* – 2015. – V. 25, No 7. – Art. 075202, P. 1–4. – doi: 10.1088/1054-660X/25/7/075202.
  17. *Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.* Correlated signals of the accumulated photon echo on CdSe–CdS quantum dots // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – V. 859. – Art. 012014, P. 1–5. – doi: 10.1088/1742-6596/859/1/012014.
  18. *Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.* Correlated signals of cluster superfluorescence under two- and three-photon excitation of CdSe/CdS nanostructures // *EPJ Web of Conf.* – 2017. – V. 161. – Art. 03011. – doi: 10.1051/epjconf/201716103011.
  19. *Zutic I., Fabian J., Das Sarma S.* Spintronics: Fundamentals and applications // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V. 76, No 2. – P. 323–410.
  20. *Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G.* Femtosecond correlated transient holography in CdS crystal under two-quantum excitation // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – V. 714. – Art. 012014, P. 1–5. – doi: 10.1088/1742-6596/714/1/012014.
  21. *Самарцев В.В., Никифоров В.Г.* Фемтосекундная лазерная спектроскопия. – М.: Тривант, 2017. – 401 с.

Поступила в редакцию  
23.11.17

**Самарцев Виталий Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
E-mail: [samartsev@kfti.knc.ru](mailto:samartsev@kfti.knc.ru)

**Митрофанова Татьяна Геннадьевна**, научный сотрудник

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
E-mail: [tagemi@mail.ru](mailto:tagemi@mail.ru)

---

---

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.  
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 116–125

---

---

## Correlated Induced Electron and Spin “Gratings” in Nanostructured CdSe/CdS

*V. V. Samartsev\**, *T. G. Mitrofanova\*\**

*Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan Scientific Center,*

*Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia*

E-mail: *\*samartsev@kfti.knc.ru, \*\*tagemi@mail.ru*

Received November 23, 2017

### Abstract

The possibility and the conditions of the formation of correlated “gratings” of electrons and their spins in a semiconductor film containing CdSe/CdS nanoparticles (which are the quantum dots) have been studied. Notably, the induction of electron spin “gratings” on quantum dots has been considered for the first time. We have suggested to perform an excitation of the film in the two photon absorption mode using two crossed (at an angle of  $60^\circ$ ) femtosecond laser beams. As a result of the excitation, two nonequilibrium “gratings” are induced simultaneously in the excitation area of the film. If the exciting pulses have the same polarizations, then induced “gratings” of electrons are formed. However, in the case when the exciting pulses have mutually orthogonal polarizations, the formation of induced “gratings” of electron spins takes place. The same exciting pulses excite the electrons of CdSe/CdS nanoparticles into a superposition state. Then the free induction decay signal is generated. This signal being diffracted by induced “gratings” plays the role of a probe pulse in the suggested experimental scheme. The diffracted signals propagating in two mutually opposite directions are correlated (i.e., they are identical). Their wavefronts can carry the correlated transient holograms. Other possible applications of correlated “gratings” (in spintronics and in coherent femtosecond laser spectroscopy) are also discussed.

**Keywords:** correlated signals, quantum dots, induced electron and spin “gratings”, polarization, coincidence scheme, nonreversible relaxation time, coherent spectroscopy, spintronics

**Acknowledgments.** The study was supported by the Program of the Presidium of Russian Academy of Sciences “Current Problems of Low Temperature Physics” and by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-02-00701a).



### Figure Captions

Fig. 1. A device made of diffraction optics (DO) and confocal lens system for recording the induced “gratings”.

Fig. 2. The induced “gratings” of non-equilibrium electrons (*a*) and their spins (*b*): *a* – electric field distribution in the area of overlapping between laser impulses with parallel polarization; *b* – electric field distribution in the area of overlapping between laser impulses with mutually perpendicular polarizations.

Fig. 3. The diffraction of the correlated coherent signals FID1 and FID2 on the simultaneously induced (with the femtosecond impulses  $\mathbf{k}_1$  and  $\mathbf{k}_2$ ) EPR “gratings”. Designations:  $D_1$  and  $D_2$  – photodetectors, CdSe/CdS – sample, S – coincidence circuit. The parallel (1) and perpendicular (2) variants of polarization of excitation impulses. Variant (2) corresponds to the record of spin “gratings”.

### References

1. Ivanin K.V., Leontiev A.V., Lobkov V.S., Petrushkin S.V., Samartsev V.V. Femtosecond coherent transient processes in semiconductors and heterostructures and the possibility of creation of semiconductor laser refrigerator. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2010, vol. 152, no. 2, pp. 87–97. (In Russian)
2. Ivanin K.V., Leontiev A.V., Lobkov V.S., Samartsev V.V. Femtosecond diagnostics of ultrafast processes in GaAs/AlGaAs heterostructure using diffraction optics. *Materialy 6-i Mezhd. nauch. shkoly "Nauka i innovatsii-2011"* [Proc. 6th Int. Sci. Sch. "Science and Innovations-2011"]. Yoshkar-Ola, Marii. Gos. Univ., 2011, pp. 98–100. (In Russian)
3. Moiseev A.A., Nevel'skaya N.L., Shtyrkov E.I. Transient light-induced gratings in media with phase memory: A review. *Opt. Spectrosc.*, 1995, vol. 79, no. 3, pp. 352–383.
4. Leontyev A.V., Ivanin K.V., Mitrofanova T.G., Lobkov V.S., Samartsev V.V. Electron dynamics at GaAs-AlGaAs heterojunction studied by ultrafast spectroscopy. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, vol. 478, art. 012020, pp. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/478/1/012020.
5. Leontyev A.V., Ivanin K.V., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Khasanov O.Kh. Femtosecond coherent spectroscopy of four-wave mixing and the spectroscopy of transient gratings in GaAs/AlGaAs semiconductor heterostructures at room temperature. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, 2014, vol. 78, no. 3, pp. 180–183. doi: 10.3103/S1062873814030125.
6. Leontiev A.V., Lobkov V.S., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Shmelev A.G. “Entangled” free-induction decay in CdS crystal under two-photon excitation by two crossed laser beams. *Laser Phys. Lett.*, 2012, vol. 9, no. 9, pp. 654–657. doi: 10.7452/lapl.201210055.
7. Zharkov D.K., Shmelev A.G., Leontiev A.V., Lobkov V.S., Samartsev V.V. Luminescent properties of semiconductor nanostructures based on CdS and CdSe. In: *Kogerentnaya optika i opticheskaya spektroskopiya: XVIII Mezhd. molodezh. nauch. shk.: Sb. st.* [Coherent Optics and Optical Spectroscopy: Proc. XVIII Int. Youth Sci. Sch.: Collection of Papers]. Kazan, Kazan. Univ., 2014, pp. 109–112. (In Russian)
8. Chon J.W.M., Gu M. Three-photon excited band edge and trap emission of CdS semiconductor nanocrystals. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 84, no. 22, pp. 4472–4475. doi: 10.1063/1.1755420.
9. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G. Correlated stimulated photon echo signals under three-photon femtosecond excitation of CdSe-CdS colloidal quantum dots. *Laser Phys.*, 2016, vol. 26, no. 12, art. 125203, pp. 1–4. doi: 10.1088/1054-660X/26/12/125203.
10. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.*, 1935, vol. 47, pp. 777–780. doi: 10.1103/PhysRev.47.777.

11. Novotnyi L., Hecht B. *Osnovy nanooptiki* [Principles of Nano-Optics]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 482 p. (In Russian)
12. Hillmann F., Voight J., Redlin H. Two-photon excited photon echo in CdS. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 77, no. 25, pp. 4181–4183. doi: 10.1063/1.1335847.
13. Samartsev V.V. *Correlated Photons and Their Applications*. Cambridge, UK, CISP, 2015. 182 p.
14. Boyd R.W. *Nonlinear Optics*. San-Diego, Acad. Press, 1992. 439 p.
15. Leontiev A.V., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Khasanov O.Kh. Two-quantum photon correlator under the regime of free-induction decay in CdS at room temperature. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2013, vol. 155, no. 1, pp. 90–98. (In Russian)
16. Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G. Femtosecond correlated photon echo in CdS crystal under two-photon excitation by two pairs of crossed laser beams. *Laser Phys.*, 2015, vol. 25, no. 7, art. 075202, pp. 1–4. doi: 10.1088/1054-660X/25/7/075202.
17. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G. Correlated signals of the accumulated photon echo on CdSe–CdS quantum dots. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 859, art. 012014, pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/859/1/012014.
18. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G. Correlated signals of cluster superfluorescence under two- and three-photon excitation of CdSe/CdS nanostructures. *EPJ Web of Conf.*, 2017, vol. 161, art. 03011. doi: 10.1051/epjconf/201716103011.
19. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, vol. 76, no. 2, pp. 323–410.
20. Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G. Femtosecond correlated transient holography in CdS crystal under two-quantum excitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016. – V. 714. – Art. 012014, P. 1–5. – doi: 10.1088/1742-6596/714/1/012014.
21. Samartsev V.V., Nikiforov V.G. *Femtosekundnaya lazernaya spektroskopiya* [Femtosecond Laser Spectroscopy]. Moscow, Trovant, 2017. 401 p. (In Russian)

---

⟨ **Для цитирования:** Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г. Коррелированные наведенные электронные и спиновые «решетки» в наноструктурированных образцах CdSe/CdS // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 116–125. ⟩

⟨ **For citation:** Samartsev V.V., Mitrofanova T.G. Correlated induced electron and spin “gratings” in nanostructured CdSe/CdS. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 116–125. (In Russian) ⟩