



НАБЛЮДЕНИЕ БИФУРКАЦИЙ В ЛАЗЕРЕ С КРАТКОВРЕМЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПОТЕРЬ НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ

Б.В. Анিকেев, В.Н. Храмов, Е.В. Хайдуков

Экспериментально обнаружен один из видов режима бифуркации периода следования ультракоротких импульсов в лазере с кратковременной резонансной модуляцией потерь на неодимовом стекле. Этот режим проявляется в удвоении периода следования ультракоротких импульсов в области малых расстроек модуляционной частоты и межмодового интервала. Обнаружено, что основным фактором, влияющим на этот эффект, является уровень накачки (усиление в активной среде).

Ключевые слова: Бифуркации, ультракороткие импульсы, период следования ультракоротких импульсов, кратковременная резонансная модуляция потерь.

Введение

Основные характеристики и преимущества лазеров с кратковременной резонансной модуляцией потерь (КРМП-лазеров) [1] ранее были подробно изучены. К ним относятся: высокая точность временной электронной привязки [2], склонность к формированию высокоэнергетических цугов ультракоротких импульсов (УКИ) в различных активных средах оптического диапазона [3]. Показана высокая эффективность КРМП-лазера при использовании его в качестве задающего лазера при последующем сверхрегенеративном режиме усиления [4,5], а также показано наличие собственного чирпа (без применения внешних устройств) в УКИ этого лазера [6]. В последнее время наше внимание было обращено на эффекты, являющиеся следствием нелинейного взаимодействия в элементах такого лазера – удвоение, а иногда и учетверение периода следования УКИ в области малых расстроек между частотой модуляции потерь и межмодовой частотой лазера (частотного расстояния между аксиальными модами резонатора).

Похожие эффекты, связанные с удвоением периода следования УКИ в различных лазерных системах, ранее наблюдались и другими исследователями. Удвоение периода было экспериментально обнаружено в лазерах на центрах окраски с аддитивной синхронизацией мод с учетом керровской нелинейности [7,8]; авторами эффект объяснялся взаимодействием волн в двух резонаторах и нелинейностью процесса модуляции. Низкочастотные квазипериодические осцилляции были обнаружены и в He-Ne лазере с активной синхронизацией мод [9].

Заметим, что экспериментально бифуркации периода при нашей работе с основными распространенными твердотельными лазерами (рубин, YAG:Nd^{3+} , YAP:Nd^{3+} , неодимовое стекло) наблюдались только в лазерах на неодимовом стекле. Возможно, это связано с особенностью процесса усиления УКИ в данном типе широкополосных активных сред. Благодаря широкому спектру спонтанного излучения происходит возбуждение различных импульсов, допускаемых системой «резонатор – активная среда лазера», при этом возможно и возникновение бифуркаций периода следования импульсов. Так, ранее [10] был зафиксирован довольно широкий спектр дополнительных резонансов мощности при расстройках $\xi = (T_M - T_P)/T_P \cdot 100\%$ периода модуляции T_M и аксиального периода T_P в обе стороны. Это было объяснено с позиций возбуждения тех частотных компонент, которые образуются не при двукратном, а при многократном обходе резонатора волной. Правда, этот эксперимент был выполнен в рубиновом кристаллическом лазере с более узким частотным спектром, чем в лазере на стекле с неодимом.

Далее изложены основные экспериментальные результаты с точки зрения приведенных выше физических соображений.

1. Экспериментальные результаты

Бифуркации удвоения периода следования УКИ нами неоднократно наблюдались в КРМП-лазере на неодимовом стекле в условиях, когда на начальном этапе развития генерации, предшествующем полному включению режима, осуществляется модуляция глубиной до 100%. Причем, как показывает практика, это принципиально важно, так как обычно для достижения режима КРМП используется более чем двукратное превышение накачки над порогом генерации, и в этом случае обеспечение высококонтрастной модуляции избавляет нас от других типов колебаний, мешающих режиму (поперечные моды, пички, характерные для режима свободной генерации). И только в этом случае удается получать высококонтрастную последовательность УКИ интенсивностью до 10^9 – 10^{10} Вт/см² [11].

На рис. 1 показана типичная схема экспериментальной установки с КРМП-лазером на неодимовом стекле. Суть эксперимента заключается в том, что после мгновенного включения добротности (как в режиме гигантского импульса) в резонаторе лазера осуществляется очень кратковременная (в течение нескольких десятков обходов волной резонатора), но глубокая (практически 100%-я) резонансная электрооптическая модуляция потерь. Затем устанавливается максимальная для данного лазера добротность резонатора, и режим возбуждения УКИ свободно развивается, снимая полностью инверсию населенностей, накопленную в активной среде. Отличительной особенностью такого метода является использование высококонтрастного модулятора потерь 2 с обостренной модуляционной характеристикой [12]. Совместно со специальным управляющим генератором 4 он обеспечивает 100%-ю глубину модуляции и сравнительно малое время нахождения в открытом состоянии.

Другой особенностью установки является полное отсутствие частотной селекции резонатора лазера. Для этого активные элементы 6, 7 имеют скосы на торцах около 2° . Выходное зеркало 10 напылено на клиновидную подложку с клином 5° .

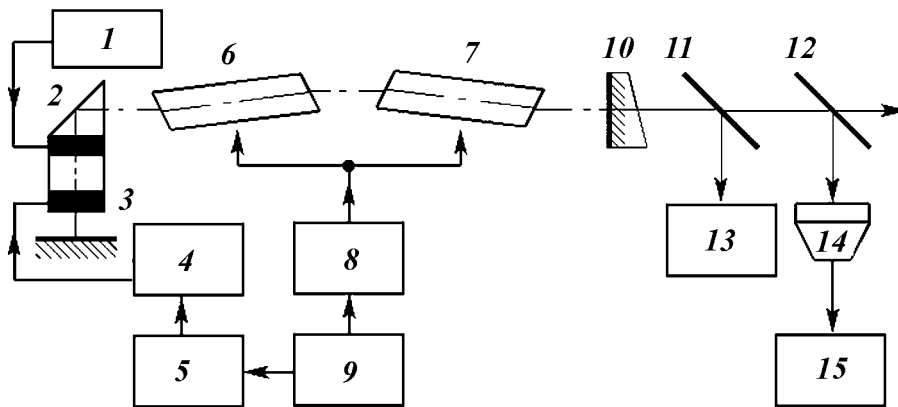


Рис. 1. Принципиальная блок-схема лазера, работающего в режиме КРМП: 1 – блок высокого напряжения; 2 – электрооптический затвор; 3 – зеркало с коэффициентом отражения 99%; 4 – высокочастотный генератор; 5 – блок высокого напряжения, формирующий прямоугольный высоковольтный импульс, МГИН-5; 6, 7 – активные элементы; 8 – блок управления и питания «Накачка 3000М» (блок накачки лазера); 9 – генератор импульсов Г5-54; 10 – зеркало-клин с коэффициентом отражения 55%; 11, 12 – светоделительные пластины; 13 – измеритель энергии ИМО-2Н; 14 – фотоэлементы коаксиальные ФК-32; 15 – шестиканальный скоростной осциллограф БЛОП-4М

В случае четвертьволнового варианта затвора 2 входная грань ориентирована под некоторым углом к оси резонатора, а при использовании двойного электрооптического затвора грани элементов затвора ориентированы под углом Брюстера к оси резонатора. Зеркало 3 выполняет роль «глухого» зеркала резонатора. Блоки 1, 4, 5 вырабатывают управляющий затвором электрический импульс.

В описанной установке при настройке резонанса частоты модуляции и частот межмодовых биений обнаружались некоторые особенности, выразившиеся в удвоении периода следования в цуге УКИ. На рис. 2, а показана типичная осциллограмма цуга генерации УКИ в КРМП-лазере при резонансе между периодом модуляции и аксиальным периодом; видно, что импульс следует со стабильным периодом T . Рис. 2, б отражает начальный этап возникновения бифуркаций (пропадание одного импульса в области малых расстройк модуляционного периода и аксиального периода). При дальнейшем увеличении расстройки ξ (более 0.06%) режим пульсации с удвоенным периодом исчезал. Рис. 2, а, б получены при использовании силикатного стекла ГЛС-1 в КРМП-лазере и четвертьволновой схемы модуляции. Такая же кинетика наблюдалась при использовании фосфатного стекла ГЛС-21 и двойного затвора, разработанного специально для КРМП-лазера [12]. Это наталкивает на мысль, что данное явление присуще именно неодимовым лазерам на стекле. Для схемы с двойным затвором результаты показаны на рис. 2, в, г, иллюстрирующих процесс возникновения бифуркации при обостренной функции модуляции, когда система становится более чувствительной к вносимым потерям. Осциллограмма на рис. 2, в получена при большей накачке, чем на рис. 2, г. По нашему мнению, сильная бифуркационная зависимость интенсивности УКИ от величины накачки, а также отсутствие положи-

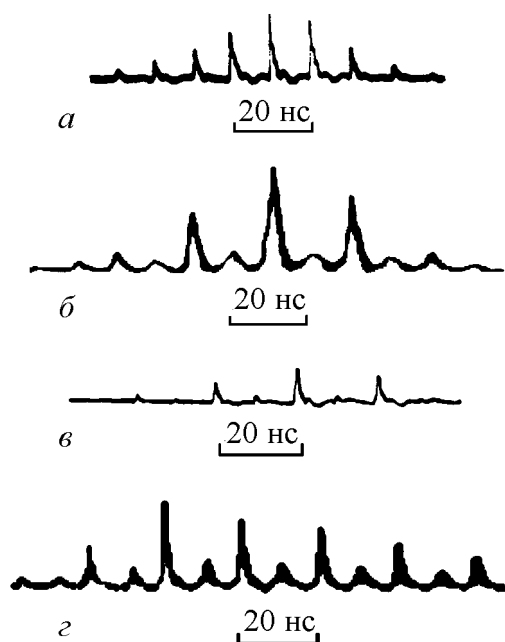


Рис. 2. Осциллограммы цуга УКИ КРМП-лазера: кинетика генерации при резонансе периода модуляции потерь и аксиального периода $T = 10$ нс (*a*), при малой расстройке ξ периода модуляции потерь и аксиального периода (*b*) в КРМП-лазере на силикатном стекле ГЛС-1; кинетика генерации при малой расстройке ξ в КРМП-лазере на фосфатном стекле ГЛС-21 при различном превышении накачки над порогом (*в*, *г*)

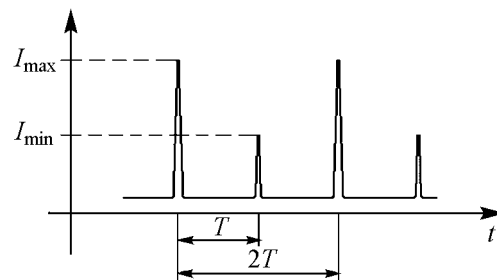


Рис. 3. Схема определения параметра I_{\min}/I_{\max} в бифуркационном режиме генерации

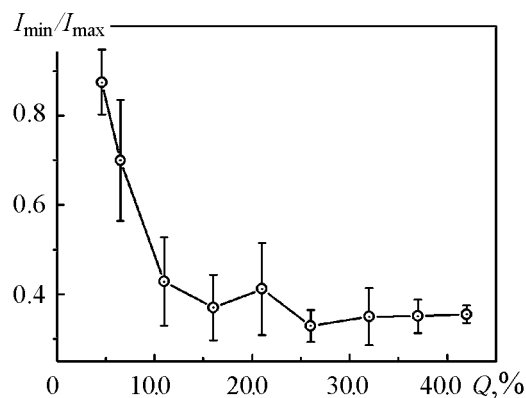


Рис. 4. Зависимость I_{\min}/I_{\max} от уровня относительной накачки Q , при котором наблюдается бифуркация

тельного результата в других экспериментах по бифуркации относительно кристаллических активных сред, говорит о том, что основным параметром, влияющим на эффективность возбуждения бифуркаций, является ширина спектра усиления активной среды. Это является общим свойством как для силикатных, так и для фосфатных стекол, имеющих более широкий спектр усиления по сравнению с кристаллическими активными средами.

В обеих схемах (как с четвертьволновым затвором, так и с двойным затвором) видна последовательность лазерных импульсов с удвоенным аксиальным периодом. Однако обе эти схемы объединяет одно не совсем понятное качество: бифуркации удвоения периода наблюдались при подходе с одной стороны – со стороны положительных расстройек. В варианте полуволновой схемы модуляции потерь было проведено исследование бифуркаций в зависимости от превышения порогового уровня накачки. Так, если изобразить схематически отдельный импульс, как показано на рис. 3, то мы можем обнаружить зависимость I_{\min}/I_{\max} от относительной накачки Q (превышения накачки над порогом режима свободной генерации) в виде графика на рис. 4. По мере увеличения накачки относительная интенсивность бифуркационного импульса падает по зависимости, близкой к экспоненциальной, то есть

бифуркации исчезают (практически остается только удвоенный период следования УКИ). Причем процесс исчезновения происходит начиная с уровня относительной накачки 25%.

Отметим также, что наблюдалось возбуждение (с весьма малой вероятностью) цугов с учетверенным периодом следования.

Заключение

Представленные результаты получены в двух принципиально различных схемах – с модуляцией потерь в двойном затворе Поккельса [12] и в ее варианте при модуляции по четвертьволновой схеме. Результаты экспериментов по обеим схемам оказались сходными, их можно отнести к одному наблюдаемому нами физическому явлению – бифуркации удвоения периода следования УКИ. В обеих схемах один и тот же эффект обнаруживался в области малых расстройек, что, вполне возможно, приводило к слабому резонансному возбуждению оптической длины резонатора. В любом случае, странным представляется, что наблюдаемое удвоение периода происходит в условиях глубокой, практически 100%-й модуляции потерь, когда механизм модуляции должен бы полностью подавлять бифуркационные импульсы. По-видимому, здесь большую роль играет, во-первых, высокая добротность резонатора, во-вторых, максимальное усиление активной среды в условиях большой ширины ее линии.

Полученные данные говорят о том, что помимо большой ширины спектра неодимового лазера, способствующей наблюдаемому результату, играет роль и много-частотный характер спектра резонатора лазера [10]. Можно сделать вывод, что высококонтрастная модуляция потерь является высокоэффективным методом отбора отдельных частотных компонент системы, в число которых попадают и бифуркационные частоты.

Авторы приносят искреннюю благодарность бывшему сотруднику Левину К.А., участвовавшему на начальном этапе изложенных экспериментов и проявившему исключительную добросовестность в подготовке экспериментальных результатов, благодаря чему данная статья вообще стала возможной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Волгоградского государственного университета (гранты № 35-2007-а, № 41-2008-а).

Библиографический список

1. Аникеев Б.В. О динамике активной фазировки мод в импульсном лазере с периодической модуляцией потерь // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19, № 1. С. 34.
2. Аникеев Б.В., Храмов В.Н., Затрудина Р.Ш. Исследование точности временной привязки субнаносекундных импульсов лазера с кратковременной периодической модуляцией потерь // Квантовая электроника. 1993. Т. 20, № 7. С. 721.
3. Аникеев Б.В., Храмов В.Н., Левин К.А. Неодимовые лазеры с кратковременной периодической модуляцией потерь // Квантовая электроника. 1996. Т. 23, № 1. С. 59.

4. *Anikeev B.V., Khaydukov E.V., Khramov V.N., Mitrakhovich I.N., Sedov M.N.* Realization of a condition of super-regenerative amplification of USP in a laser system with an electromechanical shutter // Proc. SPIE. 2007. 6594. P. 65940V.
5. *Ганеев Р.А., Ганиханов Ф.Ш., Камалов Ш.Р., Редкоречев В.И., Усманов Т.* Высокоэффективные предусилители пикосекундных импульсов на неодимовом стекле и иттрий-алюминиевом гранате // Квантовая электроника. 1996. Т. 23, № 12. С. 1065.
6. *Anikeev B.V., Dronov S.A., Kirsanov M.V., Khramov V.N., Zatrudina R.Sh.* Possibility of self-injection realization in STRML laser with chirped USP // Proc. SPIE. 2001. 4751. P. 561.
7. *Sucha G., Bolton S.R., Weiss S., Chemla D.S.* Period doubling and quasi-periodicity in additive-pulse mode-locked lasers // Opt/ Lett. 1995. Vol. 20, № 17. P. 1794.
8. *Sucha G., Bolton S.R., Weiss S., Chemla D.S.* Period-doubling and quasi-periodicity in ultrafast lasers // IEEE Lasers and Electro-Optics Society. 1995. Vol. 9, № 6.
9. *Melnikov L.A., Rabinovich E.M., and Tuchin V.V.* Quasi-periodic oscillations and chaos in a gas-discharge active mode-locked laser // J. Opt. Soc. Am. B. 1988. Vol. 5. Issue 5. P. 1134.
10. *Аникеев Б.В., Андреянов В.М., Фенчак В.А., Козубовский В.Р.* О характере пикового режима генерации при активной фазировке мод в рубиновом ОКГ // Украинский физический журнал. 1978. Т. 23. С. 1734.
11. *Anikeev B.V., Kas'yanov I.V., Khaydukov E.V., Khramov V.N.* Observation of effect of the USPs shortening at their self-action in high-temperature laser plasma // Proc. SPIE. 2007. 6726. P. 672619.
12. *Аникеев Б.В.* Исследование двойного затвора Поккельса в лазере с активной фазировкой спектра // В сб. «Квантовая электроника». Киев: Наукова думка. 1978, № 17. С. 77.

Поступила в редакцию 14.01.2009

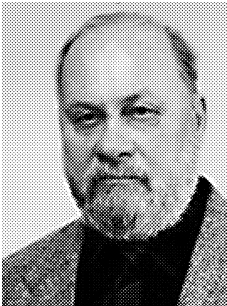
После доработки 3.05.2009

OBSERVATION OF BIFURCATIONS IN THE ND-GLASS LASER WITH SHORT-TIME RESONANT MODULATION OF LOSS

B.V. Anikeev, V.N. Khramov, E.V. Khaydukov

The condition of a bifurcation of a round-trip time of ultrashort pulses (USP) in the Nd-laser with short-time resonant modulation of loss is found out experimentally. This condition is exhibited in the period doubling in the area of a small detunings of the modulation frequency and an intermodal interval. It is revealed, that the pumping level (amplification in the active medium) is a major factor, influencing this effect.

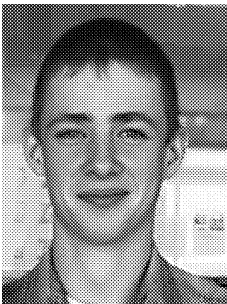
Keywords: Bifurcations, ultrashort pulses, round-trip time of ultrashort pulses, short-time resonant modulation of loss.



Аникеев Борис Васильевич – родился в Читинской области (1941), окончил Новосибирский государственный университет (1969), защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1983) и доктора физико-математических наук (1994, СГУ, специальность «Оптика»). Область научных интересов: лазерная физика, физика ультракоротких лазерных импульсов, фоторефрактивные процессы в кристаллах, физика лазерной плазмы. С 1984 года работает в Волгоградском государственном университете. С 1992 года – заведующий научно-исследовательской лабораторией квантовой электроники ВолГУ. С 1996 по 2006 годы возглавлял организованную им кафедру лазерной физики. В настоящее время – профессор кафедры лазерной физики. Автор более 140 научных публикаций. Профессор (1998). Член-корреспондент Академии инженерных наук РФ. Почетный работник высшего образования РФ. 400062 Волгоград, пр. Университетский,100
Волгоградский государственный университет
E-mail: boris.anikeev@volsu.ru



Храмов Владимир Николаевич – родился в Волгоградской области (1964), окончил Волгоградский государственный университет (1986), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1995 г., СГУ, специальность «Лазерная физика»). Работает в Волгоградском государственном университете с 1986 года. С 1996 года – доцент кафедры лазерной физики. С 2007 года – заведующий кафедрой лазерной физики. Доцент (1998). Область научных интересов: физика ультракоротких лазерных импульсов, взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом, применение лазеров в медицине и биологии, физика лазерной плазмы. Автор 70 научных публикаций. 400062 Волгоград, пр. Университетский,100
Волгоградский государственный университет
E-mail: vladimir.khramov@volsu.ru



Хайдуков Евгений Валерьевич – родился в 1984 году. Окончил Волгоградский государственный университет (2007) по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии». С 2007 года – аспирант. Область научных интересов: физика лазерной плазмы, высокоэнергетические лазерные системы, взаимодействие лазерного излучения с веществом. Автор 8 научных публикаций. 400062 Волгоград, пр. Университетский,100
Волгоградский государственный университет
E-mail: lf@volsu.ru