

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 2D-ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ФОТОННОМУ ЭХУ© 2014 М.В. Князев^{1,2}, К.Р. Каримуллин^{1,3}, А.В. Наумов^{1,4}¹Институт спектроскопии Российской академии наук, г.Москва²Московский физико-технический институт (государственный университет)³Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН⁴Московский педагогический государственный университет

Поступила в редакцию 17.06.2014

В данной статье продемонстрированы преимущества многоканальных систем регистрации (ПЗС-камер) для использования в качестве детекторов сигнала в экспериментах по фотонному эху.

Ключевые слова: ПЗС-камера, фотонное эхо, сведение лучей

ВВЕДЕНИЕ

Методы фотонного эха и четырехволнового смещения (ЧВС) хорошо зарекомендовали себя при исследованиях процессов оптической дефазировки в твердых [1, 2], газообразных [3], жидких [4], а также различных неупорядоченных средах [5,6]. Традиционно в качестве системы регистрации в такого рода экспериментах используются ПЗС-линейки или фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Несмотря на многолетнее успешное применение таких систем регистрации, они не лишены недостатков, таких как сложность юстировки, ограниченное поле зрения, большие потери полезного сигнала и др. Часто для получения более детальной информации о динамических процессах проводится изучение зависимости спектральных параметров среды от внешних условий. В таких экспериментах образец должен быть помещен в специальную камеру – оптический криостат или камеру высокого давления, что делает невозможным наблюдение образца невооруженным глазом и значительно затрудняет юстировку. В работе обсуждаются преимущества использования современных скоростных высокочувствительных двухмерных детекторов (ПЗС-камер) как в роли

детекторов сигнала, так и в роли полезных юстировочных инструментов.

**СВЕДЕНИЕ НЕКОЛЛИНЕАРНЫХ ЛУЧЕЙ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ТИПА
“НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ”**

Сигналы фотонного эха и ЧВС чрезвычайно сильно зависят от точности сведения и фокусировки лучей на образце. В идеальном случае точки фокусировки лучей на образце должны совпадать. Неполное перекрытие лазерных лучей приводит к потере полезного сигнала и увеличению вклада рассеяния. Обычно в экспериментах типа “накачка-зондирование” сведение неколлинеарных лазерных лучей контролируется на глаз или с использованием простейших систем визуализации. Однако в сложных экспериментальных условиях, когда образец помещен в камеру высокого давления или оптический криостат, приведенные выше способы сведения лучей оказываются неприменимыми. Для точного контроля степени перекрытия двух и более лазерных лучей в таких экспериментах может использоваться схема визуализатора, в основе которого лежит эпи-люминесцентный микроскоп, оборудованный в качестве детектора ПЗС-камерой [7, 8]. Координаты центров люминесцентных пятен, соответствующих местам прихода лучей, могут быть восстановлены с большой точностью с помощью аппроксимации изображений двумерными функциями Гаусса (рис. 1 – случай двух лучей). Эффективность данной методики подтверждена спектроскопическими исследованиями по четырехволновому смещению (ЧВС) в полимерной пленке, допированной хромофорными молекулами (рис. 2).

Князев Михаил Витальевич, инженер отдела молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН, аспирант Московского физико-технического института (ГУ). E-mail: knyazev@isan.troitsk.ru.

Каримуллин Камилль Равкатович, научный сотрудник отдела молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН, докторант, кандидат физико-математических наук. E-mail: kamil@isan.troitsk.ru.

Наумов Андрей Витальевич, заведующий отделом молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН, доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: naumov@isan.troitsk.ru

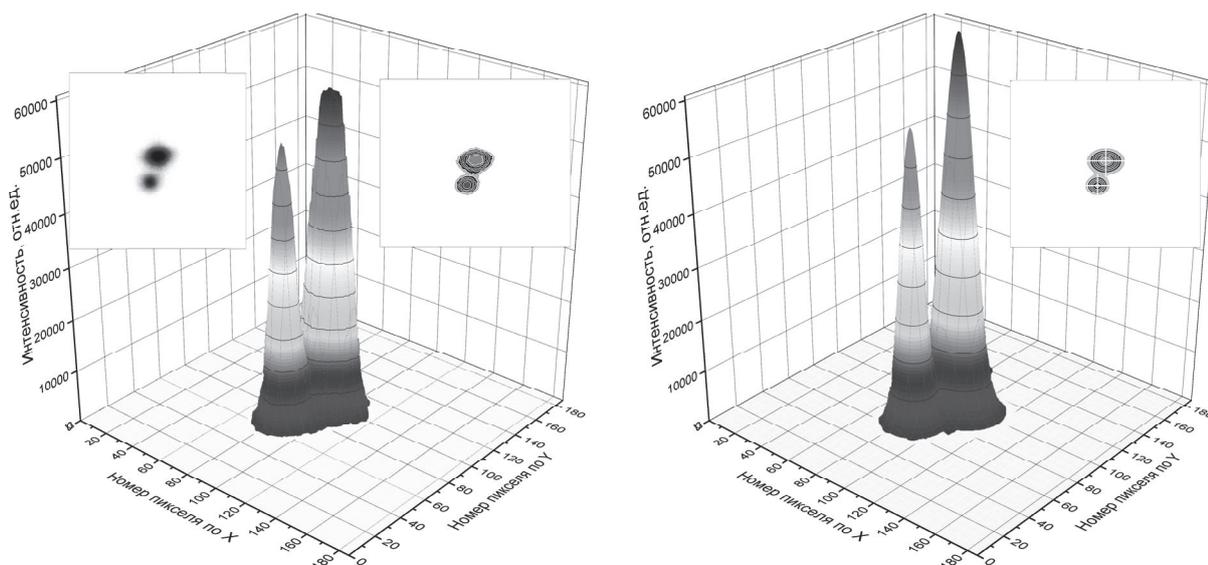


Рис. 1. а – трехмерная визуализация изображений люминесцентных пятен, полученных с помощью эпи-люминесцентного микроскопа при сильном разведении лучей; на вставке 1 – изображение с камеры микроскопа, на вставке 2 – контуры пятен); б – результат аппроксимации изображений двумерными функциями Гаусса; на вставке 3 – их контуры (перекрестиями отмечены центры). Цвета вставок и фоновой подставки инвертированы

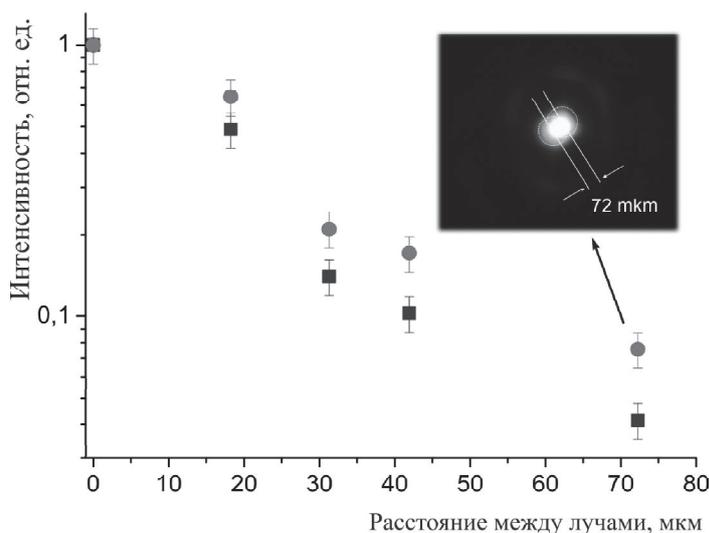


Рис. 2. Зависимость интенсивности сигналов ЧВС от расстояния между возбуждающими лучами. На вставке – люминесцентное изображение двух сфокусированных на образце лучей, расстояние между центрами которых равно 72 мкм

РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ФОТОННОГО ЭХА С ПОМОЩЬЮ ПЗС-КАМЕРЫ

Фотонное эхо – когерентный нелинейный оптический эффект третьего порядка по поляризации среды, что обуславливает его малую интенсивность по отношению к сигналам накачки. Более того, в реальных экспериментах полезный сигнал часто сопровождается паразитным некогерентным рассеянием. Так как сигналы ФЭ отвечают условиям фазового синхронизма (например, для двухимпульсного фотонного эха они записываются как $\vec{k}_3 = 2\vec{k}_1 - \vec{k}_2$, $\vec{k}_4 = 2\vec{k}_2 - \vec{k}_1$,

где \vec{k}_1 и \vec{k}_2 – волновые векторы возбуждающих импульсов), возможно методом пространственной фильтрации отделить полезный сигнал от мощного возбуждающего и рассеянного излучения. Для этого в классических экспериментах прибегают к помощи диафрагм, систем оптических волокон и пр. Дополнительно, для усиления слабого сигнала ФЭ зачастую используются электронно-оптические преобразователи с микроканальными пластинами. Сложность юстировки таких систем приводит к серьезным трудностям при поиске слабых сигналов ФЭ среди паразитного излучения. Описанных неудобств можно избежать, если ис-

пользовать в качестве детектора двумерный приемник (ПЗС-камеру). Широкое поле зрения ПЗС-камеры дает возможность наблюдать на одном экране как паразитное излучение, так и полезные сигналы (сигналы ФЭ, калибровочный сигнал лазера и др.), что позволяет осуществлять пространственную фильтрацию непосредственно на получаемом изображении (рис. 3).

Современные матричные детекторы обладают высокой квантовой эффективностью, низким уровнем шумов и быстродействием, достаточным для широкого круга применений. Так, используемая нами камера Cooke Corporation SensiCam HighSpeed CCD camera с внутренним размноже-

нием электронов обеспечивает квантовую эффективность $\geq 40\%$ на длине волны 520 нм, экспозицию от 100 нс до 10 мс, шум считывания – 13-14 электронов и $< 0,1$ темнового отсчета в секунду на пиксель. Такие параметры позволяют надежно регистрировать слабые сигналы фотонного эха. Так, в данной работе были зарегистрированы сигналы ФЭ в полимерной пленке полиизобутилена, допированной хромофорными молекулами тетра-трет-бутилтеррилена, внутри оптического криостата при температуре 5 К (подробнее об экспериментальной установке см. [9, 10, 11]).

Пример кривой спада сигнала фотонного эха, полученной в таком эксперименте, изображен на рис. 4.

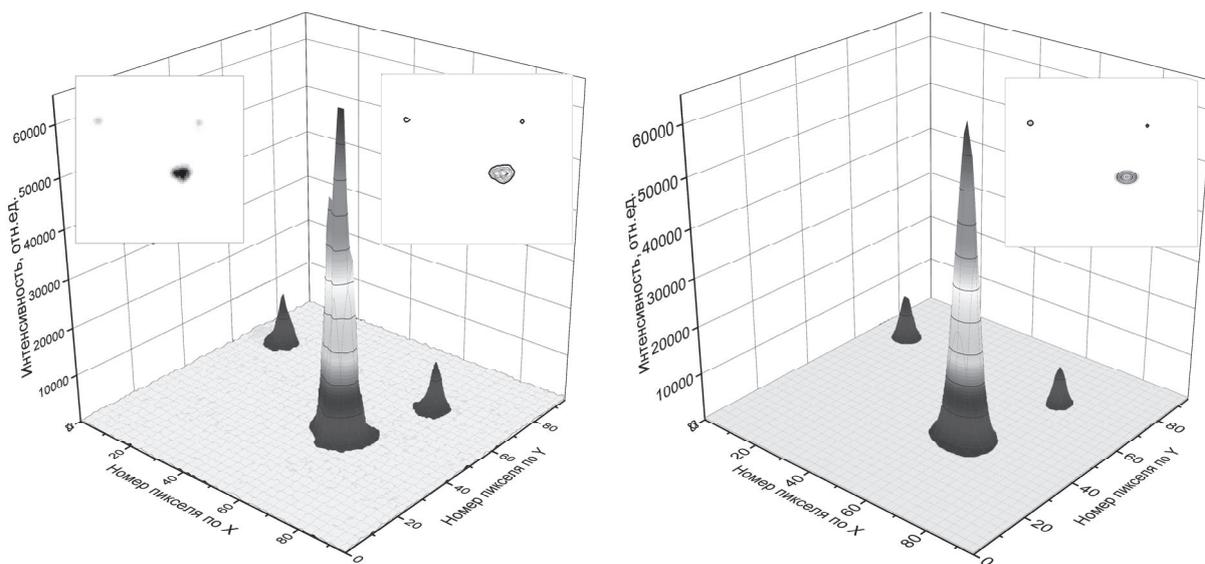


Рис. 3. а – трехмерная визуализация сигналов, полученных в эксперименте по ФЭ. На вставке 1 – изображение с ПЗС-камеры (два верхних пятна соответствуют сигналам ФЭ, нижнее пятно – калибровочному лучу лазера накачки); на вставке 2 – контуры пятен; б – результат аппроксимации изображений двумерными функциями Гаусса; на вставке 3 – их контуры. Цвета вставок и фоновой подставки инвертированы

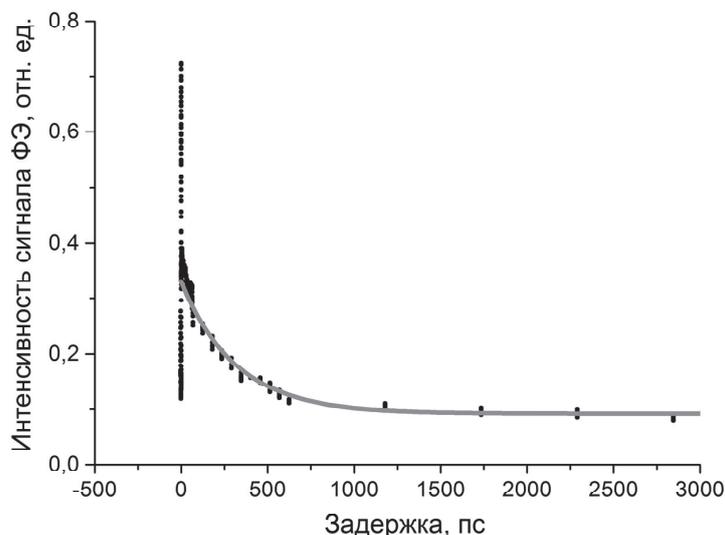


Рис. 4. Зависимость интенсивности сигнала фотонного эха от времени задержки между возбуждающими импульсами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что современные скоростные ПЗС-камеры могут быть успешно использованы для идентификации и детектирования слабых сигналов, в частности, сигналов фотонного эха и четырехволнового смешения. Обладая высокой квантовой эффективностью и низким уровнем шумов, двумерные фотодетекторы существенно облегчают юстировку экспериментальной установки, позволяют легко проводить пространственную фильтрацию сигналов, учет фонового рассеяния и пр. Дополнительные схемы, основанные на матричных детекторах, могут быть полезны при юстировке для увеличения интенсивности полезного сигнала в сложных экспериментальных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Macfarlane R.M.* High-resolution laser spectroscopy of rare-earth doped insulators: a personal perspective // *Journal of luminescence*. 2002. Т. 100. № 1. С. 1-20.
2. *Kalachev A. A. et al.* Optical echo-spectroscopy of highly doped Tm: YAG // *Laser Physics Letters*. 2008. Т. 5. № 12. С. 882.
3. *Rubtsova N.N. et al.* Velocity effects in atomic and molecular collisions: Study by coherent transients // *Laser physics*. 2010. Т. 20. № 3. С. 568-572.
4. *de Boeij W.P., Pshenichnikov M.S., Wiersma D. A.* Ultrafast solvation dynamics explored by femtosecond photon echo spectroscopies // *Annual review of physical chemistry*. 1998. Т. 49. № 1. С. 99-123.
5. *Vainer Y.G. et al.* Quasi-localized low-frequency vibrational modes of disordered solids I. Study by photon echo // *Physica Status Solidi (b)*. 2004. Т. 241. № 15. С. 3480-3486.
6. *Hügel W. A. et al.* Photon echoes from semiconductor band-to-band continuum transitions in the regime of Coulomb quantum kinetics // *Physical review letters*. 1999. Т. 83. № 16. С. 3313.
7. *Каримуллин К.Р., Князев М.В., Вайнер Ю.Г., Наумов А.В.* Люминесцентный визуализатор для точного сведения лазерных лучей в спектроскопии фотонного эха, четырехволнового смешения и смежных техниках // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т. 114, № 6. С. 943-947.
8. *Karimullin K. et al.* A tool for alignment of multiple laser beams in pump-probe experiments // *Measurement Science and Technology*. 2013. Т. 24. № 2. С. 027002-1.
9. *Вайнер Ю.Г., Груздев Н.В.* Динамика органических аморфных сред при низких температурах: Исследования резорурфина в d- и d6- этаноле при 1.7-35 К методом некогерентного фотонного эха. I. Эксперимент. Основные результаты // *Оптика и спектроскопия*, Т. 76, № 2, С. 252 - 258 (1994).
10. *Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В., Самарцев В.В.* Сверхбыстрая оптическая дефазировка в примесном полиметилметакрилате: исследование методом некогерентного фотонного эха с фемтосекундным временным разрешением // *Ученые записки Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки*. 2008. Т.150. Кн. 2. С. 148-159.
11. *Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В., Самарцев В.В.* Оптическая дефазировка в примесном полиизобутилене: исследования методом некогерентного фотонного эха в условиях высокого давления // *Ученые записки Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки*. 2010. Т. 152, кн. 2. С. 98-110.

TWO-DIMENSIONAL IMAGING TECHNIQUE IN PHOTON ECHO EXPERIMENTS

© 2014 M.V. Knyazev^{1,2}, K.R. Karimullin^{1,3}, A.V. Naumov^{1,4}

¹Institute for Spectroscopy RAS, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology

³Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan

⁴Moscow State Pedagogical University

Two-dimensional detectors (CCD-cameras) advantages in photon echo experiments are concerned.

Key words: CCD-camera, photon echo, beam convergence

Mikhail Knyazev, Engineer in Molecular Spectroscopy Department, Institute for Spectroscopy Russian Academy of Sciences, Post-Graduate Student in Moscow Institute of Physics and Technology. E-mail: knyazev@isan.troitsk.ru.

Kamil Karimullin, Researcher in Molecular Spectroscopy Department, Institute for Spectroscopy RAS, Ph.D. in Physics. E-mail: kamil@isan.troitsk.ru.

Andrey Naumov, Head of the Molecular Spectroscopy Department, Institute for Spectroscopy RAS, Ph.D. in Physics. E-mail: naumov@isan.troitsk.ru