

## ФОРМИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРАХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

© 2009 А.Г. Витухновский<sup>1</sup>, А.А. Исаев<sup>1</sup>, К.Н. Козловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

<sup>2</sup> Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

Поступила в редакцию 30.12.2008

В работе исследована трансформация поперечного распределения интенсивности гауссового лазерного пучка при прохождении им коллоидов квантовых точек (CdSe/ZnS) и металлоорганических наночастиц (Ag/J-агрегаты). Эта трансформация проявляется в виде образования конических пучков с характерным интерференционным поперечным распределением интенсивности. В качестве лазерного пучка использовался пучок второй гармоники фемтосекундного титан сапфирового лазера с длительностью импульсов 100 фс на длине волны 404 нм. Характерное время установления стационарного профиля распределения интенсивности прошедшего нелинейную среду пучка находится в диапазоне сотен пс и совпадает с характерным временем прерывания люминесценции одиночных, как квантовых точек, так и металлоорганических нанокомпозитов при их освещении излучением непрерывных лазеров.

Ключевые слова: нелинейная оптика, нелинейные динамические линзы, квантовые точки CdSe/ZnS, наночастицы.

### ВВЕДЕНИЕ

Характеристики преломления световых пучков в классических оптических элементах определяются геометрической формой их поверхности. Так как среда таких элементов обладает постоянным показателем преломления, то для их функционирования, необходимо обеспечивать некий наперед заданный градиент показателя преломления. Оперативное управление свойствами таких элементов, так как это делается, например, в отражательной адаптивной оптике, в принципе, не возможно.

Известно, что лазерное излучение способно менять преломляющие свойства веществ за счет нелинейных оптических эффектов. Нелинейный оптический отклик среды выражается, как правило, в изменении нелинейного показателя преломления, которое пропорционально плотности мощности светового пучка, и, следовательно, пространственному распределению его интенсивности [1]. Это свойство, открывает возможность оперативно формировать оптические элементы с переменным показателем преломления – т.е. нелинейные динамические линзы [2].

Нелинейные линзы широко используются в оптике и лазерной физике: для измерения малых поглощений в жидкостях и газах, изучения

свойств полупроводников и жидких кристаллов, стабилизации мощности лазерного излучения, управления излучением непрерывных лазеров импульсами вспомогательного лазера, оптически бистабильных устройств, нелинейно-оптических ограничителей, модуляции добротности и синхронизации мод лазера [2].

Исходя из вышесказанного, перспективными материальными средами для реализации динамических светоуправляемых (светозадающих) линз могут быть среды с очень большим нелинейным откликом. Известно, что полупроводниковые квантовые точки с размерами, меньшими, чем длина волны квантованных состояний экситона, электрона и дырки (что соответствует размерам около 10 нм) представляют собой класс веществ, обладающих «гигантским» нелинейным откликом, обусловленным сильными квантовыми ограничениями [3].

В данной работе проведено исследование трансформации поперечного распределения интенсивности лазерного пучка, после прохождения кюветы с коллоидным раствором квантовых точек CdSe/ZnS и наночастиц серебра с J-агрегатами под воздействием последовательности лазерных импульсов с фемтосекундной длительностью.

### ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе исследовались коллоидные растворы квантовых точек CdSe/ZnS (Core Shell) в толуоле размерами 2,0 нм и 4,0 нм с первыми пиками возбуждения 480 нм и 585 нм соответствен-

*Витухновский Алексей Григорьевич, зав. отделом люминесценции им. С.И.Вавилова, д.ф. м.н.*

*Исаев Анатолий Александрович, ведущий научный сотрудник, д.ф. м.н. E-mail: isaev@sci.lebedev.ru.*

*Козловский К Н, аспирант.  
E-mail: k2@id.ru.*

но и метало-органические наночастицы Ag/J агрегаты в гексане с размером около 10 нм. Концентрация  $\sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Кварцевые кюветы (толщиной 5 мм), содержавшие коллоиды помещались в лазерный пучок. Распределение интенсивности прошедшего кювету лазерного пучка наблюдалось на экране, размещенном на расстоянии 2,5 метра от кюветы. Изображение пятна лазерного пучка на этом экране фотографировалось с помощью цифровой камеры. Полученный видеоматериал анализировался по кадрам с момента подачи лазерного пучка на кювету до стационарного установления изображения на экране.

Спектры поглощения исследуемых коллоидов представлены на рис. 1. Первые пики поглощения квантовых точек CdSe/ZnS обуславливаются наличием квантовых ограничений, в результате которых на дне зоны проводимости присутствуют дискретные уровни. При уменьшении размеров квантовых точек первый пик поглощения смещается в фиолетовую область спектра. Для коллоида Ag/J наблюдается два пика поглощения: максимальный пик соответствует плазменному резонансу наночастиц серебра, минимальный обусловлен присутствием J агрегатов.

В качестве возбуждающего лазерного пучка использовалась вторая гармоника фемтосекундного титан сапфирового лазера с длительностью импульсов порядка 100 фс и частотой следования импульсов 100 МГц с центром пика на длине волны 404 нм и средней мощностью 30 мВт. Угловая расходимость лазерного пучка составляла около 0.06°. Диаметр падающего на кювету пучка составлял 2 мм; диаметр пучка на экране, как с чистым толуолом, так и с чистым

гексаном  $\sim 5$  мм. При введении в лазерный пучок кюветы с квантовыми точками картина на экране менялась: наблюдалось увеличение угла расходимости и преобразование исходно сплошного пятна в характерную кольцевую структуру.

На рис. 2 “а” представлено изображение распределения интенсивности лазерного пучка, наблюдаемое на экране при прохождении кюветы с наночастицами Ag/J после стационарного установления изображения. Видно, что проходящий через кюветы пучок превращается в набор конических пучков с характерным поперечным распределением интенсивности [1; 7], которое носит интерференционный характер [6]. На рис. 2 “b-c” так же представлены изображения стационарного поперечного распределения интенсивности, но для случая квантовых точек CdSe/ZnS. Разница наблюдаемых картин связана, в частности, с различными механизмами самовоздействия: первый случай представляет собой самофокусировку, тогда как второй и третий относятся к самодефокусировке. В стационарном случае для квантовых точек CdSe/ZnS количество наблюдаемых колец составляло 3 и 7 колец соответственно. Для наночастиц Ag/J наблюдалось одно кольцо.

Формирование абберационных колец на экране визуально разделимо на две фазы [8]. В первой фазе, длительностью порядка секунды, происходил рост пятна, с формированием колец правильной формы, расходящихся из центра. Ко второй фазе рост пятна прекращался, и пятно начинало уменьшаться по вертикали, с характерным размытием верхней половины изображения. При этом количество наблюдаемых колец не уменьшалось. Длительность второй фазы около

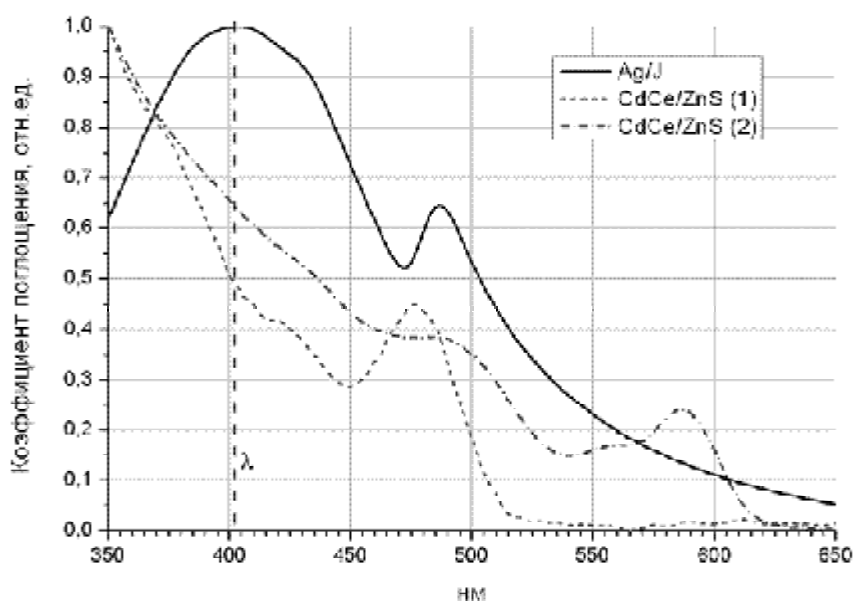
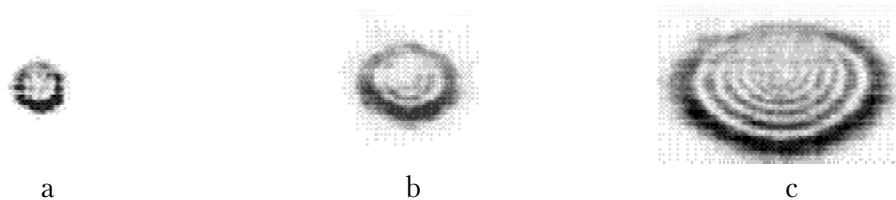
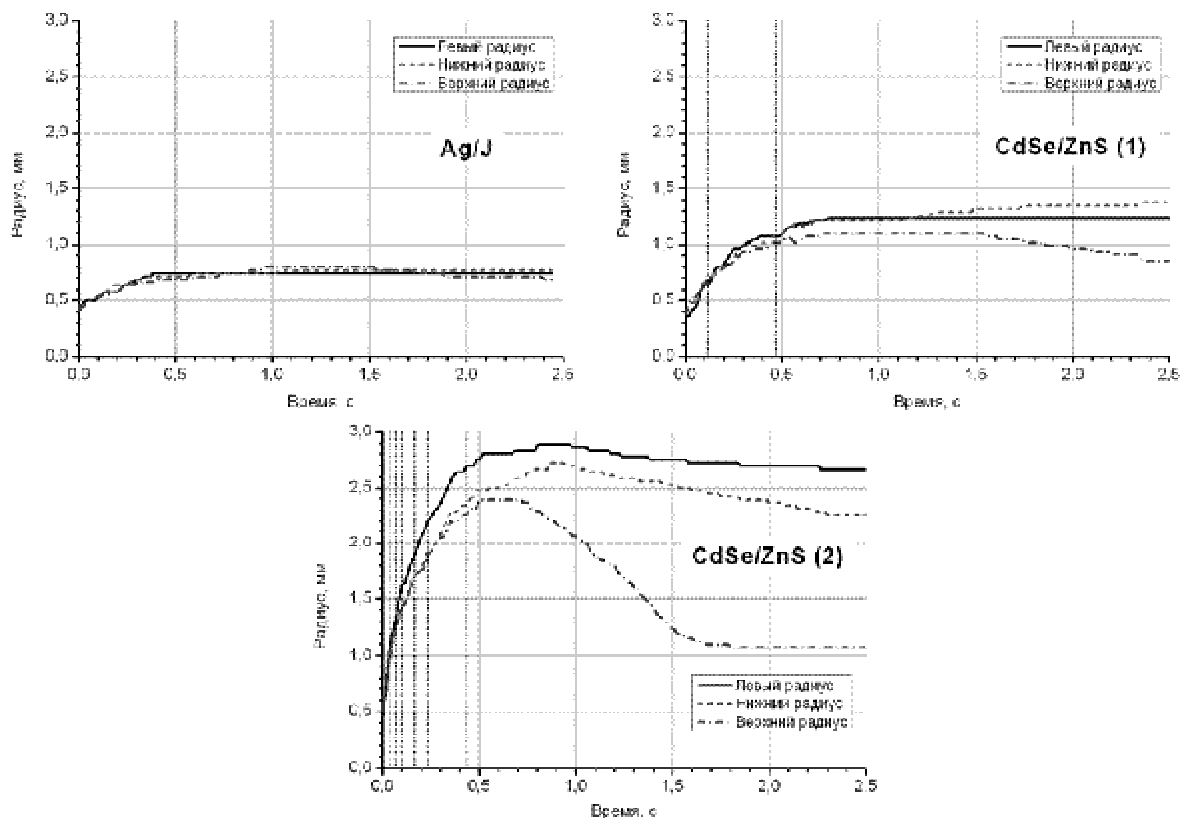


Рис. 1. Спектры поглощения коллоидов.

Вертикальной пунктирной линией обозначена длина волны лазерного пучка



**Рис. 2.** Стационарное поперечное распределение интенсивности лазерного пучка после прохождения кюветы с коллоидом: а) Ag/J; б) CdSe/ZnS (1); в) CdSe/ZnS (2).



**Рис. 3.** Развитие проекции пучка на экране во времени. На графиках представлены радиусы внешнего кольца относительно оси лазерного пучка в трех направлениях. Вертикальные пунктирные линии соответствуют времени увеличения числа колец.

трех секунд. Временная зависимость радиусов формируемых колец представлена на рис. 3.

Из графиков видно, что поперечное распределение интенсивности пучка в случае наночастиц Ag/J практически не деформировалось. Формирование интерференционной картины завершалось в первую секунду, затем, в течении последующих 2-3 секунд происходило стационарное становление распределения, выраженное незначительным изменением вертикального положения изображения. Вертикальная деформация изображения минимальна и составляла менее 5%. Для случая квантовых точек картина существенно иная. В ходе первой фазы, длительностью ~ 0.8 сек, происходило формирование правильной системы колец. Затем, во второй фазе, длительностью ~ 2 сек, изображение вертикально уменьшалось и одновременно про-

исходило размытие верхней половины изображения, идущее от центра вверх. Наблюдаемый во второй фазе эффект размытия обусловлен тепловыми конвекционными потоками[4; 5], что ограничивает применимость теории стационарной теплопроводности для расчета термооптических эффектов в коллоидах квантовых точек.

### ВЫВОДЫ

Квантовые точки, на примере CdSe/ZnS и наночастицы серебра с J агрегатами, являются перспективными нелинейными средами, позволяющей, как создавать, так и исследовать свойства новых преломляющих оптических элементов. В полупроводниковых средах наблюдается самодефокусировка лазерного пучка, а в металлических – самофокусировка.

Измерено время формирования нелинейной линзы в коллоидах квантовых точек CdSe/ZnS и наночастиц Ag/J. Процесс формирования можно разделить на две фазы – формирование интерференционной картины с последующей вертикальной деформацией. Длительность фаз составляет около 1 сек и 3 сек соответственно.

Сделаны выводы о тепловой природе деформации. Наблюдаемые конвекционные эффекты свидетельствуют об ограниченной применимости теории стационарной теплопроводности для расчета термооптического нелинейного отклика коллоидов квантовых точек.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №08 02 01447а и 08 02 90464 Укр а и программы Президиума РАН “Фемтосекундная оптика и оптические материалы”, тема 3.2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // Успехи физических наук. 1967. Том 93. № 1. С.19 70.
2. Альтишулер Г.Б., Иночкин М.В. Нелинейные линзы и их применения // Успехи физических наук. 1993. Том 164. № 7. С.65 84.
3. Днепровский В.С., Жуков Е.А., Кабанин Д.А., и др. // Нелинейное поглощение и преломление света в коллоидном растворе квантовых точек CdSe/ZnS при резонансном двухфотонном возбуждении // ФТТ, 2007., Т.49, №2. С.352 356.
4. Агеев Л. А., Кулева М. Г., Яровая Р. Г. Простой демонстрационный эксперимент по нелинейной оптике // Успехи физических наук, 1987. Том 151. Вып.3. С.537 540
5. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 5. С.85 92.
6. Ахманов С.А., Криндич Д.П., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Нелинейная дефокусировка лазерных пучков // Письма ЖЭТФ. 1967. Т.6. Вып.2. С.509 513.
7. Аскарян Г.А. Эффект самофокусировки // Успехи физических наук. 1973. Том 111. Вып.2. С.249 260.
8. Витухновский А.Г., Исаев А.А., Козловский КН., Лебедев В.С. Нелинейные преломляющие оптические элементы на основе наноразмерных систем // Материалы XIV Всероссийской конференции “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”. Краснодар, 5 11 октября 2008 г. С.173 176.

## NONLINEAR OPTICAL ELEMENTS FORMATION IN COLLOIDS OF QUANTUM DOTS UNDER FEMTOSECOND LASER PULSES

© 2009 A.G. Vitukhnovsky<sup>1</sup>, A.A. Isaev<sup>1</sup>, K.N. Kozlovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Physical Institute named after P.N. Lebedev, Moscow

<sup>2</sup> Moscow Engineering Physics Institute (State University)

In this article, the formation and evolution of Gaussian beam lateral intensity distribution after passing through a colloidal CdSe/ZnSe quantum dots and metalloorganic Ag/J aggregate nanoparticles are discussed. This transformation appears as cone-shaped beams formation and series of thick interference rings. The second harmonic of Titan-Sapphires femtosecond laser with pulse duration about 100 fs and 404 nm wavelength is used as a Gaussian beam source. Typical time for establishing of steady-state beam intensity distribution pattern after passing nonlinear media is about 100 ms and concurs with typical time of trap luminescence both single quantum dots and metallographic particles under CW laser.

Key words: nonlinear optics, nonlinear dynamical lenses, CdSe/ZnS quantum dots, nanoparticles.