

Стохастический резонанс на субгармонике периодического сигнала модуляции в твердотельном лазере

Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина

Экспериментально исследовано стохастическое возбуждение субгармоники периодического сигнала модуляции в спектре интенсивности излучения твердотельного лазера при модуляции скорости накачки шумом и периодическим сигналом. Обнаружен стохастический резонанс (СР), возникающий при наличии в исследуемом лазере бистабильности. Найдены условия, при которых СР наблюдается на субгармонике периодического сигнала модуляции.

Ключевые слова: кольцевой лазер, нелинейная динамика, стохастический резонанс, релаксационная частота, шумовая модуляция, субгармоника периодического сигнала модуляции.

1. Введение

В стохастическом резонансе (СР) проявляется конструктивная роль шума: отклик системы на периодический сигнал модуляции возрастает под действием случайных шумовых колебаний [1, 2]. СР наблюдался в большом числе динамических систем, имеющих бистабильные состояния (в частности, в кольцевом лазере [3, 4]). В ряде работ было показано, что СР возможен и при отсутствии бистабильности [4–7]. Проведенные ранее исследования показали, что СР может возникать как на основной частоте сигнала модуляции f_p , так и на ее высших гармониках [6, 8, 9].

В работе [10] было исследовано возбуждение релаксационных колебаний в твердотельном лазере при параметрическом резонансе, когда субгармоника $f_p/2$ периодического сигнала модуляции накачки близка к частоте релаксационных колебаний f_r . В настоящей работе проведены экспериментальные исследования, в которых, помимо периодической модуляции, создавалась шумовая модуляция. В результате нами обнаружено стохастическое возбуждение субгармоники периодического сигнала модуляции в спектре интенсивности излучения твердотельного лазера и наблюдался СР на субгармонике $f_p/2$ модулирующего сигнала.

2. Экспериментальная установка

В качестве объекта исследования был выбран моноблочный чип-лазер на кристалле YAG:Nd с неплоским резонатором, работающий на длине волны 1.06 мкм. Геометрический периметр кольцевого резонатора составлял 28 мм, а угол неплоскостности был равен 85°. Накачка лазера осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом ($\lambda = 0.810$ мкм). В цепь питания диода были включены

генератор периодических колебаний, который модулировал мощность накачки исследуемого лазера, и генератор шума. Ширина спектра шума составляла 200 кГц.

В процессе экспериментальных исследований интенсивность шума накачки изменялась при вариации выходного напряжения генератора шума от нуля до максимального значения, определяемого максимальной интенсивностью электрического шума на выходе генератора шума, которая достигала 10^{-6} Вт/Гц. При обработке экспериментальных исследований интенсивность шума накачки D измерялась в относительных единицах (относительная единица интенсивности шума накачки соответствует интенсивности электрического шума на выходе генератора, равной 10^{-7} Вт/Гц).

Как показали проведенные нами ранее исследования [11], режимами генерации кольцевого чип-лазера можно эффективно управлять с помощью внешнего магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом. В отсутствие внешнего поля исследуемый лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода, а при наличии внешнего поля – в стационарном режиме однонаправленной генерации. Переход из автомодуляционного режима первого рода в режим однонаправленной генерации происходил вследствие возникновения значительной амплитудной невязанности в кольцевом резонаторе при наложении магнитного поля.

В процессе экспериментов регистрировались временные и спектральные характеристики интенсивности лазерного излучения в режиме однонаправленной генерации при различных мощностях шумового воздействия. Регистрация сигналов производилась с помощью АЦП 20-12-PCI и широкополосного цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014.

3. Результаты экспериментальных исследований

При периодической модуляции превышение накачки над порогом

$$\eta(t) = \eta_0 + h \sin(2\pi f_p t), \quad (1)$$

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

Поступила в редакцию 27 ноября 2012 г., после доработки – 2 сентября 2013 г.

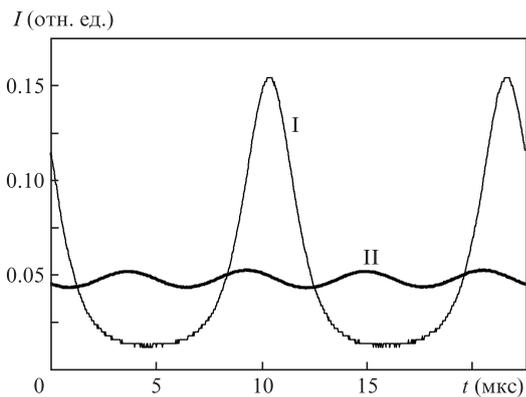


Рис.1. Осциллограммы интенсивности лазерного излучения для ветвей I и II при частоте модуляции накачки $f_p = 180$ кГц в отсутствие внешнего шума.

где η_0 – превышение накачки над порогом в отсутствие модуляции накачки, а h – глубина модуляции накачки.

Основная часть экспериментальных исследований проводилась при постоянном превышении накачки над порогом ($\eta_0 = 0.1$) и постоянной глубине модуляции ($h = 0.05$); частота релаксационных колебаний $f_r = 89$ кГц, а частота периодической модуляции накачки $f_p = 180$ кГц.

В отсутствие внешнего шума ($D = 0$), как показано в работе [10], отклик лазера на периодическую модуляцию накачки оказывается бистабильным: наблюдаются две ветви бистабильных состояний (ветви I и II). При частотах модуляции $f_p < 182$ кГц на ветви II имеет место синусоидальная модуляция интенсивности излучения с частотой f_p , а на ветви I (в области частот $120 < f_p < 195$ кГц) модуляция интенсивности излучения происходит с удвоенным периодом. На рис.1 приведены осциллограммы интенсивности излучения для ветвей I и II при $f_p = 180$ кГц.

3.1. Стохастическое возбуждение субгармоники периодического сигнала модуляции

В проводившихся в настоящей работе исследованиях в отсутствие создаваемого генератором внешнего шума нами выбиралось исходное состояние лазера, соответствующее ветви II. Это состояние всегда возникнет при отсутствии внешнего шума, если частоту модуляции накачки f_p плавно увеличивать от начального значения (менее 120 кГц) до рабочей точки (180 кГц).

Исследования показали, что при наличии внешнего шума отклик лазера существенно изменяется с увеличением интенсивности D внешнего шума. На рис.2 показаны экспериментально измеренные осциллограммы интенсивности излучения при трех характерных значениях D . При $D < 1.5$ (рис.2,а) отклик лазера близок к синусоидальному с периодом, равным периоду модулирующего сигнала $T_p = 1/f_p$, а при интенсивности шума, превышающей пороговое значение ($D > 1.5$) (рис.2,б), модуляция излучения происходит с удвоенным периодом ($T = 2T_p = 2/f_p$).

На рис.3 показаны спектры интенсивности излучения $S(\omega)$ при различных интенсивностях внешнего шума. Спектр на рис.3,а получен при $D = 0$. В этом случае шумовой отклик обусловлен собственными шумами в системе. На рис.3,а видно, что в спектре излучения присутствует дискретная компонента на частоте модуляции $f_p = 180$ кГц, а компонента на частоте субгармоники $f_p/2$ отсутствует. С ростом интенсивности шума D происходит существенное

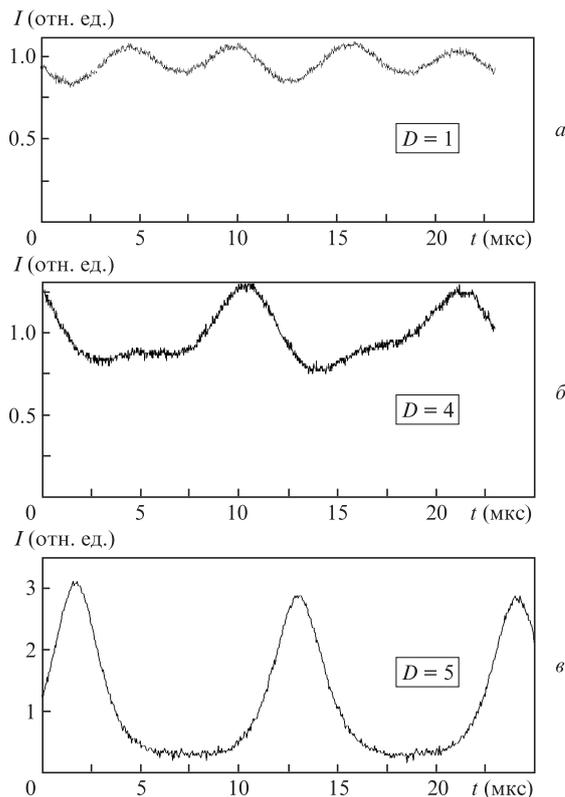


Рис.2. Осциллограммы интенсивности излучения при интенсивностях внешнего шума $D = 1$ (а), 4 (б) и 5 (в).

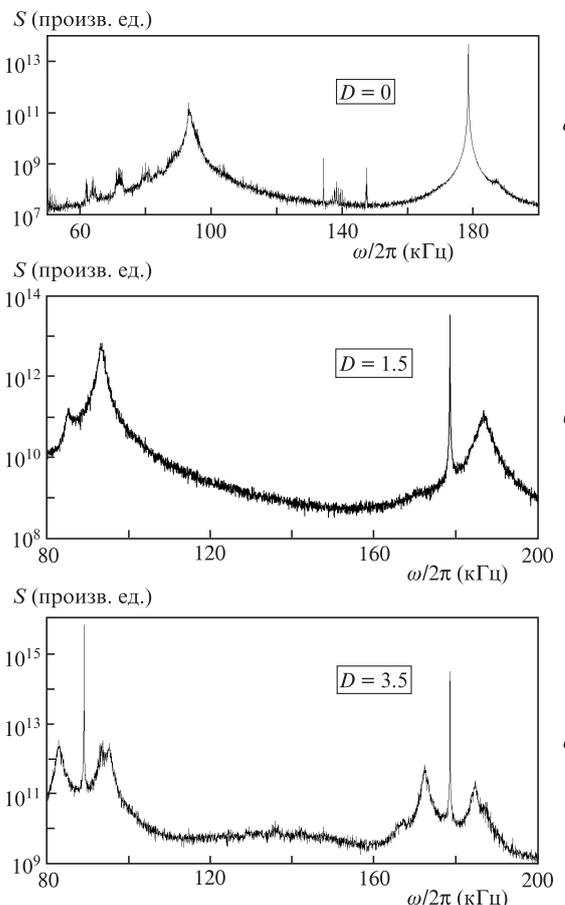


Рис.3. Спектры интенсивности излучения $S(\omega)$ при различных интенсивностях внешнего шума.

увеличение шумового отклика лазера в области частот, близких к релаксационной частоте f_r , а также к удвоенной релаксационной частоте (рис.3,б). Такое возрастание шумового отклика объясняется предбифуркационным усилением шума [12]. Проведенные в настоящей работе исследования показали, что при увеличении интенсивности шума (в области $D > 1.5$), наряду с параметрическим усилением шумового отклика, возникает стохастическое возбуждение субгармоники $f_p/2$ модулирующего сигнала. В этой области амплитуда $S(f_p/2)$ спектральной компоненты на частоте субгармоники становится не равной нулю и доминирует в спектре интенсивности излучения. Насколько известно авторам, эффект стохастического возбуждения субгармоники модулирующего сигнала ранее не был исследован.

3.2. Стохастический резонанс

Нами было экспериментально обнаружено, что отклик лазера на субгармонике модулирующего сигнала $f_p/2$, возникающий вследствие стохастического возбуждения, растет с увеличением интенсивности шума. По полученным при разных интенсивностях шума D спектрам $S(\omega)$ была измерена зависимость отношения сигнал/шум R на частоте $f_p/2$ от D (рис.4). Эта зависимость имеет вид, типичный для СР: отношение сигнал/шум на половинной частоте достигает максимума при оптимальном значении мощности шумовой составляющей накачки и стремится к нулю при малых и больших значениях мощности.

В проводившихся ранее исследованиях СР наблюдался на основной и высших гармониках сигнала модуляции. В исследуемом лазере, в отличие от предыдущих работ, СР обнаружен не на высших гармониках сигнала модуляции, а на его субгармонике. В работе [4] СР в твердотельном лазере наблюдался на основной гармонике

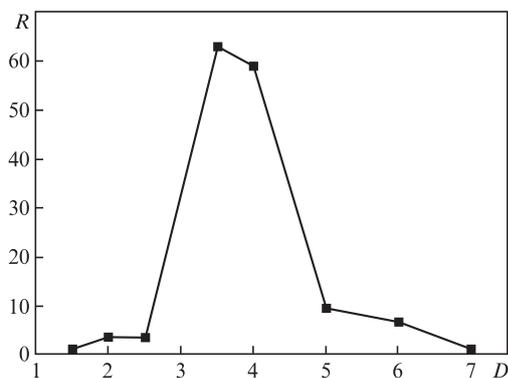


Рис.4. Зависимость отношения сигнал/шум R на частоте субгармоники $f_p/2$ от интенсивности шума.

сигнала модуляции при отсутствии бистабильности. СР на субгармонике модулирующего сигнала, исследованный в настоящей работе, возникает лишь при наличии в лазере бистабильного отклика на периодический сигнал модуляции накачки. Отметим, что оптимальные значения интенсивности шума в отсутствие бистабильности [4] и при ее наличии (в настоящей работе) оказываются близкими (отличие составляет примерно 50%). Так же как и в [4], отклик лазера на модуляцию накачки периодическим сигналом и шумом аналогичен отклику нелинейного осциллятора Тода. На основе проведенных в настоящей работе исследований можно утверждать, что обнаруженные нами явления (стохастическое возбуждение субгармоники сигнала модуляции и СР на субгармонике) могут иметь место и в других нелинейных осцилляторах.

Возможность возникновения СР на субгармонике существенно зависит от амплитуды периодического сигнала. Приведенная на рис.4 зависимость $R(D)$ получена при глубине модуляции накачки $h = 0.05$. При вдвое меньшей глубине модуляции СР также наблюдался, однако максимальное значение отношения сигнал/шум было существенно меньшим ($R_{\max} = 3$).

Таким образом, экспериментально обнаружено стохастическое возбуждение субгармоники периодического сигнала, модулирующего амплитуду накачки в твердотельном лазере. В исследуемой области лазерных параметров существует бистабильность отклика лазера на периодический сигнал модуляции: наблюдаются два состояния (ветви I и II). Проведенные исследования показали, что в лазере возникает стохастический резонанс на субгармонике $f_p/2$ периодического сигнала модуляции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-02-00080 и 10-02-00453).

1. McNamara B., Wiesenfeld K. *Phys. Rev. A*, **39**, 4854 (1989).
2. Jung P., Hanggi P. *Phys. Rev. A*, **44**, 8032 (1991).
3. Vemuri G., Roy R. *Phys. Rev. A*, **39**, 4668 (1989).
4. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **39**, 853 (2009).
5. Stocks N.G., Stein N.D., McClintock P.V.E. *J. Phys. A*, **26**, 385 (1993).
6. Григоренко А.Н., Никитин П.И., Рощепкин Г.В. *Письма в ЖЭТФ*, **65**, 788 (1997).
7. Evstigneev M., Reimann P., Pankov V., Prince R.H. *Europhys. Lett.*, **65**, 7 (2004).
8. Gammaitoni L., Hanggi P., Jung P., Marchesoni F. *Rev. Mod. Phys.*, **70**, 223 (1998).
9. Evstigneev M., Pankov V., Prince R.H. *J. Phys. A: Math. Gen.*, **34**, 2595 (2001).
10. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **42**, 659 (2012).
11. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **41**, 13 (2011).
12. Kravtsov Yu.A., Surovyatkina E.D. *Phys. Lett. A*, **319**, 348 (2003).