

УДК 621.378.325

## ГЕНЕРАЦИЯ РЕГУЛЯРНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МИКРОЦУГОВ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ДИСКРЕТНО ВАРЬИРУЕМЫМ ПЕРИОДОМ СЛЕДОВАНИЯ

М. В. Горбунков<sup>1</sup>, Ю. Я. Маслова, В. А. Петухов, М. А. Семенов, Ю. В. Шабалин

*В Nd:YAF лазере с ламповой накачкой, управляемом оптоэлектронной отрицательной обратной связью на основе электрооптического кристалла ДКДП, реализован режим генерации миллисекундной последовательности микроцугов коротких импульсов с дискретно варьируемым периодом следования. Периоды следования микроцугов фиксированы и определяются резонансами сдвиговых акустических колебаний кристалла. Конструкция резонатора позволила реализовать селективное возбуждение первых десяти акустических мод в диапазоне периодов 8 – 0.5 мкс.*

**Ключевые слова:** твердотельный пикосекундный лазер, автоколебания, сдвиговые акустические волны, электрооптический модулятор.

Системы отрицательной обратной связи (ООС) используются как для стабилизации мощности выходного лазерного излучения, так и для синхронизации мод [1, 2]. Область устойчивости лазерных систем, управляемых ООС, ограничена: при увеличении усиления они демонстрируют нелинейную динамику в виде регулярных или хаотических пульсаций. Отдельный интерес представляет генерация большого числа микроцугов пикосекундных импульсов с заданным периодом следования. Возможность использования режима генерации миллисекундных последовательностей регулярных микроцугов пикосекундных импульсов обсуждалась нами в работе [3]. Рассматривалось их применение в спектроскопии больших органических молекул, охлажденных в сверхзвуковой

<sup>1</sup>gorbunk@sci.lebedev.ru.

струе, а также в целях повышения эффективности томсоновского лазерно-электронного генератора рентгеновского излучения для медицинских применений. Режим регулярной последовательности микроцугов пикосекундных импульсов с регулируемым периодом был изучен теоретически и экспериментально [3]. Он был реализован за счет опто-электронной системы ООС, использующей излучение, отраженное от поляризатора внутрирезонаторной ячейки Поккельса. Было показано, что для практического применения пригодны режимы с периодом  $T$ , равным 25–75 времен обхода резонатора  $T_r$ . Для резонатора стандартной длины  $T_r = 5 - 10$  нс  $T$  лежит в субмикросекундном диапазоне. В экспериментах [3] использовался модулятор из  $\text{TaLiO}_3$ , для которого характерно отсутствие вторичного электрооптического эффекта. При воздействии напряжения на кристалл, обладающий вторичным электрооптическим эффектом, деформация кристалла за счет обратного пьезоэффекта вызывает существенную дополнительную деполяризацию вследствие упругооптического эффекта. При использовании такого кристалла в составе ячейки Поккельса воздействие периодического напряжения с частотой, соответствующей собственным сдвиговым акустическим колебаниям кристалла, многократно уменьшает (по сравнению со статическим значением) величину напряжения, необходимого для 100% модуляции света [4, 5]. Существенно, что при этом амплитуда пьезооптических резонансов практически не зависит от частоты колебаний. Резонансные частоты колебаний [6] определяются по формуле [7]:

$$f_n = n \frac{v}{2d} \left( 1 + \frac{8}{\pi^2 n^2} - \frac{16}{\pi^4 n^4} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $n = 1, 3, 5, \dots, 2k - 1$ ,  $k$  – целое число,  $v$  – скорость сдвиговых волн в кристалле,  $d$  – сторона квадратного сечения кристалла. На рис. 1 показано пропускание ячейки Поккельса в поперечном сечении в условиях резонансного возбуждения четырех первых мод сдвиговых акустических колебаний в кристалле квадратного сечения. Существенное проявление вторичного электрооптического эффекта в кристаллах группы симметрии  $\bar{4}2m$  отмечалось еще в ранней работе [4].

При разработке импульсно-периодических лазеров с использованием модуляторов на основе кристаллов группы симметрии  $\bar{4}2m$  (КДП, АДП, ДКДП), проявление вторичного электрооптического эффекта является крайне нежелательным, его подавление осуществляется специальной конструкцией кристалла и его крепления [8]. С другой стороны, вторичный электрооптический эффект был использован для осуществления режима регулярных пульсаций в лазере с отрицательной электрооптической обратной связью. Использовалась внутрирезонаторная ячейка Поккельса на основе кристалла

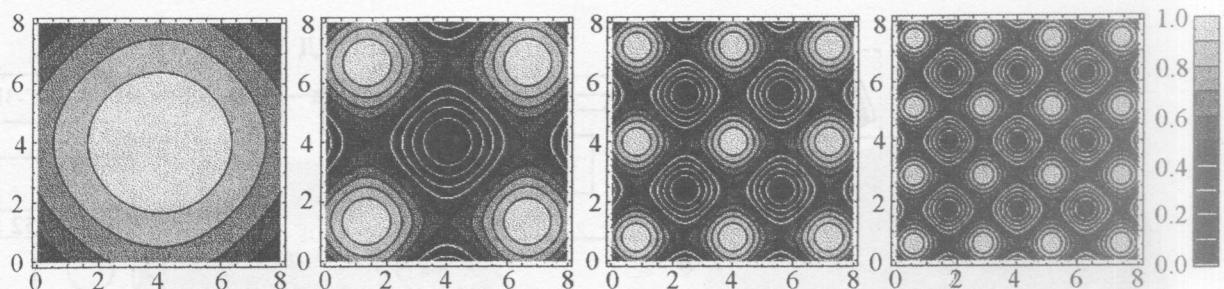


Рис. 1. Пропускание ячейки Поккельса в поперечном сечении кристалла в условиях резонансного возбуждения четырех первых мод сдвиговых акустических колебаний в кристалле квадратного сечения. Оптимальное положение лазерного пучка в сечении кристалла соответствует максимальному пропусканию ячейки Поккельса.

ДКДП с поперечным сечением  $6 \times 6 \text{ мм}^2$  [9]. Был получен устойчивый режим регулярных пульсаций длительностью  $\sim 0.2$  мкс с практически постоянным периодом следования, который соответствует первой резонансной частоте оптоэлектронного кристалла модулятора. При превышении энергии пороговой накачки в 2–5 раз период лежал в диапазоне 5.7–5.9 мкс.

Реализация более высокочастотных пульсаций с периодом  $\leq 1$  мкс за счет возбуждения основной моды сдвиговых акустических колебаний требует соответствующего уменьшения поперечника кристалла (см. формулу (1)) и сопряжено со сложностью обработки кристалла и настройки лазера. Настоящая работа посвящена генерации регулярной последовательности микропугов пикосекундных импульсов с дискретно варьируемым периодом следования за счет резонансного возбуждения не основной, а высших мод сдвиговых акустических колебаний. Переключение между режимами осуществлялось выбором положения лазерного пучка в сечении кристалла ДКДП, соответствующего пучности стоячей акустической волны (см. рис. 1). Для резонансного возбуждения высших мод диаметр лазерного луча в кристалле не должен превышать  $v/(2f_n)$ , а для ДКДП  $v = 1.64 \times 10^5 \text{ см/с}$  [7].

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 2. Режим самосинхронизации мод осуществлялся за счет выбора задержки в цепи оптоэлектронной ООС, при которой потери ячейки Поккельса во время прохода лазерного импульса минимальны. Особенности синхронизации мод, когда модулятор управляет напрямую фототоком оптоэлектронных структур, подробно описаны в [12]. При использовании модулятора на основе кристалла ДКДП такой режим управления позволяет

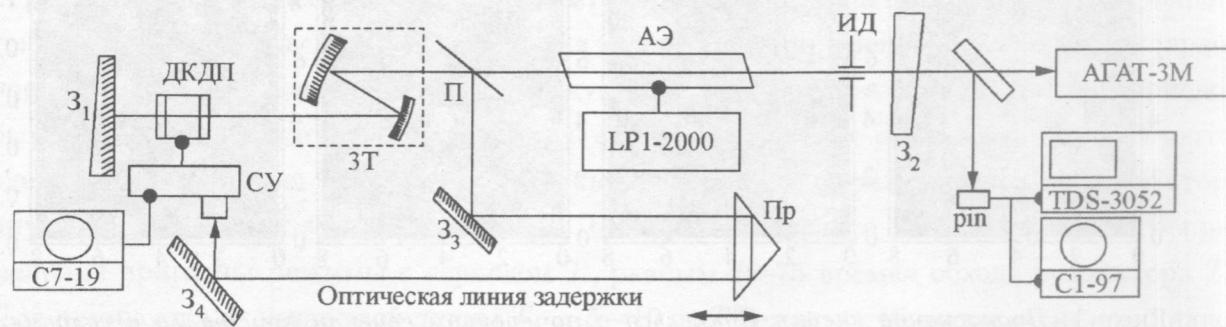


Рис. 2. Миллисекундный Nd:YAG лазер с ламповой накачкой. АЭ – Nd:YAG активный элемент, П – поляризатор; З<sub>1</sub>, З<sub>2</sub> – зеркала резонатора; З<sub>3</sub>, З<sub>4</sub> – зеркала оптической задержки; Пр – призма; ИД – ирисова диафрагма; ЗТ – зеркальный телескоп; ДКДП – электрооптический кристалл ячейки Поккельса; СУ – оптоэлектронная управляющая система.

генерировать ультракороткие импульсы с минимальной длительностью  $\sim 150\text{--}200$  пс. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 1 Гц. Были использованы два блока питания: субмиллисекундного БПЛ-33-60 (блок 1) и миллисекундного источника питания с неполным разрядом LP1-2000-350/30000 (блок 2). Длительность колоколообразного импульса накачки блока 1 составляла 130 мкс, энергия накачки находилась в пределах 15–60 Дж. Управление параметрами выходного импульса блока 2 производилось с помощью ЭВМ. Это дало возможность изменять длительность импульса с точностью 0.1 мс, а напряжение с точностью 1.5 В. Максимальная частота повторения импульсов для блока 2 составляла 200 Гц с учетом максимальной выходной мощности 2 кВт, а максимальные значения длительности импульса, зарядного напряжения и энергии разряда составляли соответственно 3.9 мс, 350 В и 250 Дж. Оба блока питания работали в режиме дежурной дуги (ток  $\sim 1$  А).

Активным элементом служил стержень Nd:YAG ( $\phi 6.3 \times 60$  мм), помещенный в термостатированный квантрон К-104 Г. Резонатор был образован двумя плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 0.98 и 0.35 на клиновидных подложках и имел длину  $\sim 150$  см (время обхода 10 нс). Зеркальный телескоп с коэффициентом увеличения 3:1 состоял из двух сферических зеркал с радиусами кривизны 100 и 300 мм. Использование телескопа позволило уменьшить диаметр лазерного луча в сечении кристалла ДКДП до  $< 425$  мкм (ширина на полувысоте по интенсивности). Для селекции низшей поперечной моды в резонатор была установлена ирисова диафрагма (рабочий диаметр 3 мм). Кроме того, использование телескопа позволило увеличить объем моды в активном эле-

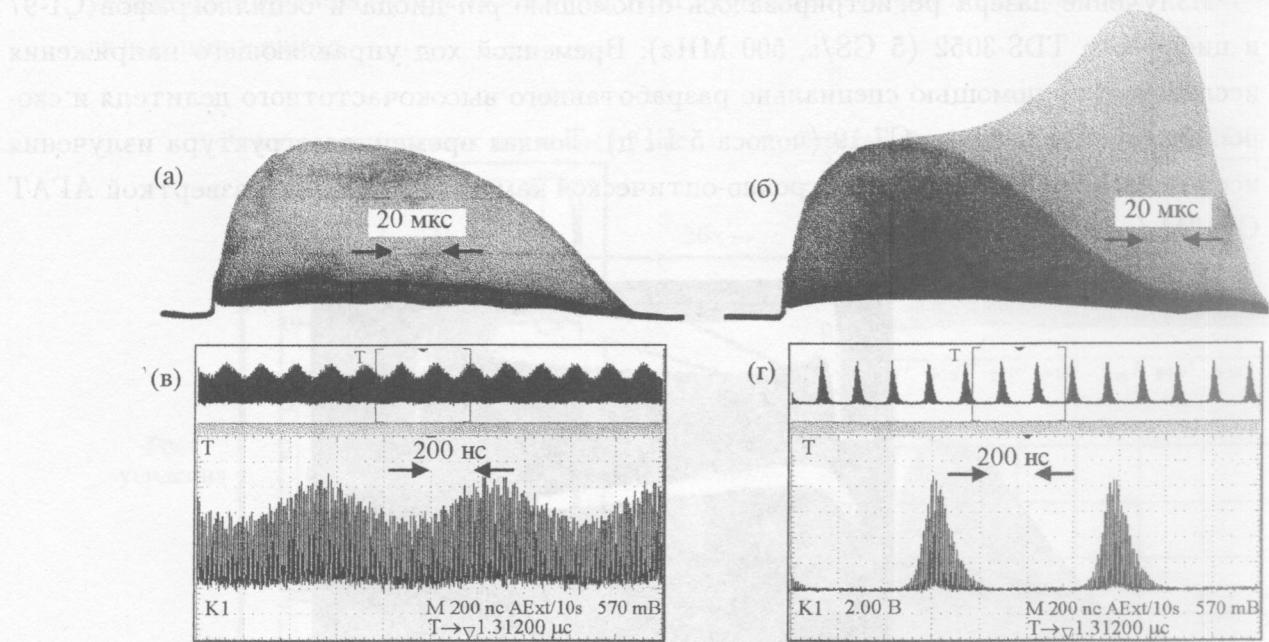


Рис. 3. Осциллограммы цугов пикосекундных импульсов: ((а), (б)) – обзорная картина генерации, (а) – режим стабилизации, (б) – возбуждение самопульсаций (во времени не разрешены, соответствуют более светлому серому); (в) – гармоническая модуляция огибающей, 70 мкс после начала генерации; (г) – режим генерации микроцугов пикосекундных импульсов, 110 мкс после начала генерации.

менте, повысить выходную мощность и уменьшить влияние насыщения активной среды в процессе генерации, управляемой системой ООС.

Внутрирезонаторный модулятор на основе эффекта Поккельса состоял из кристалла ДКДП и многослойного поляризатора, расположенного под углом Брюстера. Кристалл ДКДП размером  $8 \times 8 \times 11$  мм<sup>3</sup> (продольный электрооптический эффект,  $U_{\lambda/4} < 3.4$  кВ) был установлен непосредственно на плате оптоэлектронной схемы. Использовалась система оптоэлектронной ООС на основе высоковольтной кремниевой мезоструктуры с напряжением лавинного прибора 1200 В [10]. Отраженное от поляризатора излучение через систему оптической задержки отводилось на мезоструктуру. Элемент на основе одного  $p-n$  перехода, в отличие от многопереходной кремниевой структуры [11], обладает повышенной (примерно в 10 раз) чувствительностью. Это, наряду с использованием внутрирезонаторного телескопа, дает возможность заметно расширить диапазон уровня стабилизации мощности излучения.

Излучение лазера регистрировалось с помощью *pin*-диода и осциллографов С1-97 и цифрового TDS-3052 (5 GS/s, 500 MHz). Временной ход управляющего напряжения исследовался с помощью специально разработанного высокочастотного делителя и скоростного осциллографа С7-19 (полоса 5 ГГц). Тонкая временная структура излучения исследовалась с помощью электронно-оптической камеры с линейной разверткой АГАТ СФ-3М (разрешение < 2 пс).

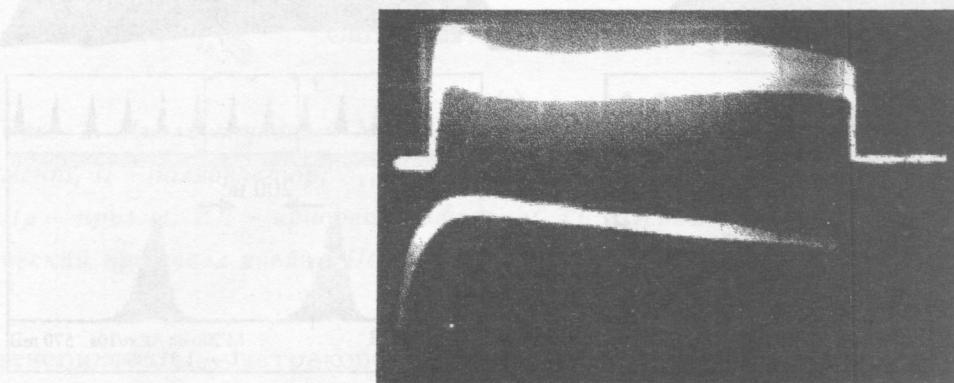


Рис. 4. Временной ход излучения лазера в условиях генерации цуга пикосекундных импульсов примерно одинаковой амплитуды (верхняя осциллограмма) и накачки (свечение лампы). Использовался источник питания с неполным разрядом LP1-2000-350/30000. Время разряда 3.9 мс, 0.5 мс в клетке (осциллограф С8-14).

На рис. 3(а) представлен временной ход излучения при предельном усиливении в режиме генерации гладких цугов коротких импульсов с использованием субмиллисекундного блока 1. Увеличение усиливания приводит к развитию гармонической модуляции огибающей (рис. 3(в)), которая переходит в режим регулярных пульсаций в виде микроцугов коротких импульсов (рис. 3(г)). При увеличении усиливания регулярный характер генерации микроцугов сохраняется до проявления насыщения системы обратной связью. Возникающие при определенном уровне усиливания пульсации не затухают до конца генерации. Измерения показали, что период следования микроцугов примерно совпадает с периодом гармонической модуляции и составляет  $\sim 0.76$  мкс. Большему усилию соответствует меньшая длительность микроцугов большей амплитуды. Минимальная длительность микроцуга составила 120 нс – 12 импульсов. Общее число микроцугов превышало 150 при длительности накачки 130 мкс (рис. 3(б)). Для сокращения длительности импульсов использовался полимерный пассивный затвор на основе полиметинового красителя с начальным пропусканием 74% при нормальном падении,

установленный под углом Брюстера. При этом длительность импульсов составляла десятки пикосекунд.

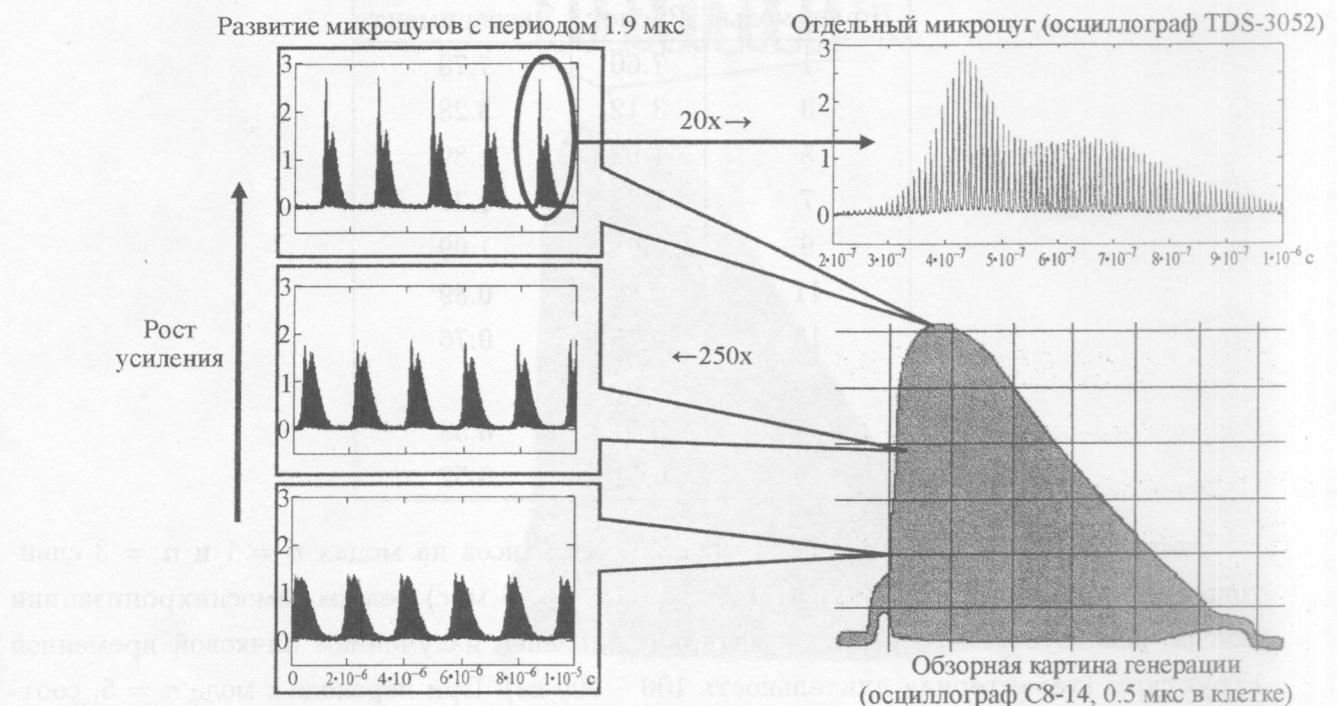


Рис. 5. Развитие регулярных микроцугов коротких импульсов с периодом 1.9 мкс и тонкая временная структура отдельного микроцуга.

Использование блока 2 позволило существенно обогатить режимы генерации. Без использования насыщающегося поглотителя был получен длинный цуг пикосекундных импульсов одинаковой амплитуды. Максимальное количество импульсов составило  $3.5 \times 10^5$ , минимальная длительность импульса  $\sim 200$  пс. Благодаря миллисекундной длительности и стабильности разряда блока 2 были получены режимы с дискретным набором периодов (см. табл. 1), значения которых находятся в хорошем соответствии с частотами первых 10 сдвиговых мод кристалла ДКДП ячейки Покельса. Переключение между режимами осуществлялось выбором положения лазерного луча в сечении кристалла ДКДП, соответствующего пучности стоячей акустической волны. Для возбуждения мод высшего порядка необходимое положение луча смешалось к периферийной области (см. рис. 1).

Таблица 1

*Период акустических колебаний: рассчитанный по формуле (1) и полученный экспериментально, мкс*

Номер моды	Расчет	Эксперимент
1	7.60	7.78
3	3.12	3.28
5	1.92	1.89
7	1.38	1.37
9	1.08	1.09
11	0.88	0.89
13	0.75	0.76
15	0.65	—
17	0.57	0.58
19	0.51	0.52

Эксперименты показали, что в условиях резонансов на модах  $n = 1$  и  $n = 3$  сдвиговых акустических колебаний (периоды 7.78 и 3.28 мкс) режим самосинхронизации мод не реализуется. Аксиальный интервал заполнен излучением пичковой временной структуры (характерная длительность 100 – 200 пс). При переходе к моде  $n = 5$ , соответствующей периоду 1.89 мкс, временная структура излучения сформирована в виде одиночных на аксиальном интервале субнаносекундных импульсов. Самосинхронизация мод наблюдалась вплоть до минимально зарегистрированного периода пульсаций 0.52 мкс. Для реализации режимов с субмикросекундным периодом следования микроцугов характерно миллисекундное время развития.

С увеличением мощности накачки и/или напряжения  $U_{\text{см}}$  период пульсаций увеличивался не более чем на 2%. На рис. 5 показано развитие пульсаций с периодом 1.9 мкс в виде микроцугов коротких импульсов и тонкая временная структура отдельного микроцуга. При увеличении усиления наблюдалась бифуркация удвоения периода следования микроцугов (рис. 6 и 7). На рис. 7 показана кинетика генерации лазера, соответствующая удвоению периода при возбуждении сдвиговых акустических колебаний с периодом 0.52 мкс ( $n = 19$ ). В более высокочастотном режиме при увеличении усиления удвоение периода проявляется не только в отличии амплитуд соседних микроцугов, но и в почти полном подавлении группы микроцугов меньшей амплитуды, следующих с периодом  $2T$ . С дальнейшим увеличением накачки происходит хаотизация динамики.

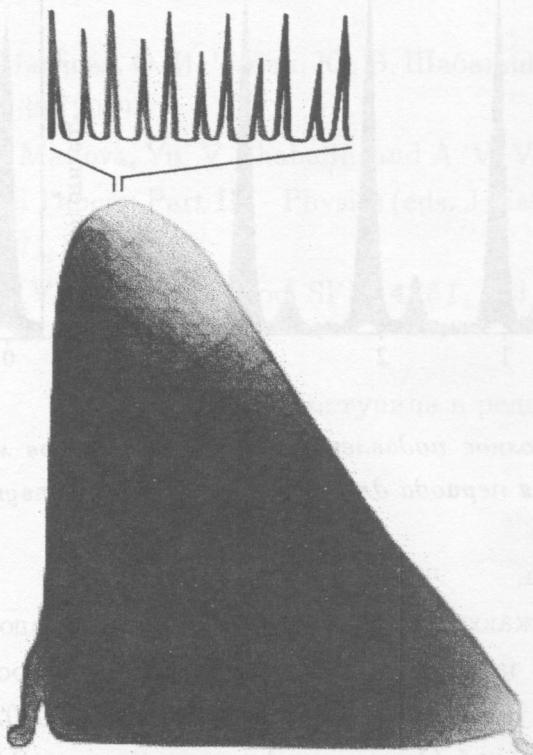


Рис. 6. Бифуркация удвоения периода микроцугов при возбуждении сдвиговых акустических колебаний с периодом 1.37 мкс (мода  $n = 7$ ): внизу – обзорная картина генерации, 0.5 мс в клетке, вверху – фрагмент длительностью 13 мкс.

Таким образом, реализованы режимы регулярных пульсаций с дискретным набором периодов от 7.8 мкс до 0.52 мкс в Nd:YAG лазере с ламповой накачкой, управляемом оптоэлектронной отрицательной обратной связью на основе кристалла ДКДП. Периоды пульсаций соответствуют первым 10 модам сдвиговых акустических колебаний кристалла ДКДП (сечение  $8 \times 8 \text{ мм}^2$ ). Переключение между режимами осуществлялось путем выбора положения лазерного луча в сечении кристалла, соответствующего пучности стоячей акустической волны. Начиная с моды  $n = 5$ , реализуется самосинхронизация мод, а точность соответствия расчетных и экспериментально полученных периодов позволяет рассчитать размеры кристалла ДКДП для осуществления режима генерации микроцугов коротких импульсов с заданным суб- и микросекундным периодом. Длительность импульсов, полученных в режиме самосинхронизации мод, может быть сокращена до десятков пикосекунд за счет использования насыщающегося поглотителя. Хаотизация регулярной последовательности микроцугов осуществляется через

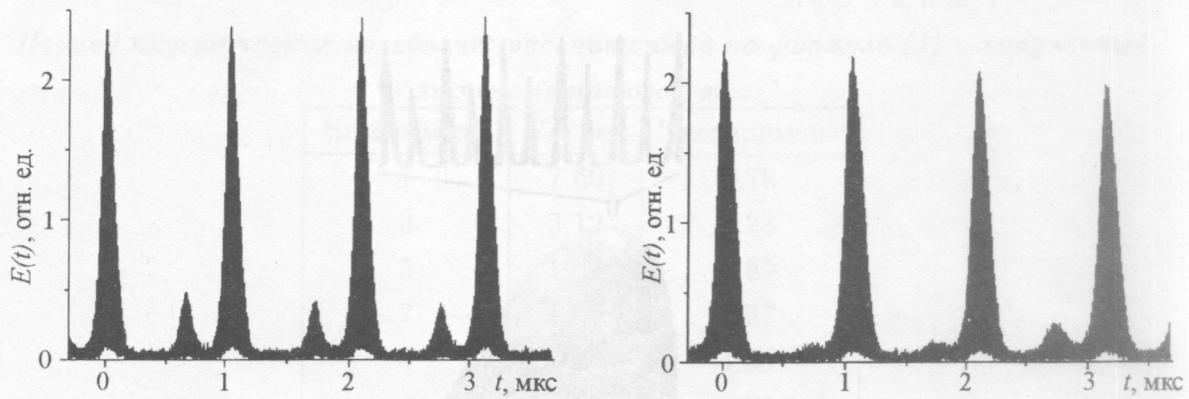


Рис. 7. Почти полное подавление группы микрочугов меньшей амплитуды в условиях бифуркации удвоения периода для частоты, соответствующей mode  $n = 19$  ( $T = 0.52$  мкс).

удвоение периода.

Авторы выражают благодарность А. В. Виноградову, В. А. Русову, В. Г. Тункину и А. М. Чекмареву за полезные обсуждения. Работа проведена при частичной поддержке РФФИ, проекты N 08-08-00108a, 09-02-00638a, 09-02-01190a, Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Фундаментальные проблемы фотоники и физики новых оптических материалов”, Программы поддержки молодежи УНК ФИАН и программы Президиума РАН “Поддержка молодых ученых”.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. К. Макуха, В. С. Смирнов, В. М. Семибаламут, КЭ **4**, 1023 (1977).
- [2] Д. В. Ворчик, М. В. Горбунков, Труды МФТИ, М., **4** (1995).
- [3] M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, V. A. Petukhov, et al., Applied Optics **48**, 2267 (2009).
- [4] J. F. Stephany, JOSA **55**(2), 136 (1965).
- [5] Д. В. Синько, Б. В. Аникеев, КЭ **20**, 1199 (1993).
- [6] H. Ekstein, Phys. Rev. **66**(5, 6) (1944).
- [7] А. М. Маругин, В. М. Овчинников, ОМП **2**, 79 (1970).
- [8] Т. А. Кузовкова, А. М. Маругин, Е. В. Нилов, В. М. Овчинников, ОМП **2** 57 (1977).
- [9] А. В. Агашков, Ю. Ф. Моргун, ЖПС **3**, 384 (1983).
- [10] М. В. Горбунков, Ю. В. Шабалин, Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 38 (1998).

- [11] Д. Б. Ворчик, М. В. Горбунков, Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11–12, 70 (1997).
- [12] М. В. Горбунков, Ю. Я. Маслова, О. И. Чабан, Ю. В. Шабалин, Краткие сообщения по физике ФИАН, **36**(5), 39 (2009).
- [13] M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, Yu. V. Shabalin, and A. V. Vinogradov, in WDS'07 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), (Prague, Matfyzpress, 2007), p. 140.
- [14] M. V. Gorbunkov and Yu. V. Shabalin, Proc. SPIE **4751**, 463 (2002).

Поступила в редакцию 9 июня 2009 г.