

УДК 621.378.325

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

М. В. Горбунков<sup>1</sup>, Ю. Я. Маслова<sup>1</sup>, В. Г. Тункин<sup>2</sup>,  
Ю. В. Шабалин<sup>1</sup>, Д. В. Яковлев<sup>2</sup>

*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 внутррезонаторного 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 пикового 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

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gorbunk@sci.lebedev.ru.

<sup>2</sup> 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.

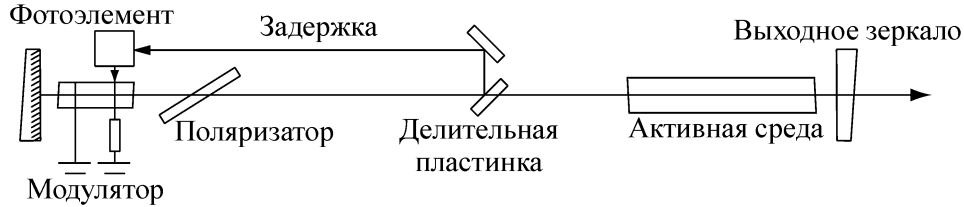


Рис. 1: Упрощенная схема лазера с оптоэлектронным управлением.

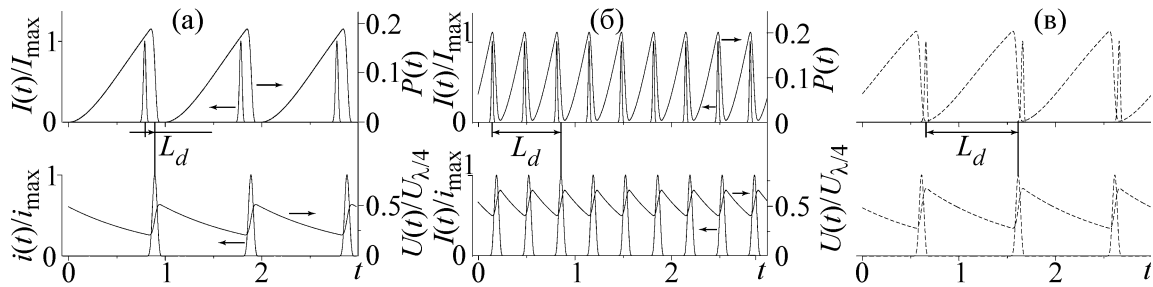


Рис. 2: Временной ход нормированных на максимальные значения мощности выходного лазерного излучения  $I(t)$ , фототока  $i(t)$ ; управляющего напряжения модулятора  $U(t)$ , отнесенного к четвертьволновому напряжению; пропускания модулятора  $P(t)$ : (а) режим синхронизации мод, на аксиальном интервале 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

С 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  $\sim 7$  и дало возможность исследовать режимы генерации в области проявления нелинейной динамики.

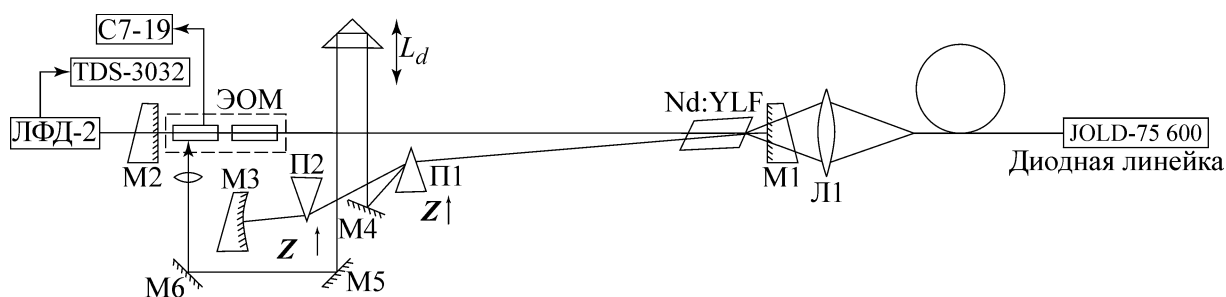


Рис. 3: Схема установки с управлением на основе излучения, выводимого с помощью внутриврезонаторного поляризатора: Л1 – линза для фокусировки излучения накачки; М1, М2, М3 – зеркала резонатора; П1, П2 – призменные поляризаторы; М4, М5, М6 – зеркала ( $R = 100\% - 1.06 \text{ мкм}$ ); ЭОМ – электрооптический 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 ИР-120 с микроконтроллерным управлением величины тока. При длительности импульса накачки 300 мкс максимальный ток составлял 90 А, при этом

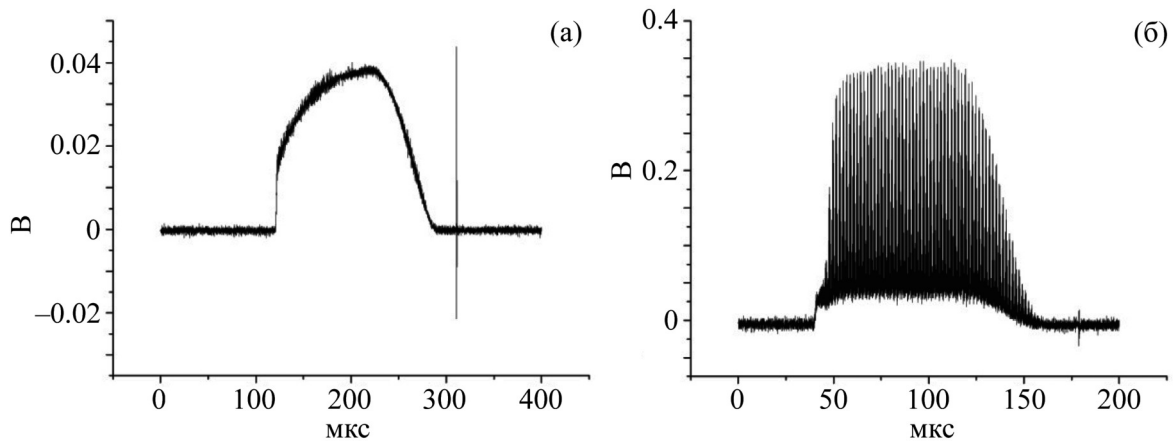


Рис. 4: Обзорная картина генерации: (а) в режиме сглаживания временной структуры излучения, (б) в режиме самосинхронизации мод с одиночным импульсом на аксиальном интервале.

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 ( $\varnothing 5$  мм, 10 мм, клин  $3^\circ$ ) 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<sub>3</sub>, призмный поляризатор и чувствительные высоковольтные *p-i-n* диоды. Пробойное напряжение *p-i-n* слоя толщиной 35 мкм составляет 400 В, величина светочувствительной области  $0.8 \times 0.8$  мм<sup>2</sup> [5]. Для повышения надежности работы фотодиодов применено их импульсное питание. На фотодиод направлялось излучение, выводимое с помощью внутррезонаторного 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  $30^\circ$ . 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  $\text{LiTaO}_3$   $3 \times 3 \times 15$  мм<sup>3</sup> (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  $\text{LiTaO}_3$ , 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

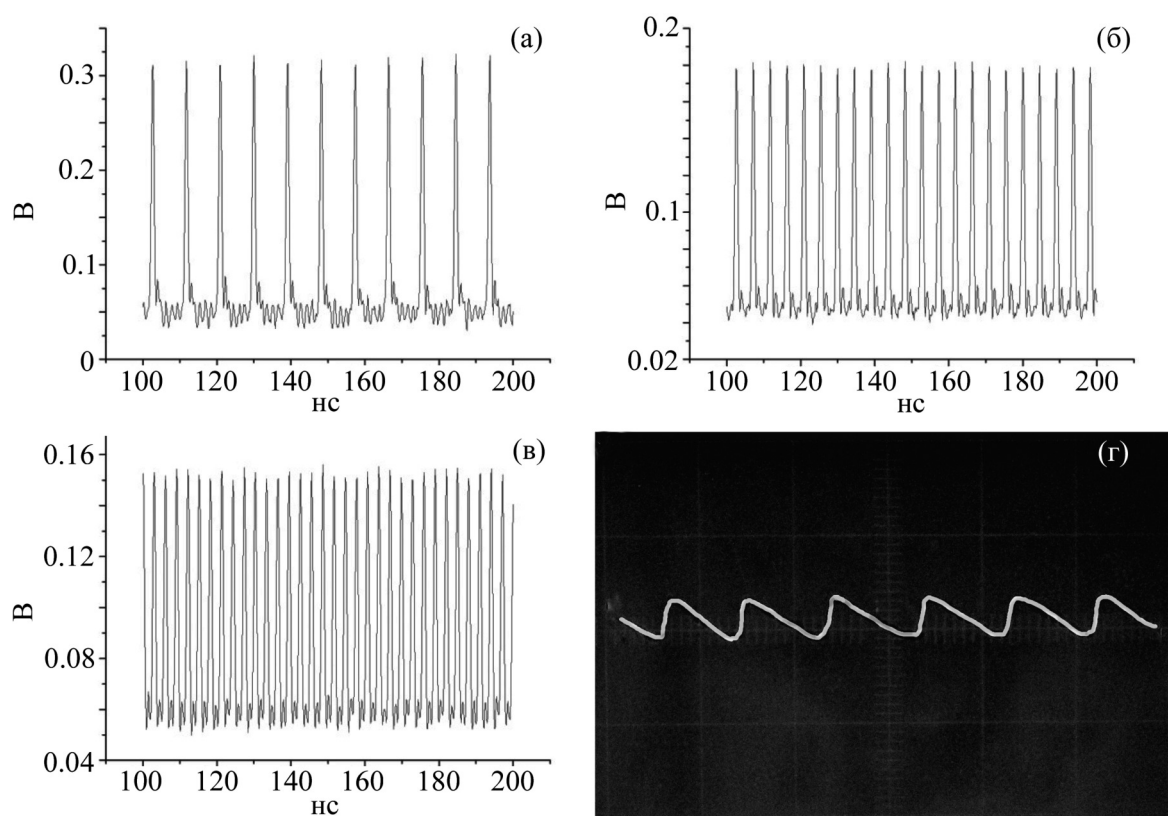


Рис. 5: Режимы самосинхронизации мод: (а) с одиночным импульсом на аксиальном интервале; (б) с генерацией двух импульсов на аксиальном интервале; (в) с генерацией трех импульсов на аксиальном интервале; (г) осциллограмма напряжения, снимаемого с делителя в режиме генерации четырех импульсов на аксиальном 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  $\sim 330$  нс ( $\sim 36$

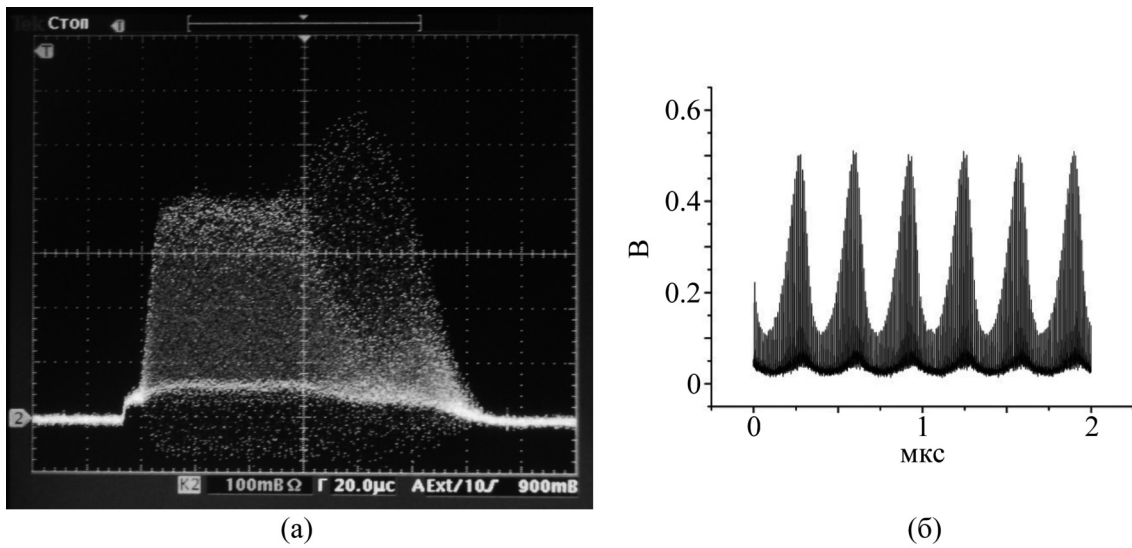


Рис. 6: Обзорная картина генерации и пульсаций для случая, когда величина напряжения смещения составляет 105 В: (а) обзорная картина генерации, (б) тот же режим с повышенным временным разрешением. Период пульсаций составляет  $\sim 330$  нс.

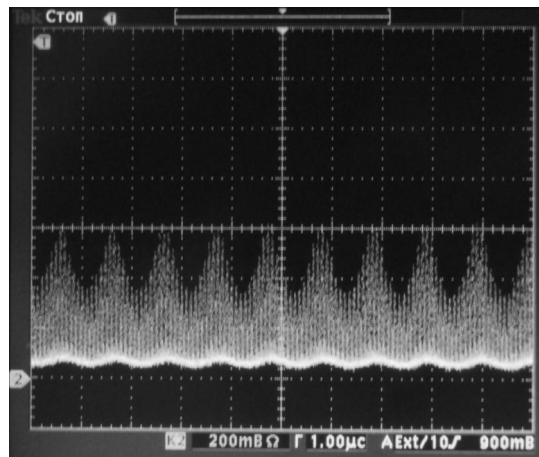


Рис. 7: Режим регулярных пульсаций для случая, когда величина напряжения смещения составляет 90 В. Период пульсаций составляет 1.04 мкс.

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



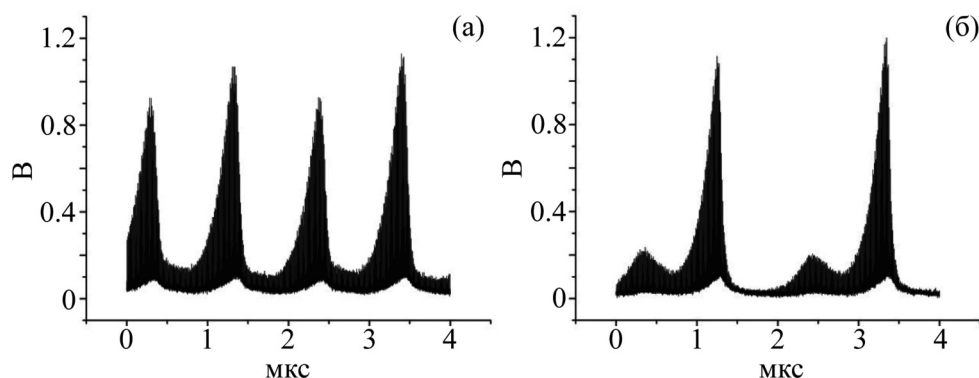


Рис. 8: Режим бифуркации удвоения периода: (а) режим удвоения периода, (б) режим с подавлением импульсов с меньшей амплитудой.

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<sup>2</sup>, 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.