

Квантовые флуктуации излучения кольцевого чип-лазера на YAG:Nd

Е.Г.Ларионцев, В.В.Фирсов

Теоретически и экспериментально исследованы флуктуации интенсивности излучения кольцевого чип-лазера на YAG:Nd в режиме бегущей волны, возникающие из-за шума спонтанного излучения. В соответствии с теорией и экспериментом в исследуемом лазере квантовые флуктуации интенсивности излучения резко уменьшаются с ростом превышения накачки над порогом. В результате проведенных исследований найден фактор β , определяющий отношение скорости спонтанного излучения в генерируемую моду к полной скорости спонтанного излучения во все моды. Обнаружено влияние скорости релаксации с нижнего лазерного уровня на квантовые флуктуации интенсивности излучения.

Ключевые слова: твердотельный кольцевой лазер, спонтанное излучение, квантовые флуктуации, релаксационные колебания.

1. Введение

Квантовые флуктуации лазерного излучения обусловлены шумом спонтанного излучения и другими квантовыми шумами, возникающими в активной среде с инверсной населенностью на рабочем переходе. Флуктуации интенсивности излучения, происходящие под действием квантовых шумов, обычно резко уменьшаются с ростом превышения накачки над порогом. Однако в лазерах с медленной релаксацией инверсной населенности и малой длиной резонатора квантовые флуктуации могут оставаться сильными даже при большом превышении порога генерации [1–6]. Из-за столь необычного поведения флуктуаций интенсивности с ростом мощности накачки такие флуктуации называют беспороговыми.

Для экспериментальных исследований квантовых флуктуаций нужны лазеры с низким уровнем технических шумов. В этом плане монолитные твердотельные лазеры (чип-лазеры) являются более удобными и стабильными источниками излучения по сравнению с лазерами, состоящими из дискретных элементов (резонатора, образованного внешними зеркалами, активного кристалла и других внутрирезонаторных устройств). Насколько нам известно, квантовые флуктуации излучения твердотельных кольцевых лазеров ранее не были исследованы экспериментально. В настоящей работе проведены теоретические и экспериментальные исследования квантовых флуктуаций излучения в кольцевом чип-лазере на YAG:Nd, работающем в стационарном режиме однонаправленной генерации.

В кольцевых чип-лазерах при воздействии на них внешним неоднородным магнитным полем можно эффективно управлять динамикой лазерного излучения и реализовать большое количество режимов генерации, различающихся по временным и спектральным характери-

стикам излучения в условиях одномодовой генерации для каждой из встречных волн [7]. Такие лазерные системы представляют большой интерес для фундаментальных исследований особенностей квантовых флуктуаций излучения в лазерах с медленной релаксацией инверсной населенности и малой длиной резонатора.

2. Теория

Один из методов теоретического исследования квантовых флуктуаций в лазерах основан на описании динамики внутрирезонаторного поля на основе уравнений Гейзенберга–Ланжевена [8]. В этом подходе система квантовых уравнений Гейзенберга преобразуется в систему уравнений полуклассической теории лазерной генерации с ланжевеновскими источниками шума. В кольцевом чип-лазере, работающем в одномодовом режиме однонаправленной генерации (режиме бегущей волны), квантовые флуктуации интенсивности излучения можно рассматривать на основе следующей системы скоростных уравнений [1]:

$$\dot{n} = (\beta\gamma_1 N - \Gamma_c)n + R_{sp} + f_n, \quad (1)$$

$$\dot{N} = S - \gamma_1 N - \beta\gamma_1 Nn + f_N,$$

где

$$R_{sp} = \beta\gamma_1 N \quad (2)$$

– скорость спонтанного излучения в генерируемую моду; n – число фотонов внутри резонатора в генерируемой моде; N – число активных атомов, возбужденных на верхний уровень лазерного перехода; Γ_c – скорость релаксации внутрирезонаторного поля; γ_1 – скорость релаксации населенности верхнего уровня; S – скорость накачки; β – фактор, определяющий отношение скорости спонтанного излучения в генерируемую моду к полной скорости спонтанного излучения во все моды. Ланжевеновские источники шумов f_n и f_N имеют корреляционные функции

Е.Г.Ларионцев, В.В.Фирсов. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобелева МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: e.lariontsev@yahoo.com

$$\langle f_n(t)f_n(t') \rangle = 2R_{sp}n\delta(t-t'), \quad (3)$$

$$\langle f_N(t)f_N(t') \rangle = 2\gamma_1 N\delta(t-t'). \quad (4)$$

Теоретический анализ, проведенный в [1], показал, что источник шума f_N слабо влияет на амплитудные и фазовые флуктуации излучения твердотельных лазеров и его можно не учитывать. Из уравнений (1) следует, что среднее число фотонов в стационарном режиме генерации

$$\langle n \rangle = \frac{\eta + \sqrt{\eta^2 + 4\beta(1+\eta)}}{2\beta}, \quad (5)$$

где η – превышение накачки над порогом генерации ($S/S_{th} = 1 + \eta$, S_{th} – пороговая скорость накачки). Флуктуации числа фотонов $\delta n = n - \langle n \rangle$ удобно выражать через относительную дисперсию D_n , которая, как показано в [1], определяется по формуле

$$D_n = \frac{\langle (\delta n)^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_N} \left(1 + \frac{\gamma_N^2}{\omega_F^2 + \gamma_n \gamma_N} \right), \quad (6)$$

где

$$\omega_F^2 = \beta\gamma_1\Gamma_c\langle n \rangle \quad (7)$$

– квадрат частоты релаксационных колебаний излучения. Параметры γ_n и γ_N в (6) определяются выражениями

$$\gamma_n = \frac{\Gamma_c}{\langle n \rangle + 1}, \quad (8)$$

$$\gamma_N = \gamma_1(1 + \beta\langle n \rangle). \quad (9)$$

Формулы (6)–(9) справедливы в случае быстрой релаксации с нижнего уровня, который считается незаселенным. Как показано в [1], с учетом конечной скорости релаксации γ_2 населенности нижнего уровня можно пользоваться приближенной формулой

$$D_n = \frac{\langle (\delta n)^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_N + \gamma_{NL}} \left[1 + \frac{\gamma_N^2}{\omega_F^2 + (\gamma_n + \gamma_{NL})\gamma_N} \right], \quad (10)$$

где $\gamma_{NL} = \omega_F^2/\gamma_2$ – дополнительная релаксационная постоянная, связанная с релаксацией с нижнего уровня.

3. Экспериментальная установка

Исследуемый чип-лазер представлял собой моноблок в виде призмы с одной сферической гранью (радиус кривизны 50 мм) и тремя плоскими гранями полного внутреннего отражения. Геометрический периметр резонатора составлял 2.8 см. Угол неплоскостности резонатора был равен 80° . В работе [7] был предложен простой и эффективный способ управления динамикой излучения кольцевого чип-лазера на YAG:Nd при воздействии на него внешним постоянным магнитным полем, создающим как частотную, так и значительную амплитудную невязанности, которые можно изменять при перемещении магнита относительно активного элемента чип-лазера. Этот способ был использован в настоящей работе для получения режима стационарной однонаправленной генерации.

Накачка лазера осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом, длина волны излучения которого составляла 0.810 мкм. Регистрация характеристик излучения проводилась с помощью цифрового осциллографа TektronixTDS 2014.

4. Экспериментальные результаты

Основной целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование зависимости флуктуаций интенсивности излучения (относительной дисперсии D_n) от скорости накачки в окрестности порога генерации. На рис.1 приведены осциллограммы интенсивности выходного излучения при двух значениях превышения накачки над порогом η . На этих осциллограммах видны релаксационные колебания интенсивности излучения на релакса-

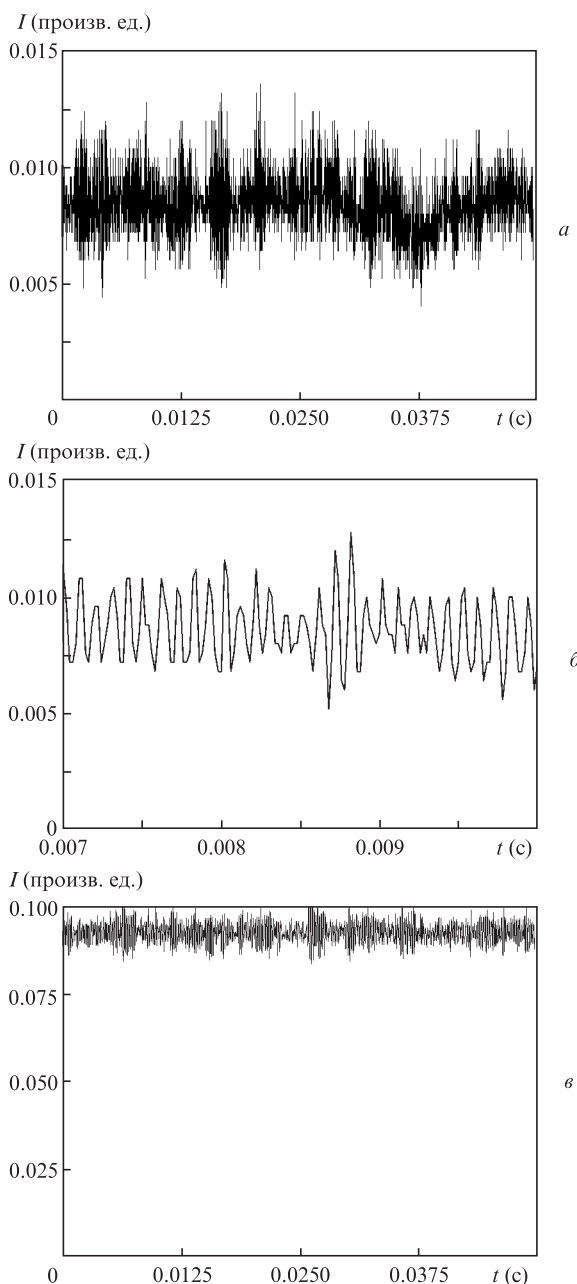


Рис.1. Осциллограммы интенсивности выходного излучения в стационарном режиме однонаправленной генерации при $\eta = 0.0022$ (а, б) и 0.045 (в).

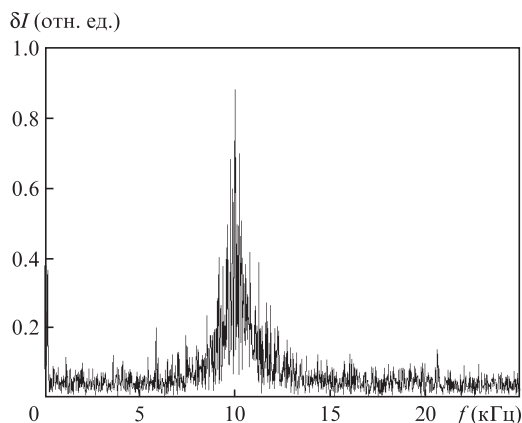


Рис.2. Спектр флуктуаций интенсивности излучения $\delta I(f)$ при $\eta = 0.0022$.

ционной частоте, возбуждаемые шумом спонтанного излучения. На рис.1,а,б флуктуации интенсивности показаны для двух временных интервалов. Видно, что в исследуемом лазере наблюдается значительное уменьшение флуктуаций интенсивности излучения с ростом мощности накачки вблизи порога генерации. На рис.2 представлен спектр флуктуаций интенсивности излучения при $\eta = 0.0022$, в котором виден пик на частоте релаксационных колебаний $f_r = \omega_r / (2\pi) = 10$ кГц.

При обработке осциллограмм, полученных при различных значениях η , вычислялась относительная дисперсия флуктуаций интенсивности излучения

$$D_n = \frac{\langle (\delta I)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2},$$

где $\delta I = I - \langle I \rangle$, а $\langle I \rangle$ – среднее значение интенсивности. Усреднение проводилось за время наблюдения, равное 50 мс. Экспериментальная зависимость D_n от параметра η показана на рис.3 точками.

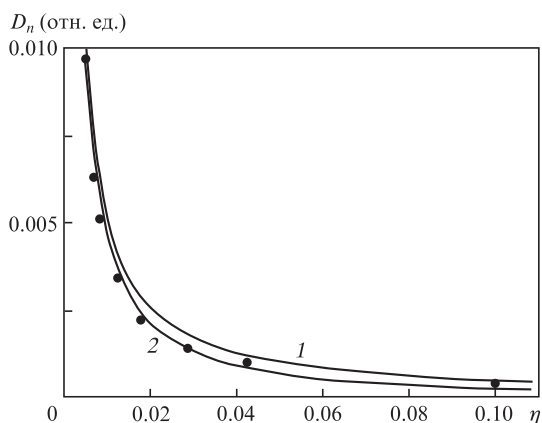


Рис.3. Экспериментальная (точки) и расчетные (сплошные кривые) зависимости D_n от превышения накачки над порогом η .

5. Сравнение результатов теории и эксперимента

Параметры исследуемого кольцевого лазера Γ_c и γ_1 известны из приведенных ранее экспериментов [7]: $\Gamma_c = 4.38 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$, $\gamma_1 = 1/T_1$ ($T_1 = 240 \times 10^{-6} \text{ с}$). Единственным неизвестным параметром является β . Этот параметр был найден следующим образом. В первой экспериментальной точке $\eta = 0.0022$ (см. рис.2) были измерены дисперсия $D_n = 0.028$ и частота релаксационных колебаний $f_r = 10$ кГц. Решая численно уравнения (5)–(9) при этих значениях D_n и f_r , получаем $\beta = 5 \times 10^{-10}$.

На рис.3 приведены кривая 1, рассчитанная по формулам (5)–(9) при $\beta = 5 \times 10^{-10}$, а также кривая 2, которая была рассчитана при том же значении β с учетом конечной скорости релаксации с нижнего лазерного уровня (см. формулу (10)) при $\gamma_2/\gamma_1 = 10^4$. Видно, что теоретически рассчитанная зависимость (кривая 2) хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Таким образом, в соответствии с теорией и экспериментом, в исследуемом лазере квантовые флуктуации интенсивности излучения резко уменьшаются с ростом превышения накачки над порогом: при $\eta = 0$ относительная дисперсия $D_n = 0.85$, а при $\eta = 0.04$ она уменьшается до 0.001.

6. Заключение

При экспериментальном исследовании квантовых флуктуаций интенсивности выходного излучения кольцевого чип-лазера, работающего в режиме бегущей волны, получены результаты, хорошо согласующиеся с теорией при учете шума спонтанного излучения f_n и в пренебрежении шумом f_N в уравнении для разности населенностей N . Проведенные исследования позволили найти для исследуемого лазера фактор спонтанного излучения β . При воздействии на исследуемый кольцевой чип-лазер постоянным неоднородным магнитным полем можно получить ряд автомодуляционных режимов двунаправленной генерации (периодических, квазипериодических и хаотических) [7]. Представляет интерес исследование квантовых флуктуаций интенсивности излучения в этих режимах.

1. Van Druten N.J., Lien Y., Serrat C., Oemrawsingh S.S.R., van Exter M.P., Woerdman J.P. *Phys. Rev. A*, **62**, 053808 (2000).
2. Hofmann H.F., Hess O. *Phys. Rev. A*, **62**, 063807 (2000).
3. Hofmann H.F., Hess O. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 1926 (2000).
4. Lien Y., de Vries S.M., van Druten N.J., van Exter M.P., Woerdman J.P. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 2786 (2001).
5. Lien Y., de Vries S.M., van Exter M.P., Woerdman J.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 1461 (2002).
6. Lariontsev E.G. *Phys. Rev. A*, **83**, 063803 (2011).
7. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **43**, 477 (2013).
8. Скалли М.О., Зубайри М.С. *Квантовая оптика* (М.: Физматлит, 2003).