

Спектральные характеристики излучения кристаллов искусственного опала при эффекте фотонного пламени

В. С. Горелик, А. Д. Кудрявцева, М. В. Тареева, Н. В. Чернега¹⁾

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 сентября 2006 г.

Приводятся результаты исследования спектральных характеристик излучения в недавно экспериментально открытом эффекте фотонного пламени (Photonic Flame Effect). Излучение лазера на рубине, работающего в режиме модуляции добротности с длиной волны генерации 694.3 нм, фокусировалось вблизи ориентированной поверхности глобуллярного фотонного кристалла (искусственного опала с размером глобул, равным 230 нм), помещенного на медном хладопроводе, температура которого была близка к точке кипения жидкого азота (77 К). Спектр длительного послесвечения (с длительностью порядка нескольких секунд, при длительности импульса накачки, равной 20 нс.), возникающего в эффекте фотонного пламени, регистрировался с помощью волоконно-оптического миниспектрометра и состоял из нескольких сравнительно узких линий, интенсивность которых существенно изменялась при изменении мощности накачки. Аналогичное свечение наблюдалось в образцах опала, заполненных ацетоном или этанолом.

PACS: 42.65.-k, 42.70.Qs

Введение. Недавно экспериментально был открыт новый эффект в фотонных кристаллах [1, 2], названный эффектом фотонного пламени.

Фотонные кристаллы (материалы с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью с периодом порядка длины волны электромагнитного излучения) привлекают большое внимание исследователей с момента появления первых работ в этом направлении [3–5]. Фотонные кристаллы благодаря наличию в них запрещенных фотонных зон и областей аномального возрастания плотности фотонных состояний представляют несомненный интерес с точки зрения управления характеристиками лазерного излучения и получения новых эффективных источников электромагнитного излучения. Особый интерес представляют так называемые глобуллярные фотонные кристаллы, примером которых являются искусственные опаловые матрицы, представляющие собой плотно упакованную трехмерную кристаллическую структуру с периодом 200–600 нм, состоящую из шариков (глобул) кремнезема. К настоящему времени исследованы линейные оптические свойства глобуллярных фотонных кристаллов, в частности, чистых опаловых матриц и образцов, заполненных различными диэлектрическими и полупроводникющими материалами [6, 7]. Теория распространения электромагнитного излучения в фотонных кристаллах рассчитывалась с помощью метода матриц распространения [8] или методом разложения по плоским волн-

ам [9] и была подтверждена экспериментальными исследованиями спектров отражения и пропускания в видимой области. Кроме того, в теории было предсказано, что аномальное уменьшение групповой скорости электромагнитной волны на краю фотонной запрещенной зоны должно приводить к существенному увеличению времени взаимодействия электромагнитного поля с фотонной кристаллической структурой и, соответственно, к возрастанию эффективности различных нелинейно-оптических процессов: генерации оптических гармоник, параметрического рассеяния, вынужденного рассеяния и др. [10–13].

Недавно при воздействии на искусственные опалы импульсом лазера на рубине наносекундного диапазона длительности нами был обнаружен новый нелинейно-оптический эффект [14, 15] – вынужденное глобуллярное рассеяние света, состоящий в возникновении вынужденного излучения, сдвинутого по частоте в стоксову область относительно частоты возбуждающего излучения на несколько десятых см^{-1} . По аналогии с вынужденным комбинационным рассеянием (ВКР) такой эффект был объяснен возбуждением гигантским лазерным импульсом механических собственных колебаний сферических частиц – глобул, образующих кристалл искусственного опала.

Недавно открытый эффект фотонного пламени [1, 2], заключающийся в возникновении длительного (в течение нескольких секунд) свечения кристаллов искусственных опалов при облучении их импульсным лазерным излучением наносекундного диапазо-

¹⁾e-mail: tchera@sci.lebedev.ru

на длительности, а также процесс переноса энергии возбуждения по металлоэлектрической структуре (представляющей собой несколько кристаллов искусственного опала, помещенных на медную подложку с характерным расстоянием между ними порядка нескольких сантиметров), открывает большие возможности для применения таких систем в интегральных устройствах оптоэлектроники и требует проведения дальнейших исследований.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование в широком диапазоне вида спектра вторичного излучения, возникающего при эффекте фотонного пламени (РФЕ) в глобулярном фотонном кристалле под действием гигантских лазерных импульсов и его трансформации при изменении условий возбуждения.

Экспериментальная установка. В качестве источника возбуждающего излучения нами использовался лазер на рубине (длина волны генерации – 694.3 нм), работающий в режиме модуляции добротности. Длительность гигантского импульса лазера составляла 20 нс; максимальная энергия в импульсе равнялась 0.3 Дж; расходимость – $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад; ширина линии генерации – 0.015 см^{-1} .

В качестве подложки для установки образцов использовалась медная пластина толщиной 2 см, помещенная в криостат при температуре жидкого азота. На пластине размещались несколько (в эксперименте от одного до пяти) образцов кристаллов искусственного опала.

Используемые искусственные опалы представляли собой образцы размером в несколько миллиметров. Основной, освещаемый сфокусированным лазерным импульсом, образец представлял собой прямую призму размером $3 \times 5 \times 5$ мм с поверхностью (111). Наряду с чистым (незаполненным) образцом, были исследованы глобулярные фотонные кристаллы, предварительно насыщенные ацетоном или этиловым спиртом. Схема используемой экспериментальной установки приведена на рис.1. Излучение рубинового лазера фокусировалось на поверхность одного из кристаллов. Использовались линзы с фокусным расстоянием 50, 90 и 150 мм. Измерения проводились для различных значений плотности мощности на поверхности кристалла.

Свечение кристаллов регистрировалось с помощью цифровой камеры, полученные данные обрабатывались на компьютере. Спектральные измерения проводились с помощью широкодиапазонного миниспектрометра с волоконно-оптическим входом, работающего в диапазоне 240–1000 нм и обеспечивающего спектральное разрешение 6 нм.

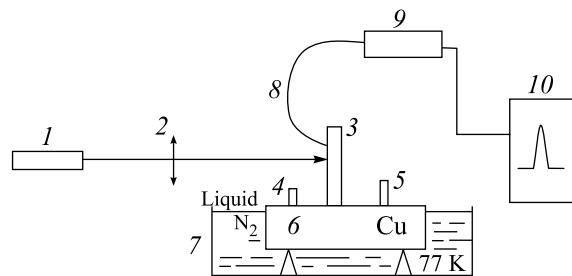


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – рубиновый лазер, 2 – фокусирующая система, 3, 4, 5 – исследуемые кристаллы, 6 – подложка, 7 – кювета с жидким азотом, 8 – волоконный световод, 9 – спектрометр, 10 – компьютер

Результаты экспериментов. При достижении пороговой плотности мощности (10^7 – $10^8 \text{ Вт}/\text{см}^2$) на поверхности кристалла наблюдалось свечение в синево-зеленой области спектра, длившееся от 1 до 4 с. Диаметр пятна сфокусированного лазерного излучения составлял величину ~ 0.01 мм, а размер светящейся области на кристалле – ~ 2 мм. Временная зависимость интенсивности для области кристалла, соответствующей максимальной яркости, приведена на рис.2. Характерной особенностью этой зависимости

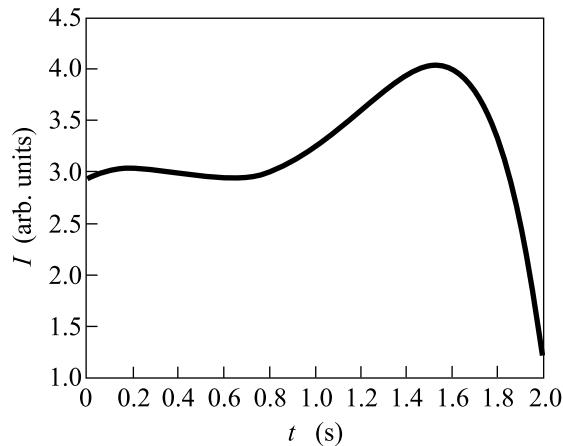


Рис.2. Временная зависимость интенсивности свечения кристалла

является наличие постоянного участка, отчетливого максимума и быстрого спадания интенсивности излучения. В некоторых экспериментах временная зависимость наблюдаемого свечения носила периодический характер (наблюдалось несколько максимумов и минимумов).

Пороговые значения интенсивности лазерного излучения, необходимого для наблюдения эффекта, определялись контрастом показателя преломления (различием показателей преломления кварца и ве-

щества, заполняющего пустоты между кварцевыми сферами в кристалле). Для незаполненной опаловой матрицы эта величина составляла $0.12 \text{ ГВт}/\text{см}^2$, для опала, заполненного этанолом, – $0.05 \text{ ГВт}/\text{см}^2$, для опала, заполненного ацетоном, – $0.03 \text{ ГВт}/\text{см}^2$.

Спектр излучения кристалла (см. рис.3) состоял из ряда резких линий с длинами волн 429.0, 453.0,

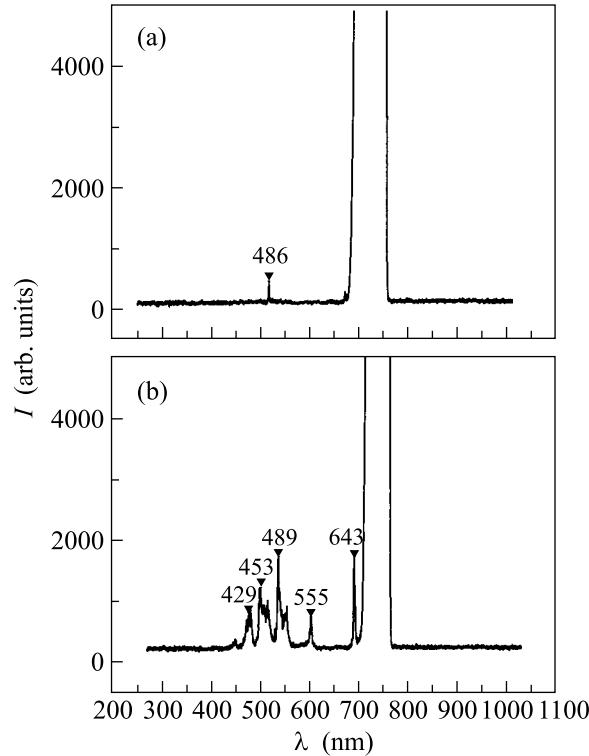


Рис.3. Спектр излучения фотонного кристалла при различных интенсивностях накачки: (а) $I = 0.12 \text{ ГВт}/\text{см}^2$, (б) $I = 0.14 \text{ ГВт}/\text{см}^2$

489.0, 555.0 и 643.0 нм, соответствующих антистоксовой области спектра (возбуждающая линия соответствует 694.3 нм). Интенсивность линий в спектре резко зависела от интенсивности лазерной накачки, что свидетельствует о вынужденном типе наблюдаемого излучения. При этом наблюдаемые максимумы интенсивности, за исключением линии 643.0 нм, хорошо коррелируют с особенностями спектра свечения опала, наблюдавшимися ранее в работе [16], что свидетельствует о многофотонном характере наблюдаемого процесса вторичного излучения.

Следует отметить, что данный спектр коррелирует со спектрами фотолюминесценции кристаллов опала при однофотонном возбуждении ультрафиолетовым излучением, представляющими собой достаточно широкую полосу с особенностями в области 400–550 нм. Резкая линия с длиной волны 643 нм мо-

жет быть обусловлена процессом антистоксова ВКР, порог которого понижается за счет возрастания плотности фотонных состояний в антистоксовой области спектра.

При наличии на медной подложке нескольких кристаллов (см. рис.4) с расстоянием между ни-

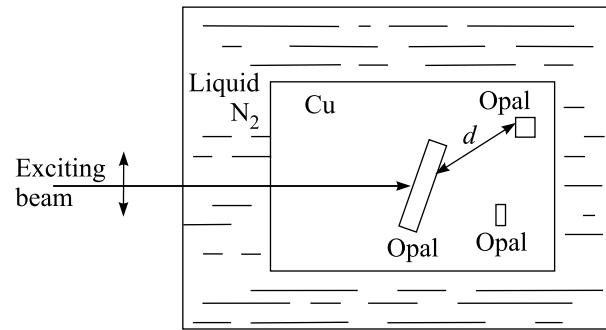


Рис.4. Схема расположения кристаллов на подложке

ми до 5 см свечение в сине-зеленой области спектра возникало одновременно в нескольких образцах даже в том случае, когда возбуждающее излучение было сфокусировано на поверхности только одного из них [1, 2]. Свечение наблюдалось в том же спектральном диапазоне и с аналогичными временными зависимостями, но возникало с некоторой временной задержкой. При замене медной подложки на стальную или кварцевую свечение наблюдалось только в кристалле, на который фокусировалось лазерное излучение. Использование экрана, пространственно отделяющего кристалл, освещенный лазерным излучением, от остальных образцов, не препятствовало возникновению свечения в этих образцах при условии, что зазор между медной подложкой и экраном был больше, чем 0.5 мм. При меньшем значении этого зазора свечение в удаленных от основного образца опалах не наблюдалось. На рис.5 показаны три кристалла искусственного опала с расстоянием между образцами ~ 2 см, расположенные на медной подложке. Лазерный импульс фокусируется на левый образец. Свечение со спектральным распределением, соответствующим показанному на рис.3б, возникает во всех трех образцах.

Заключение. Таким образом, в данной работе приведены результаты экспериментального исследования спектральных характеристик излучения, возникающего в кристалле искусственного опала при эффекте фотонного пламени (PFE). Для выяснения микроскопического механизма появления наблюдавшихся спектральных линий в данном излучении необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. Одним из возможных объ-

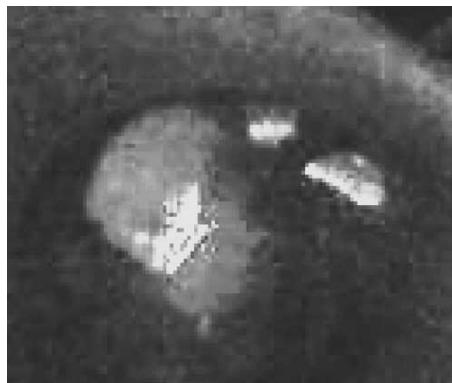


Рис.5. Фотографии свечения кристаллов, расположенных на медной подложке на расстоянии около 2 сантиметров от освещаемого лазерным импульсом образца (левый кристалл)

яснений возникновения резких пиков интенсивности в сине-зеленой области спектра является проявление процессов четырехфотонного параметрического рассеяния. При этом на первом этапе происходит поглощение двух квантов возбуждающего излучения, на втором этапе возникает квант света в сине-зеленой области и комплементарный квант инфракрасного диапазона. Другой возможной причиной данного спектрального распределения являются последовательные трехчастотные волновые взаимодействия в периодически неоднородных средах [17]. Эффективность возникновения вынужденного излучения в сине-зеленой области обеспечивается аномалиями плотности фотонных состояний вблизи краев зоны Бриллюэна. Присутствие нескольких пиков в этой области может быть объяснено вкладом различных граничных точек зоны Бриллюэна фотонного кристалла. Эффект удалось наблюдать лишь при низких температурах, когда подавлены релаксационные процессы распада фотонов с переходом световой энергии в тепловую энергию кристаллической решетки. Важной особенностью наблюданного вынужденного излучения является его длительное послесвечение, что соответствует генерации “медленных” фотонов внутри глобуллярного кристалла.

Обнаруженный эффект РВЕ и его спектральные свойства, исследованные в данной работе, по нашему мнению, представляют как общетеоретический, так и практический интерес для исследования и создания новых эффективных излучателей в различных областях спектра, а также для реализации процесса переноса электромагнитного излучения в устройствах микроэлектроники.

1. N. V. Tcherniega and A. D. Kudryavtseva, ArXiv/physics/0608150, 1-6 (2006).
2. N. V. Tcherniega and A. D. Kudryavtseva, J. Russian Laser Research **27**, 450 (2006).
3. В. Быков, ЖЭТФ **35**, 269 (1972).
4. E. Yablonovich, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
5. S. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
6. V. N. Astratov, V. N. Bogomolov, A. A. Kaplyanskii et al., Nuovo Cim. D **17**, 1349 (1995).
7. А. В. Барышев, А. А. Каплянский, В. А. Кособукин и др., ФТТ **45**, 434 (2003).
8. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Macmillan, New York, 1964.
9. A. Yariv, *Quantum Electronics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, London, Sudneu, 1967.
10. M. G. Martemyanov, D. G. Gusev, I. V. Soboleva et al., Laser Physics **14**, 677 (2004).
11. A. A. Fedyanin, O. A. Aktsipetrov, D. A. Kurdyukov et al., Appl. Phys. Lett. **87**, 151111 (2005).
12. Р. Г. Запорожченко, С. Я. Килин, А. Г. Смирнов, Квантовая электроника **30**, 997, (2000).
13. M. H. Kuok, H. S. Lim, S. C. Ng et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 255502 (2003).
14. В. С. Горелик, А. Д. Кудрявцева, Н. В. Чернега, КСФ **8**, 43 (2006).
15. V. S. Gorelik, A. D. Kudryavtseva, M. V. Tareeva, and N. V. Tcherniega, SPIE Proc., Intern. Conf. “Laser Optics”, St.Petersburg, June 26-30, 2006, to be published.
16. В. С. Горелик, А. А. Есаков, А. Б. Фадюшин, Препринт ФИАН № 14 (2006).
17. А. С. Чиркин, В. В. Волков, Г. Д. Лаптев, Е. Ю. Морозов, Квантовая электроника **30**, 847 (2000).