



УДК 535.375.55

В.С. Горелик, А.Д. Кудрявцева, М.В. Тареева, Н.В. Чернега

Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, Москва

ТРЕХМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ – НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований нелинейно-оптических эффектов, возникающих в искусственных опаловых матрицах и нанокмозитах на их основе под действием импульсного лазерного излучения. Показано, что наличие запрещенных фотонных зон в таких структурах приводит к возрастанию эффективности вынужденного комбинационного рассеяния света и возникновению новых, неизвестных ранее нелинейных явлений.

ВЫНУЖДЕННЫЕ РАССЕЯНИЯ, ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ, СПЕКТР

1. ВВЕДЕНИЕ. Одной из важных задач современной оптики является обработка и восстановление изображений с помощью нелинейно-оптических эффектов. Использование коротких импульсов когерентного излучения дает возможность исследовать быстротекающие процессы в реальном масштабе времени, а чувствительность таких методов к изменению фазовых характеристик позволяет изучать неоднородности прозрачных и слабопоглощающих сред. В связи с этим представляется актуальным поиск новых сред и новых нелинейно-оптических эффектов, которые можно было бы использовать для регистрации, обработки и восстановления амплитудно-фазовых характеристик световых полей при их взаимодействии с изменяющимися во времени средами, в частности с потоками различной природы.

Использование трехмерных фотонных кристаллов дает возможность существенно снизить пороги нелинейных процессов, например вынужденных рассеяний света, и увеличить их эффективность. Настоящая работа посвящена исследованию вынужденного глобулярного рассеяния (ВГР) [1], вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [2] и эффекта фотонного пламени [3] в фотонных кристаллах – искусственных опаловых матрицах, состоящих из кварцевых сфер (глобул).

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для возбуждения использовались одиночные импульсы рубинового лазера (длина волны генерации – 694,3 нм, длительность импульса 20 нс; максимальная энергия в импульсе 0,3 Дж).

Возбуждающее излучение фокусировалось в образцы линзами с различным фокусным расстоянием. Спектры ВГР регистрировались с помощью интерферометров Фабри-Перо, спектры ВКР – с помощью спектрометров FSD-8.

Образцы имели размеры 1x5x5 мм и были вырезаны параллельно плоскости (111). Исследовались опаловые матрицы, состоящие из плотно упакованных сфер аморфного кварца с диаметром от 200 до 320 нм. Эксперименты проводились также в нанокompозитах на основе опаловых матриц. Заполняя полости между кварцевыми сферами в опаловых матрицах жидкостями с различными показателями преломления, можно эффективно управлять параметрами стоп-зоны (ее положением в спектре и контрастом) и увеличивать эффективность нелинейных процессов благодаря изменению плотности фотонных состояний вблизи края запрещенной зоны.

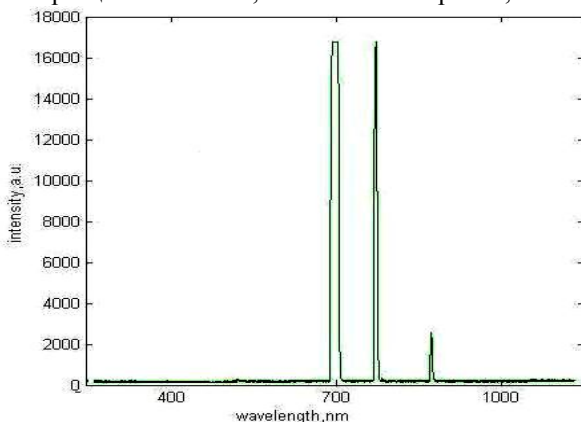
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Вынужденное глобулярное рассеяние света (ВГР). Процесс ВГР является результатом нелинейного взаимодействия импульсного лазерного излучения и собственных акустических колебаний кварцевых сфер, образующих синтетическую опаловую матрицу. Экспериментально эффект проявляется в появлении в спектре прошедшего образца и отраженного от образца излучения линий в стоксовой области со смещением относительно возбуждающего излучения порядка нескольких десятых долей см^{-1} , определяемым собственными частотами колебаний кварцевых глобул, лежащими в гигагерцовом диапазоне. Порог возникновения эффекта и число линий зависят от состава образца, энергии возбуждения и температуры вещества. Расходимость излучения ВГР близка к расходимости возбуждающего лазерного излучения. Эффективность преобразования возбуждающего излучения в ВГР достигает 40 %. При понижении температуры до 77 К порог ВГР понижается в 3 раза, число компонент возрастает и происходит перераспределение энергии в пользу компонент высшего порядка.

Экспериментально наблюдаемые сдвиги частот близки к собственным частотам колебаний кварцевых глобул. Нелинейные жидкости, заполняющие полости между кварцевыми глобулами, могут оказывать влияние на их движение, но даже в этом случае разница между экспериментальными и вычисленными величинами невелика.

3.2. Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР). При заполнении опаловой матрицы нитробензолом наблюдалось вынужденное комбинационное рассеяние света в нитробензоле с высокой эффективностью преобразования лазерного излучения в ВКР. Пороговое значение интенсивности лазерного излучения составило величину $0,1 \text{ ГВт/см}^2$. Увеличение плотности мощности накачки приводило к появлению в спектре ВКР второй стоксовой компоненты. При понижении температуры образцов до температуры жидкого азота эффективность преобразования возбуждающего излучения в ВКР

возрастала. Во всех исследованных образцах ВКР могло возбуждаться только в том случае, когда частота возбуждающего лазерного излучения располагалась вблизи высокочастотного края запрещенной зоны, а частота первой стоксовой компоненты – вблизи низкочастотного края. На рисунке приведен спектр ВКР, полученный при фокусировке лазерного импульса в опаловую матрицу, заполненную нитробензолом, при интенсивности лазерного излучения $0,15 \text{ ГВт/см}^2$. Толщина образца составляла в этом случае 3 мм, а диаметр пятна на образце составлял 0,2 мм. Таким образом, объем активной



среды (с учетом степени заполнения образца) составлял величину $0,12 \text{ мм}^3$. В тех же экспериментальных условиях возбуждение ВКР «назад» в чистом нитробензоле при том же уровне интенсивности накачки может быть реализовано только для длины кюветы не менее 2 см. Это означает, что в случае, когда нитробензол находится в опаловой матрице, мы имеем уменьшение порога ВКР по крайней мере в 20 раз по сравнению с чистым нитробензолом. Эффективная генерация ВКР, реализованная в наших экспериментах, обусловлена структурой фотонных зон использованных образцов.

3.3. Эффект фотонного пламени (ЭФП). Эффект фотонного пламени состоит в возникновении в фотонном кристалле длительного (до 10 – 12 с) свечения в сине-зеленой области спектра при возбуждении импульсом рубинового лазера длительностью 20 нс и в передаче возбуждения другим фотонным кристаллам или замороженным жидкостям, расположенным на той же подложке. ЭФП наблюдается при температуре жидкого азота (77 К) как в чистых опаловых матрицах, так и в нанокompозитах. Пороговые значения плотности мощности возбуждающего излучения зависят от состава образца. Временная зависимость ЭФП носит существенно немонотонный характер. Общими характерными чертами временной зависимости ЭФП в различных экспериментах являются медленное затухание свечения, существование одного или нескольких участков с почти постоянной интенсивностью и при-

сутствие максимумов, которые видны невооруженным глазом как яркие вспышки.

Свечение образцов замороженных нелинейно-оптических жидкостей, расположенных на одной подложке с фотонным кристаллом при температуре жидкого азота, при фокусировке лазерного излучения в опаловую матрицу наблюдалось как в случае, когда образец опаловой матрицы был погружен в жидкость, так и в том случае, когда жидкость не соприкасалась с образцом. Свечение замороженной жидкости наблюдалось даже в том случае, когда только маленькие кусочки опаловой матрицы были добавлены к относительно большому количеству жидкости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Высокая эффективность нелинейно-оптических эффектов в фотонных кристаллах открывает перспективы использования этих материалов в системах обработки изображений в реальном масштабе времени. Одновременная локализация фотонов и фононов в периодических наноструктурах приводит к возрастанию эффективности фотон-фононного взаимодействия, что позволит использовать фотонные кристаллы при создании акустооптических устройств для эффективного управления звуком и светом.

5. БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку (грант РФФИ - БРФФИ № 08-02-90020-Бел_a).

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Esakov A.A., Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D. and Tcherniega N.V.** SPIE Proc. 2006. V. 6369. P. 6369 OE1 – OE12.
2. **Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D., Tcherniega N.V.** Journal of Russian Laser Research. 2008. V.29. P. 551-557.
3. **Tcherniega N.V., Kudryavtseva A.D.** Journal of Russian Laser Research. 2006. V.27. P.400-409.

V.S. Gorelik, A.D. Kudryavtseva, M.V. Tareeva, N.V. Tcherniega

P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow

THREE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS – NEW MATERIALS FOR NONLINEAR OPTICS

Results of the experimental study of nonlinear effects, arising in synthetic opal matrices and nanocomposites on their base, are presented. Photonic band gap existing in such structures is shown to result in the stimulated Raman scattering efficiency increase and to the appearance of new, not known before nonlinear phenomena.

STIMULATED SCATTERING, PHOTONIC CRYSTALS, OPAL MATRICES,
SPECTRUM