

Оптическое сверхизлучение в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$

В.А.Зуйков, А.А.Калачёв, В.В.Самарцев, А.М.Шегеда

Впервые экспериментально получено оптическое сверхизлучение в ван-флековском парамагнетике – кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ (переход $^3P_0 - ^3H_4(0)$, длина волны 477.7 нм, температура 2.2 К, коэффициент резонансного поглощения $\alpha = 4.7 \text{ см}^{-1}$, длина образца 8 мм) – при возбуждении лазерным импульсом длительностью 10 нс.

Ключевые слова: сверхизлучение, ван-флековский кристалл, оптическая накачка.

Введение

Оптическое сверхизлучение (СИ) представляет собой когерентное узконаправленное спонтанное излучение фотонов системой инвертированных частиц (связанных между собой полем излучения и шумовым полем) с интенсивностью, пропорциональной квадрату их числа. Данное явление было теоретически предсказано Р.Дике в 1954 г. [1] до появления лазеров. Идея возможности когерентного спонтанного излучения сыграла значительную роль в развитии когерентной и квантовой оптики, а заложенные в ней перспективы получения интенсивного когерентного излучения за один проход через среду (в отсутствие обратной связи) имеют большую практическую значимость. Первый эксперимент по СИ был поставлен в 1973 г. на газах (парах HF [2]). Затем последовала серия подобных экспериментов на других газовых средах, описанных в обзоре [3] и книге [4].

Первые твердотельные эксперименты по оптическому СИ были поставлены в начале 80-х гг. [5, 6] на O_2 -центрах в кристалле KCl и на примесных молекулах пирена в кристалле дифенила [7, 8]. Детальный анализ этих экспериментов, проведенный в обзоре [9], выявил характерные особенности СИ в твердых телах по сравнению с газами. Данные особенности связаны с плотной упаковкой примесных центров в матрице (в отличие от разреженных газов), с наличием кристаллического окружения и непростой структурой энергетических уровней указанных центров.

В связи с этим каждый новый твердотельный эксперимент по СИ является важным, тем более, если он поставлен на среде, перспективной для использования в качестве носителя информации в оптических процессорах. Такими средами являются ван-флековские парамагнетики – примесные кристаллы, легированные редкоземельными ионами, и среди них кристалл $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$.

Цель настоящей работы – первое экспериментальное наблюдение и предварительное исследование оптичес-

кого СИ в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ на переходе $^3P_0 - ^3H_4(0)$ (длина волны $\lambda = 477.7$ нм, температура 2.2 К). Теоретические оценки показали [10], что в этом кристалле возможно наблюдение сигналов долгоживущего и триггерного СИ. Учитывая то обстоятельство, что сигналы СИ существенно мощнее сигналов долгоживущего фотонного эха, мы надеемся на практическое использование сигналов СИ в системах оптической памяти. На наш взгляд, представленный эксперимент может оказаться начальным для последующих перспективных исследований.

Эксперимент

Схемы экспериментальной установки и рабочих энергетических уровней $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ изображены на рис.1 и 2. Образец (кристалл $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$, атомная концентрация празеодима составляла 1 %) размером $4 \times 4 \times 8$ мм помещался в криостат и охлаждался до температуры жидкого гелия ($T = 2.2$ К). Оптическое возбуждение одиночным лазерным импульсом осуществлялось на переходе $^3H_4(0) - ^3P_0$ ($\lambda = 477.7$ нм) с частотой повторения 12.5 Гц. Излучение лазера фокусировалось на образец при помощи линзы с фокусным расстоянием 30 см, диаметр пучка излучения в образце составлял 0.1 мм. Длительность возбуждающего импульса была равна 10 нс, а спектральная ширина составляла 3–4 ГГц, что примерно на два порядка меньше неоднородной ширины оптического перехода. Мощность импульсов изменялась в пределах 5–35 кВт. Оптическая ось кристалла была ориентирована под углом 5° относительно направления распространения

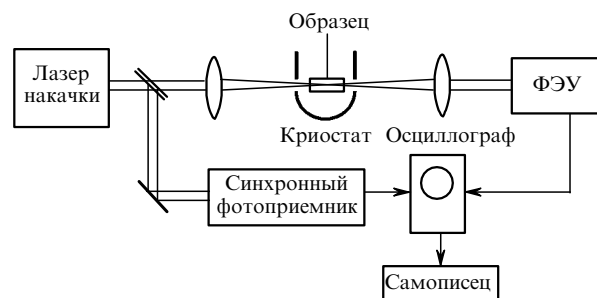


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского КНЦ РАН, Россия, 420029 Казань, Сибирский тракт, 10/7; тел: (8432) 76 05 03, (8432) 76 36 81; эл.почта: samartsev@dionis.kfti.kcn.ru

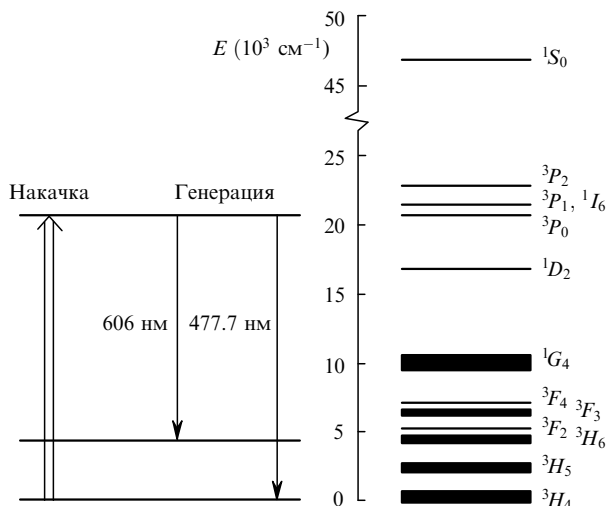


Рис.2. Схема рабочих энергетических уровней иона Pr^{3+} в кристалле LaF_3 .

возбуждающих импульсов. Коэффициент резонансного поглощения $\alpha = 4.7 \text{ см}^{-1}$.

Излучение резонансной среды регистрировалось ФЭУ, сигнал с которого наблюдался на осциллографе, запускаемом синхронизирующим импульсом с фотоприемника.

Основные результаты

В эксперименте исследовались характер и свойства излучения кристалла $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ в условиях постепенного увеличения пиковой мощности импульса накачки. Когда мощность лазерного импульса превышала некоторое пороговое значение ($\sim 10 \text{ кВт}$), резонансная среда излучала в направлении возбуждающего импульса (и в противоположном направлении) задержанный во времени на 12–15 нс оптический когерентный импульс длительностью 10–12 нс, который мы идентифицировали как импульс оптического СИ на переходе ${}^3P_0 - {}^3H_4(0)$.

Осциллограмма этого сигнала (правый пик) вместе с одиночным импульсом накачки (левый пик) приведена на рис.3,а. При мощности возбуждающего импульса меньше 10 кВт задержанный во времени импульс СИ отсутствовал. На рис.3,б приведена картина сигналов СИ, возбуждаемых последовательностью импульсов накачки с частотой повторения 12.5 Гц. Сигналы регистрировались в направлении, обратном направлению накачки.

Обратим внимание на ряд характерных признаков обнаруженного сигнала: 1) большая интенсивность, существенно превышающая некогерентный спонтанный фон; 2) время когерентного высвечивания (10 нс) значительно меньше времени жизни состояния 3P_0 [11]; 3) заметная задержка высвечивания импульса; 4) наличие характерных для СИ статистических свойств; 5) острая пространственная направленность излучения в обе стороны образца (сигнал наблюдался как в направлении распространения возбуждающего импульса, так и в противоположном направлении); 6) исчезновение сигнала с ростом температуры образца (выше 4.2 К), характерное для коллективных процессов типа СИ и оптических переходных процессов (усиление некогерентного спонтанного излучения в инвертированной среде не зависит от температуры). Эти признаки позволили нам сделать вывод, что за-

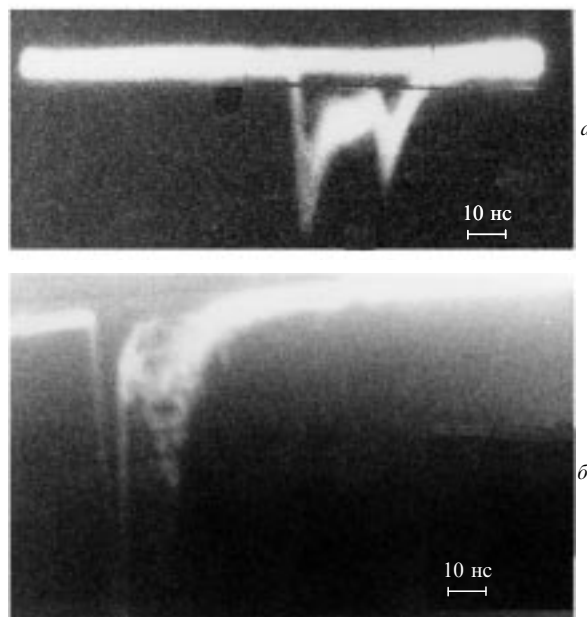


Рис.3. Осциллограммы сигналов СИ (справа) в протяженном образце $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ при возбуждении одиночным импульсом накачки (а) и серией импульсов с частотой повторения 12.5 Гц (б).

фиксированный после возбуждающего импульса дополнительный оптический сигнал является сигналом СИ.

Кроме этого сигнала СИ (голубого цвета), кристалл излучает и на переходе ${}^3P_0 - {}^3H_6$, соответствующем $\lambda = 606 \text{ нм}$, еще один сигнал СИ (оранжевого цвета). Осциллограмма этого сигнала аналогична вышеприведенной, однако время его задержки относительно импульса накачки достигало 30 нс (и даже больше), а пороговая мощность накачки, необходимая для возникновения сигнала СИ, составляла уже 30 кВт. Таким образом, можно говорить о наблюдении двухцветного СИ в данном кристалле.

Заключение

Обнаружение сигнала СИ в кристалле, активированном некрамерсовым редкоземельным ионом (Pr^{3+}), имеет принципиальное значение для его использования в оптических процессорах, особенно в триггерном режиме возбуждения [12]. Принимая во внимание факт существования у примесного иона празеодима долгоживущих сверхтонких подуровней основного состояния ${}^3H_4(0)$, можно ожидать появления в этом кристалле долгоживущего триггерного СИ [13]. Мы планируем реализовать эти режимы формирования СИ в ближайших работах.

Данная работа поддержана МНТЦ (проект № 737), Программой «Университеты России – Фундаментальные исследования» (проект № 990214), РФФИ (грант № 99-02-18495а) и Программой МНТ РФ «Физика квантовых и волновых процессов» («Фундаментальная спектроскопия» и «Лазерная физика»).

1. Dicke R.H. *Phys.Rev.*, **93**, 99 (1954).
2. Skribanovitz N., Hermann I.P., MacGillivray J.C., Feld M.S. *Phys. Rev.Letts*, **30**, 309 (1973).
3. Андреев А.В., Емельянов В.И., Ильинский Ю.А. *УФН*, **131**, 653 (1980).
4. Набойкин Ю.В., Самарцев В.В., Зиновьев П.В., Силаева Н.Б. *Когерентная спектроскопия молекулярных кристаллов* (Киев, Наукова думка, 1986).

5. Florian R., Schwan L.O., Schmid D. *Solid State Comms*, **42**, 55 (1982).
6. Florian R., Schwan L.O., Schmid D. *Phys.Rev.A*, **28**, 2709 (1984).
7. Зиновьев П.В., Лопина С.В., Набойкин Ю.В. и др. *ЖЭТФ*, **85**, 1945 (1983).
8. Набойкин Ю.В., Самарцев В.В., Силаева Н.Б. *Изв. АН СССР. Сер.физич.*, **47**, 1328 (1983).
9. Zinoviev P.V., Samartsev V.V., Silaeva N.B. *Laser Physics*, **1**, 1 (1991).
10. Kalachev A.A., Samartsev V.V. *Laser Physics*, **9**, 916 (1999).
11. Chen Y.C., Chiang K., Hartmann S.R. *Optics Comms*, **29**, 181 (1979).
12. Andrianov S.N., Samartsev V.V. *Laser Physics*, **8**, 1194 (1998).
13. Andrianov S.N., Samartsev V.V. *Laser Physics*, **9**, 470 (1999).

V.A.Zuikov, A.A.Kalachyov, V.V.Samartsev, A.M.Shegeda. Optical superradiance in a $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ crystal.

Optical superradiance in a van Vleck paramagnet (a $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ crystal on the $^3P_0 - ^3H_4(0)$ transition) was experimentally obtained for the first time. Superradiance at a wavelength of 477.7 nm was emitted by a sample 8 mm long, with resonant-absorption coefficient $\alpha = 4.7 \text{ cm}^{-1}$, excited by 10-ns laser pulses at a temperature of 2.2 K.