УДК 621.378.325

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ УПОРЯДОЧИВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ Nd:YLF ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

М. В. Горбунков[1], Ю. Я. Маслова[1], В. Г. Тункин[2],
Ю. В. Шабалин[1], Д. В. Яковлев[2]

Определены условия для генерации твердотельным лазером, охваченным внешней отрицательной обратной связью, излучения с упорядоченной временной структурой. Эксперименты выполнены на основе Nd:YLF лазера с продольной накачкой мощной диодной линейкой. Управление генерацией осуществлялось с помощью внутрирезонаторного электрооптического модулятора на основе кристалла танталата лития. За счет изменения задержки в цепи обратной связи осуществлены режимы сглаживания интенсивности и самосинхронизации мод с генерацией на аксиальном интервале нескольких коротких импульсов. В условиях усиления выше границы устойчивости обнаружено проявление вторичного электрооптического эффекта в кристалле танталата лития.

Ключевые слова: твердотельный пикосекундный лазер, электрооптический модулятор, диодная накачка, синхронизация мод, нелинейная динамика.

Отрицательная обратная связь (ООС) традиционно используется для устранения пичкового режима импульсных твердотельных лазеров [1–3]. Обратная связь также позволяет за счет выбора времени ее задержки и затухания управлять поведением интенсивности лазерного излучения на временах менее одного аксиального интервала – времени полного обхода светом резонатора T_r [4–6]. Для этого ООС должна иметь время

[1] ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gorbunk@sci.lebedev.ru.

[2] Физический факультет и Международный лазерный центр, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, корп. 62.

включения много меньше T_r, а время затухания порядка T_r. Помимо упорядочивания тонкой временной структуры, ООС позволяет получать режим регулярных пульсаций с дискретно и плавно варьируемым периодом следования [7, 8]. Для этого усиление должно обеспечивать работу лазера выше верхней границы области устойчивости.



Рис. 1: *Упрощенная схема лазера с оптоэлектронным управлением.*

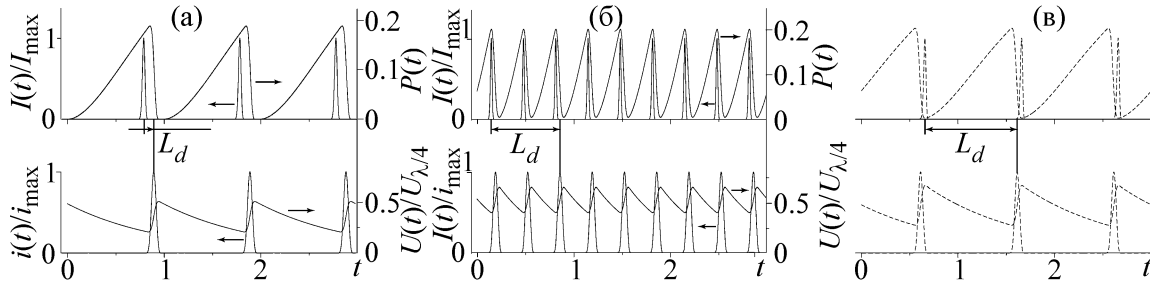


Рис. 2: *Временной ход нормированных на максимальные значения мощности выходного лазерного излучения $I(t)$, фототока $i(t)$; управляющего напряжения модулятора $U(t)$, отнесенного к четвертьволновому напряжению; пропускания модулятора $P(t)$: (а) режим синхронизации мод, на аксиальном интервале генерируется одиночный лазерный импульс; (б) режим синхронизации мод, на аксиальном интервале генерируются $n = 3$ лазерных импульса; (в) режим сглаживания лазерного излучения. Величина L_d определяет запаздывание действия обратной связи (фототока) по отношению к его генерирующему лазерному импульсу.*

Рассмотрим подробно условия, необходимые для упорядочивания временной структуры излучения. Реализовать эти режимы экспериментально позволяет быстрое оптоэлектронное управление [5]. Лазер с управлением, осуществляемым с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ), схематически представлен на рис. 1. ЭОМ управляется фототоком, возникающим в оптоэлектронной системе с некоторой задержкой под действием света, отраженного в цепь ООС. Время включения ООС определяется откликом фототока оптоэлектронной системы, а время затухания – разрядом емкости

C ЭОМ через сопротивление R (рис. 2). Отметим, что при увеличении L_d – задержки в цепи ООС – режимы с упорядоченной временной структурой воспроизводятся циклически через T_r. Существует минимальное значение задержки ООС, связанное с необходимостью отвода излучения на фоточувствительные элементы. Ее величина, как правило, намного меньше T_r. Рассмотрим роль задержки L_d при формировании тонкой временной структуры. При увеличении задержки от минимального значения тонкая временная структура есть результат самосинхронизации мод и представляет собой одиночный на аксиальном интервале короткий импульс. При этом он проходит через ЭОМ не во время максимального пропускания, а позже, на пологом фронте функции пропускания (рис. 2(а)) [4, 7]. В режиме самосинхронизации мод генерация одиночного импульса осуществляется в достаточно широком диапазоне задержек. Следующая область с упорядоченной временной структурой возникает вблизи задержки, равной $T_r/2$. В этом случае на аксиальном интервале генерируются 2 коротких импульса. Дальнейшее увеличение задержки ООС приводит к самосинхронизации мод с генерацией трех, четырех..., n импульсов на аксиальном интервале. Существует возможность выбора задержки таким образом, чтобы каждый последующий импульс проходил через ЭОМ в момент максимального разряда емкости, которая была заряжена под действием предыдущего импульса, идущего с опережением на $\simeq(1/n)T_r$. При этом необходимая задержка должна составлять $\simeq(1-1/n)T_r$ (рис. 2(б)). Преимущество режима генерации двух и большего числа импульсов, по сравнению с генерацией одиночного импульса в условиях минимальной задержки, заключается в сокращении длительности импульсов. Оно возникает из-за возможности совмещения момента прохождения импульса через ЭОМ с достижением строгого максимума его пропускания. Максимальное число генерируемых на аксиальном интервале импульсов определяется временем отклика фототока. И наконец, при дальнейшем увеличении L_d, реализуется режим сглаживания временной структуры, когда задержка ООС составляет T_r за вычетом времени, определяемого временем отклика фототока (рис. 2(в)). При еще большем увеличении задержки происходили генерации одиночного импульса, который, в отличие от случая минимальной задержки, может проходить через модулятор в максимуме его пропускания.

Экспериментально возможность управления тонкой временной структурой за счет действия оптоэлектронной ООС исследовалась на основе Nd:YLF лазера с продольной диодной накачкой. Для твердотельных Nd лазеров с накачкой одиночными диодами мощностью до 20 Вт и линейками лазерных диодов мощностью до 100 Вт характерно относительно невысокое усиление среды, которое на один проход обычно не превыша-

ет 2. С другой стороны, для реализации большинства режимов регулярной и хаотической нелинейной динамики необходим повышенный уровень ненасыщенного усиления лазера. Увеличение однопроходового усиления возможно при использовании неоднородной продольной накачки, когда диаметр накачки заметно меньше диаметра нулевой моды пустого резонатора. Однако, в случае вырожденных конфигураций резонатора возможно формирование моды с негауссовым пространственным распределением интенсивности [6]. Проблема нарушения гауссовой пространственной структуры пучка возрастает по мере увеличения приосевого усиления в активном элементе. В качестве разумной альтернативы применен комплекс мер: размер области накачки был выбран 600 мкм, что составляет 3/8 диаметра моды пустого резонатора; кроме того, реализована четырехпроходная схема. Это позволило увеличить уровень полного ненасыщенного усиления (за полный обход резонатора) до уровня ∼7 и дало возможность исследовать режимы генерации в области проявления нелинейной динамики.

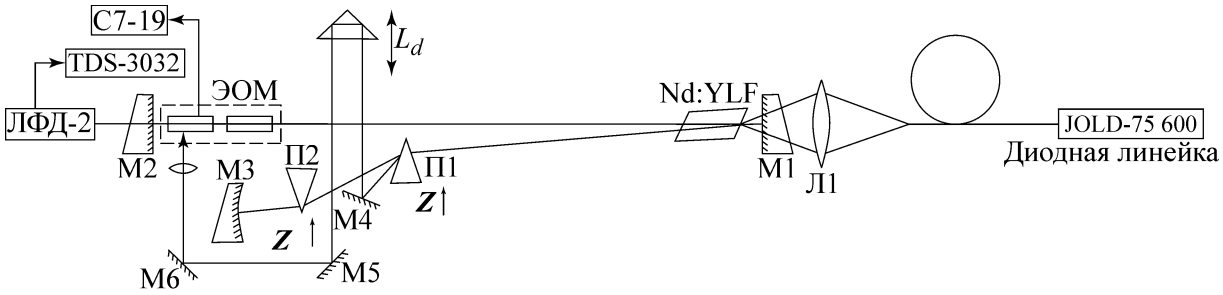


Рис. 3: *Схема установки с управлением на основе излучения, выводимого с помощью внутрирезонаторного поляризатора: Л1 – линза для фокусировки излучения накачки; М1, М2, М3 – зеркала резонатора; П1, П2 – призменные поляризаторы; М4, М5, М6 – зеркала (R = 100% – 1.06 мкм); ЭОМ – электрооптический модулятор на основе $LiTaO_3$; ЛФД-2 – лавинный фотодиод; TDS-3032, С7-19 – осциллографы.*

Схема установки представлена на рис. 3. V-образный резонатор был образован плоским зеркалом М2 с коэффициентом отражения $R = 100\%$, сферическим зеркалом М3 с радиусом кривизны 2.5 м на клиновидной подложке с коэффициентом отражения $R = 100\%$, а также дихроичным зеркалом М1, $R_{1.06\ \text{мкм}} = 100\%$ и $R_{0.8\ \text{мкм}} = 2\%$. Длина резонатора составляла 130 см (время обхода 9 нс). Накачка осуществлялась мощной импульсной диодной линейкой с волоконным выходом JOLD-75 600. Для питания линейки использовался блок ILP-120 с микроконтроллерным управлением величины тока. При длительности импульса накачки 300 мкс максимальный ток составлял 90 А, при этом

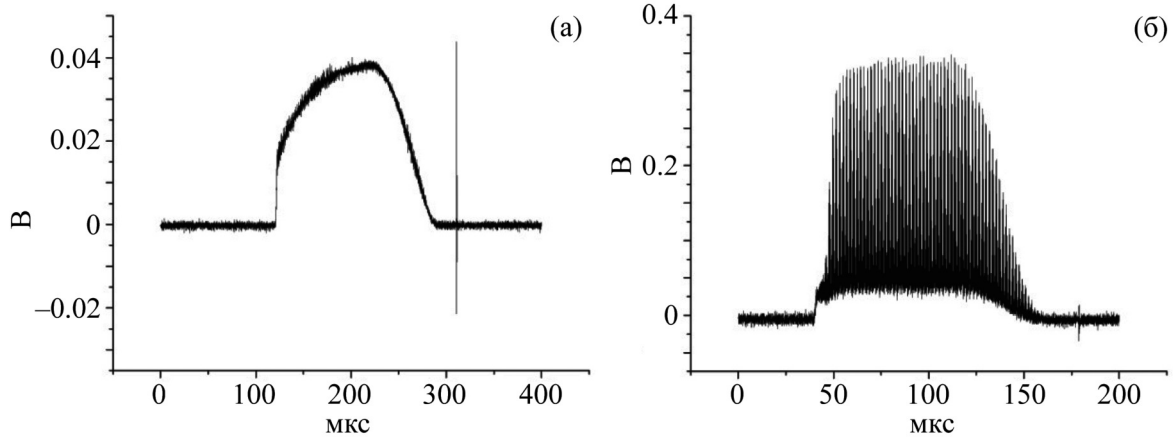


Рис. 4: *Обзорная картина генерации: (а) в режиме сглаживания временной структуры излучения, (б) в режиме самосинхронизации мод с одиночным импульсом на аксиальном интервале.*

выходная мощность равна 75 Вт. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 10 Гц. Числовая апертура многомодового волокна составляла 0.22. Излучение накачки с торца волокна переносилось с увеличением 1:1 на торец активного элемента линзой с исправленной сферической аберрацией. Кристалл Nd:YLF клиновидной формы (⌀5 мм, 10 мм, клин 3°) был вырезан так, чтобы оптическая ось кристалла была перпендикулярна оси резонатора. В зависимости от выбранной поляризации оптический элемент обеспечивает генерацию на длинах волн 1.047 или 1.053 мкм. Управление генерацией осуществлялось с помощью оптоэлектронной ООС, включающей в себя ЭОМ на основе кристалла $LiTaO_3$, призменный поляризатор и чувствительные высоковольтные p–i–n диоды. Пробойное напряжение p–i–n слоя толщиной 35 мкм составляет 400 В, величина светочувствительной области 0.8×0.8 мм^2 [5]. Для повышения надежности работы фотодиодов применено их импульсное питание. На фотодиод направлялось излучение, выводимое с помощью внутрирезонаторного поляризатора. В качестве поляризатора использовались две призмы (П1, П2) из исландского шпата (для 1.06 мкм $n_e = 1.479$, $n_o = 1.642$) с углом при вершине 30°. Оптическая ось призм делит этот угол пополам. Рабочие поверхности призм просветлены на длину волны генерации для o и e поляризаций излучения. Призмы установлены так, чтобы луч с e-поляризацией проходил через обе призмы, а луч с o-поляризацией только через одну и выводился из резонатора. Оптические оси призм и рабочая поляризация лазера (e-поляризация) горизонтальны. Двухсекционный ЭОМ был образован двумя

кристаллами $LiTaO_3$ 3×3×15 мм^3 (поперечный электрооптический эффект, полуволновое напряжение на длине волны 1.047 мкм 600 В). Модулятор был изготовлен с малым зазором между секциями (0.5 мм) с целью устранения частотной селекции. В то же время зазор между электродами длиной 12 мм составлял 6.5 мм, тем самым устранялась возможность пробоя между электродами секций. В отличие от модулятора на основе $LiTaO_3$, использованного ранее в [7], подводящие электроды были выполнены из полосок отожженной меди толщиной 0.1 мм и приклеены токопроводящим клеем к электродам модулятора. Это позволило исключить механическое напряжение кристалла при монтаже и не препятствовало возбуждению акустических колебаний. Постоянное напряжение смещения модулятора подавалось через общий электрод секций модулятора. Разрядное сопротивление оптоэлектронной ООС составляло 940 Ом и представляло собой делитель напряжения с коэффициентом деления 24. Сигнал с делителя позволял регистрировать временной ход управляющего напряжения с помощью осциллографа С7-19 (полоса 5 ГГц). Для детектирования выходного излучения лазера применялись лавинный фотодиод ЛФД-2 (временное разрешение не хуже 1 нс), осциллограф С7-19, а также цифровой осциллограф Tektronix TDS3032 (300 МГц).

Эксперименты проводились при изменении задержки в цепи ООС. Чувствительность системы ООС оказалась достаточной для формирования рассмотренных выше режимов генерации с упорядоченной временной структурой: сглаживания и генерации нескольких (до 4-х) импульсов на аксиальном интервале. Было найдено положение, которое соответствует задержке $L_d = T_r$. В соответствии с предложенной моделью режим сглаживания (рис. 4) наблюдался при установке задержки в цепи ООС несколько меньше этого значения. Как и указывалось выше, следующий режим, который соответствует генерации одиночного импульса, наблюдался при увеличении задержки в цепи ООС от значения в один обход светом резонатора (рис. 5(а)). Величина отстройки от режима сглаживания составила 15 см (задержка 1 нс); от режима, соответствующего задержке $L_d = T_r$, – 5 см. Поведение режима синхронизации мод несимметрично при изменении задержки в цепи ООС. При уменьшении задержки на несколько сантиметров от оптимального значения происходит срыв режима самосинхронизации мод, в то время как при увеличении задержки область самосинхронизации достигает десятков сантиметров.

Режимы генерации нескольких импульсов на периоде наблюдались при значительном уменьшении задержки в цепи ООС от значения T_r. Величина отстройки от режима, соответствующего задержке на один проход, составила 102 см для двух импульсов

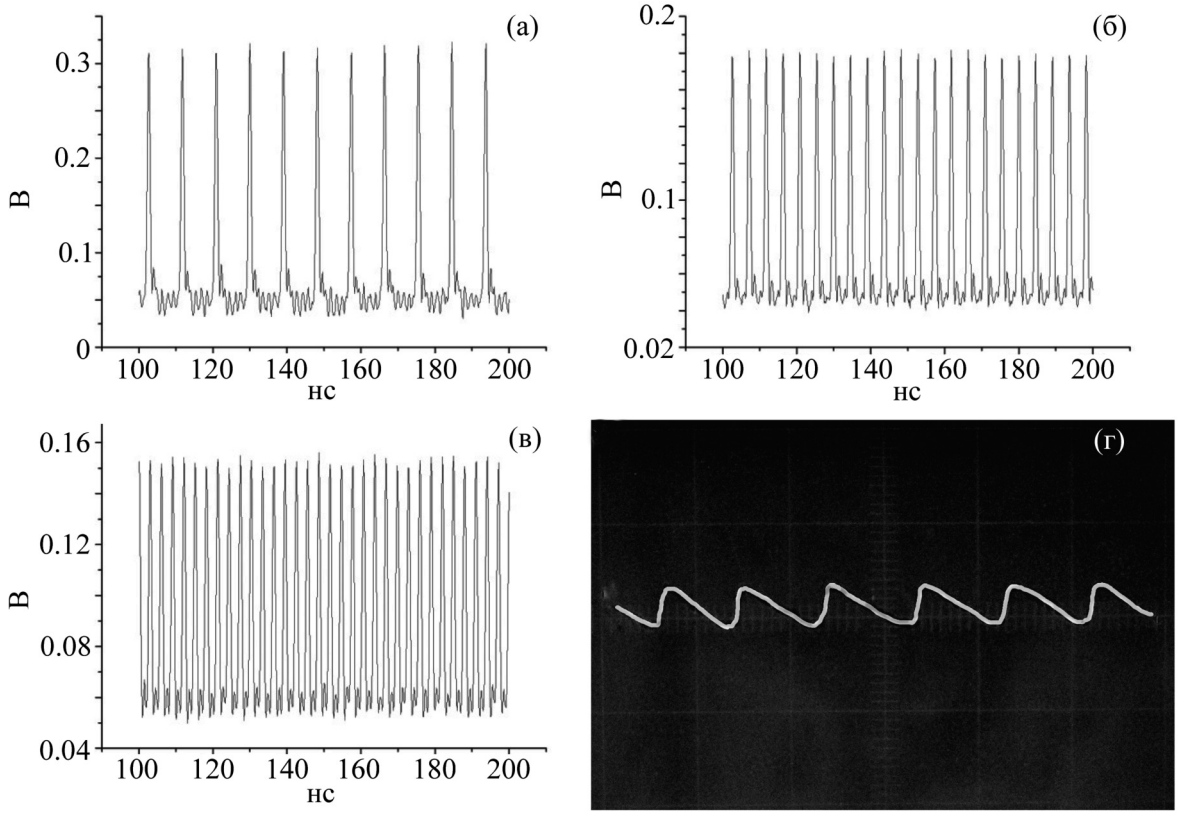
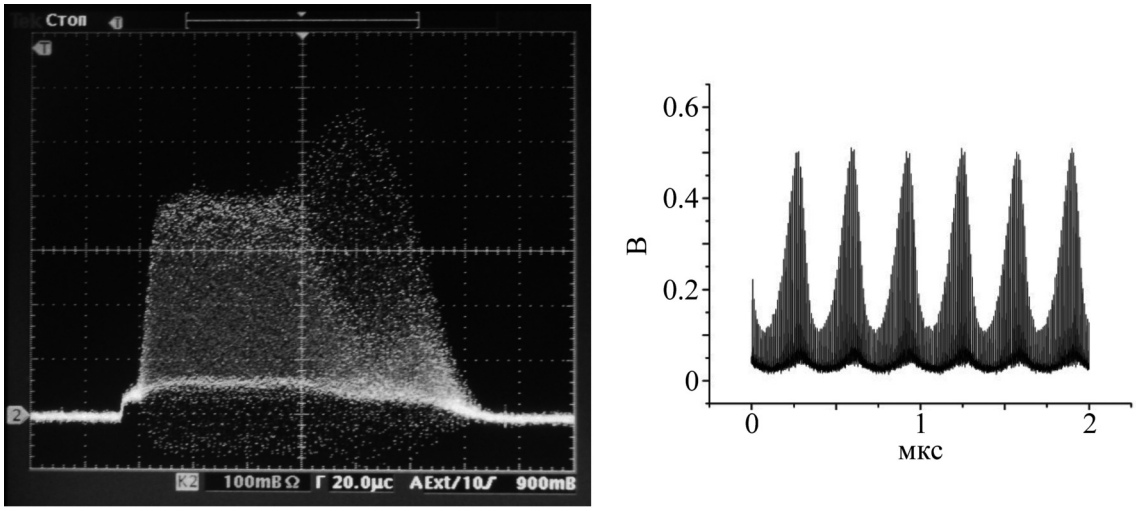


Рис. 5: *Режимы самосинхронизации мод: (а) с одиночным импульсом на аксиальном интервале; (б) с генерацией двух импульсов на аксиальном интервале; (в) с генерацией трех импульсов на аксиальном интервале; (г) осциллограмма напряжения, снимаемого с делителя в режиме генерации четырех импульсов на аксиальном интервале, масштаб* 2.5 *нс в клетке.*

(рис. 5(б)), 58 см для трех (рис. 5(в)). При увеличении числа импульсов глубина модуляции управляющего напряжения ООС уменьшается. Максимальное число импульсов на аксиальном интервале в наших экспериментах – 4 (см. рис. 5(г)).

При мощности накачки, обеспечивающей превышение верхней границы устойчивости лазера [7], были получены режимы генерации регулярных пульсаций огибающей (микроцугов) коротких импульсов, исследовано поведение периода их следования и сценарий хаотизации в зависимости от напряжения смещения на ЭОМ. Регулировка напряжения смещения позволила с высокой точностью варьировать полное (с учетом потерь) усиление лазера. Другой способ изменения усиления – варьирование мощности накачки. Пример регулярной последовательности пульсаций приведен на рис. 6. При постоянном смещении на ЭОМ 105 В период развитых пульсаций составил ∼330 нс (∼36



(а) (б)

Рис. 6: *Обзорная картина генерации и пульсаций для случая, когда величина напряжения смещения составляет* 105 *В: (а) обзорная картина генерации, (б) тот же режим с повышенным временным разрешением. Период пульсаций составляет* ∼330 *нс.*

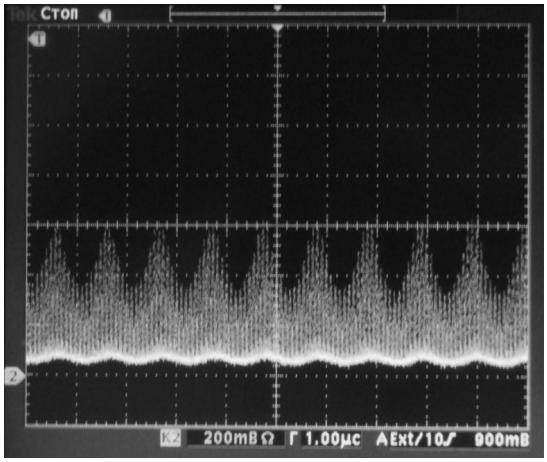


Рис. 7: *Режим регулярных пульсаций для случая, когда величина напряжения смещения составляет* 90 *В. Период пульсаций составляет* 1.04 *мкс.*

обходов резонатора). При повышенном смещении минимальный период пульсаций составил 230 нс. При увеличении мощности накачки происходила хаотизация временной структуры излучения, аналогично наблюдаемой в Nd:YAG лазере с миллисекундной ламповой накачкой [7].

При уменьшении напряжения смещения ниже 90 В происходит резкое увеличение периода пульсаций с 330 нс до 1.1 мкс. Поведение цуга импульсов для такого режима

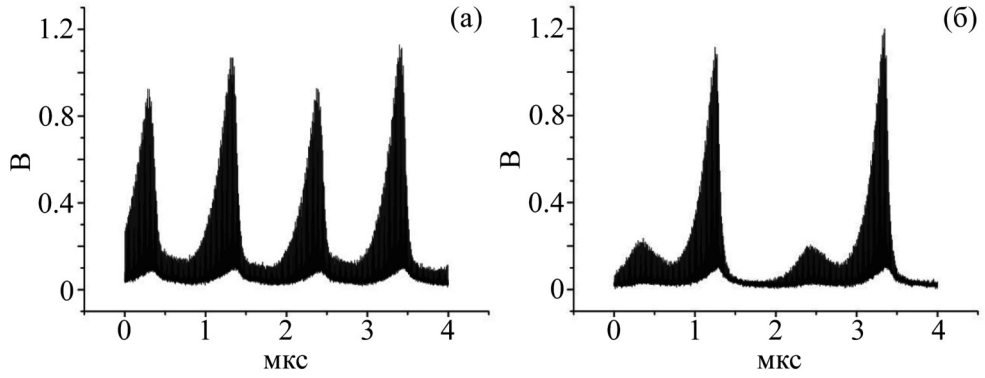


Рис. 8: *Режим бифуркации удвоения периода: (а) режим удвоения периода, (б) режим с подавлением импульсов с меньшей амплитудой.*

показано на рис. 7. Для режимов, полученных в условиях уменьшения напряжения смещения, характерно отсутствие зависимости периода пульсаций от уровня накачки. Увеличение мощности накачки позволяет наблюдать бифуркацию удвоения периода: амплитуда пульсаций поочередно принимает одно из двух различных значений (рис. 8(а)). Дальнейшее увеличение накачки приводит к почти полному подавлению пульсаций с меньшей амплитудой (рис. 8(б)). Наблюдаемые периоды в начале формирования пульсаций и в условиях бифуркации удвоения периода с почти полным подавлением меньших пульсаций совпадают (с точностью до погрешности измерений). Сходное поведение пульсаций наблюдалось в Nd:YAG лазере с миллисекундной ламповой накачкой и отрицательной обратной связью на основе кристалла DKDP [8]. Было показано, что периоды следования пульсаций (микроцугов коротких импульсов) определяются частотами резонансов сдвиговых акустических колебаний кристалла DKDP [8], а эффект автостабилизации частоты (отсутствие зависимости периода пульсаций от уровня накачки) возникает за счет проявления вторичного электрооптического эффекта. Хаотизация динамики временной структуры излучения проходила по сценарию удвоения периода [9, 10]. В наших экспериментах периоды в начале формирования пульсаций (рис. 7) и в условиях бифуркации удвоения периода с почти полным подавлением меньших пульсаций (рис. 8) совпадают с точностью до погрешности измерений. Скорость звуковых волн при возбуждении акустических продольных колебаний в кристалле танталата лития составляет $6.16{\cdot}10^3$ м/с [11]. Расчетный период колебаний соответствующих основной моде в кристалле с сечением $3{\times}3$ мм^2, таким образом, равен 970 нс. Величина периода пульсаций и обнаруженный эффект автостабилизации частоты их следования, а также характерный сценарий хаотизации через бифуркацию удвоения периода позволяют

сделать вывод о том, что в эксперименте впервые обнаружено проявление вторичного электрооптического эффекта для кристалла танталата лития.

Таким образом, для лазера на основе кристалла Nd:YLF с продольной накачкой мощной диодной линейкой и оптоэлектронной отрицательной обратной связью осуществлены режимы сглаживания интенсивности и самосинхронизации мод с генерацией на аксиальном интервале нескольких коротких импульсов. В условиях усиления выше границы устойчивости обнаружено проявление вторичного электрооптического эффекта в кристалле танталата лития.

Выражаем благодарность В. А. Русову за полезные обсуждения. Работа проведена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов" и УНК ФИАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] F. R. Marshall and D. L. Roberts, IRE Proc. **10**, 2106 (1962).
[2] А. С. Агабекян, А. З. Грасюк, И. Г. Зубарев и др., Радиотехника и электроника **12**, 79 (1964).
[3] H. Statz, G.A. de Mars, Journal of Applied Physics **36**, 1510 (1965).
[4] В. К. Макуха, В. С. Смирнов, В. М. Семибаламут, Квантовая электроника **4**, 1023 (1977).
[5] D. B. Vorchik and M. V. Gorbunkov, in *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Europe'96, Hamburg, Germany, 1996*, p. 282.
[6] М. В. Горбунков, А. В. Коняшкин, П. В. Кострюков и др., Квантовая электроника **35**, 2 (2005).
[7] M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, V. A. Petukhov, et al., Applied Optics **48**(12), 2267 (2009).
[8] М. В. Горбунков, Ю. Я. Маслова, В. А. Петухов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **36**(9), 29 (2009).
[9] Г. Шустер, *Детерминированный хаос* (М., Мир, 1988).
[10] F. T. Arecchi, W. Gadomski, R. Meucchi, Phys. Rev. A, **34**, 1617 (1986).
[11] E. G. Spencer, P. V. Lenzo, A. A. Ballman, Proc. IEEE **55**, 2074 (1967).

Поступила в редакцию 23 июля 2015 г.