

## Временная эволюция импульса когерентного вынужденного излучения в трехуровневой системе в кристалле $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$

А.И.Агафонов, Г.Г.Григорян, Н.В.Знаменский, Э.А.Манькин, Ю.В.Орлов, Е.А.Петренко, А.Ю.Шашков

*Исследованы временные характеристики когерентного вынужденного излучения на переходе  ${}^3P_0 - {}^3H_6$  иона  $\text{Pr}^{3+}$ , введенного в матрицу  $\text{LaF}_3$ , при перестройке частоты накачки в окрестностях перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$ . Установлено, что при точной настройке в резонанс импульс генерации, состоящий из цуга пикосекундных пиков суммарной длительностью около 10 нс, был задержан относительно начала импульса накачки на 3–4 нс. С увеличением расстройки наблюдалось изменение формы импульса когерентного вынужденного излучения и увеличение его задержки до 10 нс. Предложена теоретическая интерпретация наблюдаемых экспериментальных результатов.*

**Ключевые слова:** динамика излучения, когерентное вынужденное излучение, оптическая накачка.

Когерентное резонансное возбуждение кристалла  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$  на переходе  ${}^3H_4 - {}^3P_0$  иона  $\text{Pr}^{3+}$ , впервые реализованное в [1], экспериментально изучалось в целом ряде работ [2–5]. Было установлено, что при когерентной оптической накачке этого перехода в кристалле генерируется вынужденное излучение на смежном переходе  ${}^3P_0 - {}^3H_6$ , обладающее рядом интересных особенностей, которые отсутствуют при некогерентном возбуждении. В частности в [2] было продемонстрировано, что при достаточно большом превышении мощности накачки над пороговой мощностью импульс генерации состоял из двух пиков длительностью не более 1 нс каждый, которая определялась разрешающей способностью регистрирующей аппаратуры. В работе [3] было показано, что возникновение генерации на переходе  ${}^3P_0 - {}^3H_6$  существенно влияет на развитие стимулированного фотонного эха в кристалле  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$ . Наконец, сравнительно недавно при когерентном возбуждении перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$  иона  $\text{Pr}^{3+}$  в матрице  $\text{LaF}_3$  было обнаружено сверхизлучение на переходах  ${}^3P_0 - {}^3H_4(0)$  и  ${}^3P_0 - {}^3H_6(1)$  [4, 5], которое можно рассматривать как альтернативу лазерной генерации на переходе  ${}^3P_0 - {}^3H_6$ .

В настоящей работе детально изучены временные характеристики вынужденного излучения на переходе  ${}^3P_0 - {}^3H_6$ , возникающего при когерентном возбуждении кристалла  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$  на переходе  ${}^3H_4 - {}^3P_0$ . В отличие от [2] эти исследования выполнены с пикосекундным временным разрешением.

Источником оптической накачки являлся лазер на органических красителях (ЛК) с перестраиваемой частотой, возбуждаемый эксимерным ХеСl-лазером. С помощью длиннофокусной линзы ( $f = 50$  см), суживающей поперечный размер светового пучка до  $0.5 \times 0.5$  мм, лазерное излучение фокусировалось в кристалл  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$  толщиной 2 мм с плоскопараллельными полированными гра-

нями (атомная концентрация ионов  $\text{Pr}^{3+}$  составляла 1 %). Кристалл помещался в гелиевый криостат, способный термостатировать образец в диапазоне от 4.2 К до комнатной температуры.

С помощью трех световодов падающее на кристалл и прошедшее через него излучение накачки, а также возбуждаемое в нем вынужденное когерентное излучение направлялось на времяанализирующую щель электронно-оптической камеры «Агат». Ее временное разрешение зависело от выбранной скорости развертки и могло достигать 2–3 пс. Камера запускалась оптическим датчиком, на который с выхода лазера на красителе направлялось 4 % интенсивности излучения генерации. При таком способе включения нестабильность запуска была минимальной, т. к. она определялась только джиттером времени срабатывания электронной схемы камеры и позволяла работать с максимальными скоростями развертки. Задержка начала развертки камеры относительно запускающего импульса составляла 80 нс, поэтому для ее компенсации возбуждающее излучение от ЛК проходило оптическую линию задержки и только потом направлялось на кристалл.

Спектральные характеристики излучения исследовались с помощью дифракционного спектрографа ДФС-452 и интерферометра Фабри–Перо с областью дисперсии  $0.25 \text{ см}^{-1}$  и аппаратной полушириной  $0.004 \text{ см}^{-1}$ .

В выполненных экспериментах частота генерации лазера на красителе  $\omega_L$  перестраивалась в пределах неоднородной ширины линии  $\Delta\omega_0/(2\pi c)$  перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$  ( $\omega_L/(2\pi c) = 20930.1 \text{ см}^{-1}$ ) иона  $\text{Pr}^{3+}$ , составляющей при  $T = 4.2$  К величину  $\sim 1.8 \text{ см}^{-1}$ . Спектральная ширина линии генерации  $\Delta\omega_L/(2\pi c)$  не превышала  $0.06 \text{ см}^{-1}$ . Импульс лазерной генерации имел колоколообразную форму с шириной по основанию  $\tau_L = 15$  нс, что значительно меньше времен продольной ( $T_1$ ) и поперечной ( $T_2$ ) релаксации для перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$  при гелиевых температурах, составляющих соответственно 47 и 2.4 мкс. Интенсивность излучения накачки  $I_L$  на входе в кристалл определялась лучевой прочностью последнего и могла достигать  $\sim 40 \text{ МВт/см}^2$ , что соответствует площади импульса  $\Theta_L \approx 1.5\pi$ .

А.И.Агафонов, Г.Г.Григорян, Н.В.Знаменский, Э.А.Манькин, Ю.В.Орлов, Е.А.Петренко, А.Ю.Шашков. РНЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова, 1; e-mail: nvz@kiae.ru

Поступила в редакцию 13 января 2004 г., после доработки – 15 июня 2004 г.

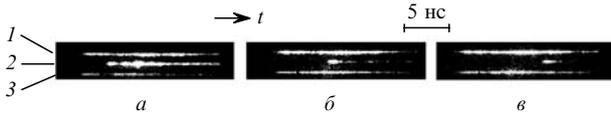


Рис.1. Хронограммы падающего на кристалл (1) и прошедшего через него (3) возбуждающего излучения, а также когерентного вынужденного излучения (2) при  $\Delta\omega/(2\pi c) = 0$  (а), 0.10 (б) и 0.18  $\text{см}^{-1}$  (в). Временное разрешение не хуже 100 пс.

Уже при интенсивности  $I_L \approx 20 \text{ МВт/см}^2$  на выходе из кристалла наблюдалось когерентное вынужденное излучение, частота которого  $\omega_g/(2\pi c) = (16708.6 \pm 0.1) \text{ см}^{-1}$  соответствовала частоте перехода  ${}^3P_0 - {}^3H_6$ . Оно возбуждалось как в прямом, так и в обратном направлении, распространялось по лучу накачки и имело спектральную ширину  $\Delta\omega_g/(2\pi c) \approx 0.04 \text{ см}^{-1}$ . Вынужденное излучение генерировалось при перестройке  $\omega_L$  в пределах неоднородной ширины перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$  и наблюдалось вплоть до  $T = 25 \text{ К}$ .

На рис.1 приведены временные развертки падающего на кристалл и прошедшего через него возбуждающего излучения, а также когерентного вынужденного излучения. Рис.1,а соответствует точной настройке  $\omega_L$  в резонанс с частотой перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$ . На рис.1,б,в расстройки  $\Delta\omega/(2\pi c)$  от резонанса составляют соответственно 0.10 и 0.18  $\text{см}^{-1}$ . Хорошо видно, что при  $\Delta\omega/(2\pi c) = 0$  импульс вынужденного излучения состоит из цуга пиков с длительностью по полувысоте 0.7 нс и интервалом между ними  $\sim 1.5 \text{ нс}$ . При этом задержка между накачкой и началом развития генерации минимальна и составляет  $\sim 4 \text{ нс}$ . В этих условиях излучение накачки, прошедшее через кристалл, тоже имеет пиковую, хотя и нерегулярную, структуру. Следует отметить, что появление такой структуры обусловлено когерентным характером взаимодействия лазерного излучения с веществом [6] и ранее наблюдалось в аналогичных экспериментах при использовании в качестве рабочей среды паров щелочных металлов [7]. С увеличением расстройки  $\Delta\omega/(2\pi c)$  как в коротковолновой, так и в длинноволновой области время задержки импульса генерации относительно импульса накачки увеличивалось до 10 нс, а его суммарная длительность уменьшалась до 2 нс, что хорошо видно из рис.1,б,в.

Теоретический анализ полученных результатов проводился на основе самосогласованной системы уравнений Максвелла–Блоха, описывающей поведение трехуровневой системы с  $\Lambda$ -конфигурацией уровней (рис.2), находящейся под воздействием светового поля, частота которого  $\omega_L$  совпадает с частотой перехода  $|1\rangle - |3\rangle$ . При этом генерация развивается на смежном переходе  $|2\rangle - |3\rangle$ . Предполагается, что  $\mu_{12} \ll \mu_{13}$  ( $\mu$  – матричный дипольный элемент соответствующего перехода) и  $\tau_L \ll T_2 \ll T_1$ , т.е. выполняется условие когерентного возбуждения. Также считается, что толщина рабочей среды  $l$  много меньше оптической длины импульса  $c\tau_L$ . Последнее обстоятельство позволяет не рассматривать простран-

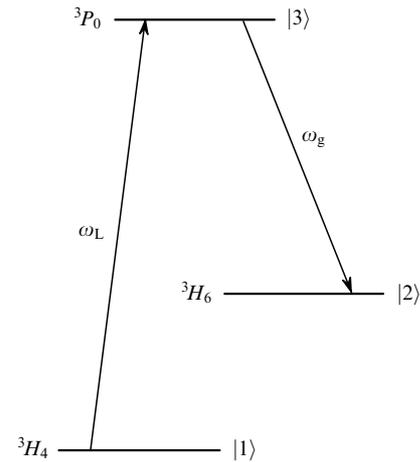


Рис.2. Схема уровней иона  $\text{Pr}^{3+}$  в матрице  $\text{LaF}_3$ .

ственную производную в волновом уравнении Максвелла, заменив ее характерным временем распространения световой волны в кристалле  $T_p = l/c$ .

Самосогласованная система уравнений Максвелла–Блоха решалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Было установлено, что при выполнении условий

$$\frac{T_2}{T_p} < \alpha \ll 1 \quad \text{и} \quad \omega_R < \frac{\alpha}{T_p}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 2\pi\omega_{23}N_0\mu_{23}^2T_2T_p/\hbar$ , а  $\omega_R$  – частота Раби на переходе  $|1\rangle - |3\rangle$ , наблюдается моноимпульсный режим генерации с характерной длительностью  $t_g \sim (2\pi\omega_{23}N_0\mu_{23}^2/\hbar)^{-1/2}$ . Если же  $\alpha \gg 1$  и  $\omega_R > \alpha/T_p$ , имеет место многоимпульсный режим генерации на переходе  $|2\rangle - |3\rangle$ , продолжающийся до полного опустошения уровня  $|3\rangle$  в конце каждого отдельного импульса.

При малых интенсивностях импульса накачки генерация развивается на его хвосте, а с ростом  $I_L$  происходит разбиение импульса вынужденного излучения на несколько субимпульсов и смещение их к началу импульса возбуждающего лазера.

Таким образом, предложенная модель качественно хорошо описывает временные особенности генерации на переходе  ${}^3H_6 - {}^3P_0$ , возникающей при когерентном резонансном возбуждении перехода  ${}^3H_4 - {}^3P_0$ .

1. Kichinski R., Hartman S.R. *AIP Conf. Proc.*, **146**, 417 (1986).
2. Манькин Э.А., Белов М.Н., Евсин О.А. и др. *Труды ФТИАН*, **2**, 84 (1991).
3. Манькин Э.А., Знаменский Н.В., Марченко Д.В., Петренко Е.А. *Письма в ЖЭТФ*, **54** (3), 172 (1991).
4. Zuikov V.A., Kalachev A.A., Samartsev V.V., Shegeda A.M. *Laser Phys.*, **9** (4), 951 (1999).
5. Zuikov V.A., Kalachev A.A., Samartsev V.V., Shegeda A.M. *Laser Phys.*, **10** (1), 364 (2000).
6. Полуэтов И.А., Попов Ю.М., Ройтберг В.С. *Квантовая электроника*, **2** (6), 1147 (1975).
7. Знаменский Н.В., Истомин М.И., Калинин Ю.Г., Шашков А.Ю. и др. *Письма в ЖТФ*, **12** (16), 1015 (1986).