

УДК 621.373.826.038

## ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ НАНО/ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В Nd:YAG ЛАЗЕРЕ С МОДУЛЯТОРОМ ДОБРОТНОСТИ ПОККЕЛЬСА

С. М. Першин, В. Н. Леднев, М. А. Давыдов,  
В. К. Клинков, А. Ф. Бункин

*Предложен способ переключения одночастотного режима генерации наносекундного импульса на цуг пикосекундных импульсов в Nd:YAG лазере с электрооптическим модулятором добротности Поккельса без изменения элементов резонатора. Одночастотный режим был обеспечен юстировкой активного элемента, который выполнял роль селектора продольных мод резонатора. Спектр генерации измеряли интерферометром Фабри–Перо при одновременной регистрации осциллограмм импульсов.*

**Ключевые слова:** лазер, синхронизация мод, ячейка Поккельса, пикосекундный импульс.

В данном сообщении изложены результаты экспериментального исследования работы Nd:YAG лазера с электрооптическим модулятором добротности Поккельса с переключением одночастотного режима генерации наносекундного импульса на цуг пикосекундных импульсов без замены элементов резонатора. Такой лазер необходим для изучения процессов абляции импульсами разной длительности [1, 2] и их применения в лазерных технологиях, а также для исследования динамики лазерной плазмы и эволюции ее спектра для количественного анализа [3], с использованием импульса модулятора для синхронизации внешних устройств. Подобная возможность управления режимом генерации лазера реализована, насколько нам известно, впервые.

Режим самосинхронизации мод наиболее детально изучали для лазеров с просветляющимся красителем [4–9]. При этом режимы спонтанной самосинхронизации мод [10] в лазере при свободной генерации, а также с электрооптическим модулятором Поккельса, оказались менее востребованными, несмотря на теоретическое обоснование [11, 12] и

---

НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pershin@kapella.gpi.ru.

экспериментальную реализацию генерации пикосекундных импульсов [13]. Мы обратили внимание на принципиальное преимущество генерации пикосекундных импульсов в лазере с модулятором Поккельса [11] по сравнению с пассивной синхронизацией мод, которое позволяет синхронизовать внешние устройства по фронту импульса модулятора, а также повысить интенсивность пикосекундных импульсов в цуге при сокращении их числа. Кроме этого, наличие модулятора Поккельса в резонаторе позволяет переключить лазер на генерацию наносекундных импульсов при размещении в нем селектора продольных мод резонатора. Решению этой задачи без изменения числа оптических элементов в резонаторе посвящена данная работа.

Изучение генерации импульсов проводили с лазером на алюмоиттриевом гранате с неодимом ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ , ИЛТИ-407, Россия, НПО “Полюс”), в который была вставлена диафрагма для селекции поперечной моды  $\text{TEM}_{00}$  [4–8]. Оптическая схема лазера представлена на рис. 1: плоскопараллельный резонатор лазера длиной 33 см образован двумя зеркалами с коэффициентом отражения 20% и 99.8% на длине волны генерации 1064 нм. Зеркала резонатора нанесены на плоскопараллельные пластины толщиной 4 мм из оптического стекла марки К-8 и установлены зеркальным покрытием наружу. Такое размещение зеркал обеспечивает селекцию продольных мод резонатора и повышает вероятность генерации одночастотного импульса, как было показано нами [14]. Электрооптический модулятор добротности Поккельса размещен вблизи “глухого” зеркала. В средней части резонатора расположен активный элемент  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  диаметром 6 мм и длиной 60 мм с плоскопараллельными торцами.

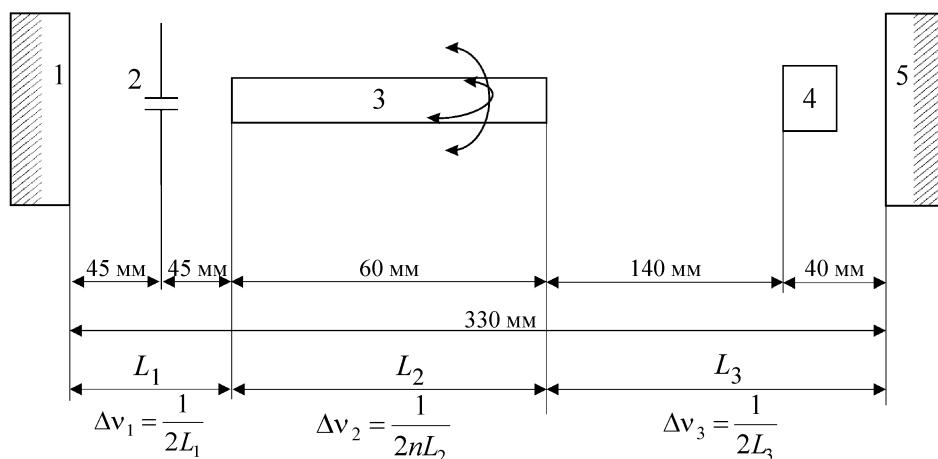


Рис. 1: Схема лазера: 1 – выходное зеркало; 2 – диафрагма; 3 – активный элемент длиной 60 мм; 4 – активный модулятор добротности; 5 – глухое зеркало.

Цилиндрический осветитель с активным элементом закреплен в узле, позволяющем юстировать активный элемент относительно оптической оси резонатора, которая задана положением диафрагмы (см. рис. 1) так, чтобы его торцы были параллельны зеркалам резонатора. При этом допустимое отклонение нормали к торцу элемента от оптической оси резонатора по углу не должно превышать величину  $\alpha \sim dnl^{-1}$  ( $d$  – диаметр диафрагмы,  $n = 1.82$  – показатель преломления алюмоиттриевого граната,  $l$  – длина активного элемента или отрезка между торцом элемента и зеркалом резонатора, если отрезок больше оптической длины элемента, как в нашем случае). В этом режиме генерации совокупность частотных селекторов (зеркала резонатора, активный элемент и отрезки резонатора между его торцами и зеркалами, рис. 1) обеспечивают одночастотную генерацию наносекундных импульсов на одной продольной моде резонатора [15]. Переключение лазера в режим генерации пикосекундных импульсов производили поворотом активного элемента (осветителя в целом) на 1–10 градусов.

Контроль и измерение параметров импульсов генерации проводились по измерению формы и длительности импульса с помощью фотодиода ЛФД-2а и осциллографа Tektronix DPO 7254 (полоса пропускания 2.5 ГГц). Спектр излучения лазера измеряли (после удвоения его частоты в кристалле СДА) с помощью интерферометра Фабри–Перо (область дисперсии  $0.5 \text{ см}^{-1}$ ) и ПЗС видеокамеры, которая обеспечивала запись интерферограмм и их анализ в реальном времени.

Для дополнительного контроля переключения лазера в режим самосинхронизации мод и генерации пикосекундных импульсов мы увеличивали длину резонатора и использовали зависимость  $T = 2L/c$  периода  $T$  следования импульсов от оптической длины резонатора  $L$ , где  $c$  – скорость света  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Так увеличение длины резонатора вдвое сопровождалось пропорциональным увеличением периода следования импульсов и уменьшением их числа в цуге [4–8, 16].

На рис. 2 показаны две осциллограммы огибающих лазерных импульсов: один импульс в одночастотном режиме и цуг импульсов при синхронизации мод. Гладкая колоколообразная огибающая лазерного импульса (длительностью  $\sim 35$  нс) указывает на отсутствие биений продольных мод. В режиме синхронизации мод период следования импульсов соответствует времени двойного прохода резонатора. На вставке рис. 2 показан фрагмент цуга (два импульса с интервалом 2.6 нс), из которого следует оценка сверху для длительности импульса в цуге как субнаносекундного. Заметим, что, несмотря на заявленный производителем (НПО “Полюс”) режим наносекундной генерации в данной модели, лазер излучал цуг пикосекундных импульсов.

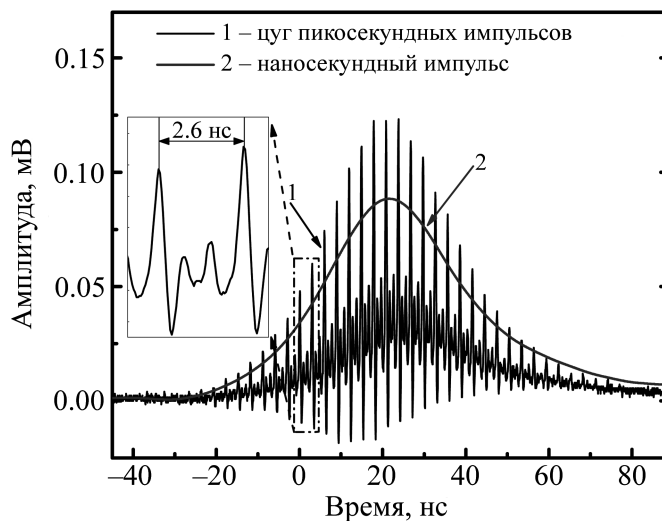


Рис. 2: Временной профиль лазерного импульса в разных режимах работы.

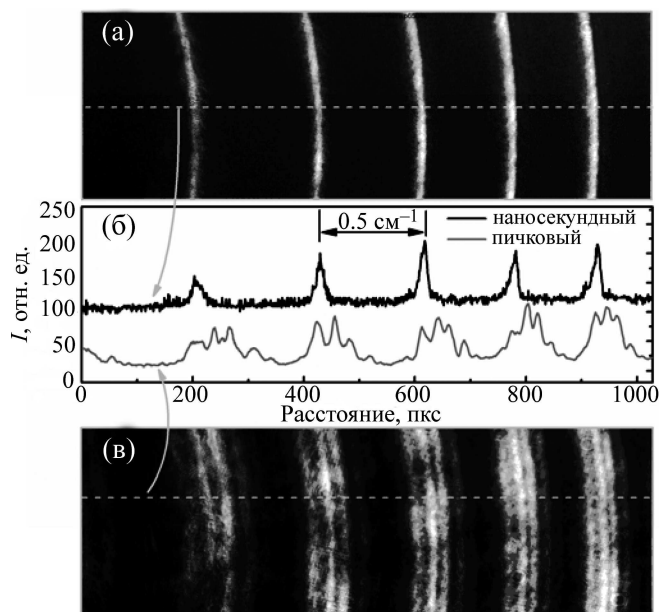


Рис. 3: Спектр генерации лазера в наносекундном режиме для одной продольной моды (а) и в режиме цуга пикосекундных импульсов (в), поперечный профиль интерферограммы Фабри-Перо с базой 1 см (область дисперсии  $0.5 \text{ см}^{-1}$ ) (б).

Измерение ширины спектра излучения (см. рис. 3(а) и 3(в)) в режиме генерации наносекундного импульса (рис. 3(б), верхняя кривая) при превышении порога генерации до 5% дает величину  $\Delta\nu \leq 0.05 \text{ см}^{-1}$ , а в режиме синхронизации мод (рис. 3(б),

нижняя кривая)  $\Delta\nu = (0.3 - 0.25) \text{ см}^{-1}$ . Ширина спектра излучения лазера позволяет [6–8] оценить длительность импульса  $\tau = 0.45 \Delta\nu^{-1} \text{ с}^{-1}$  как 50–65 пикосекунд. Почти двукратное увеличение длительности импульсов по сравнению с типичной (35–40 пс) [17] для пикосекундных  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазеров [6–8, 14], является, скорее всего, результатом “прореживания” спектра частотными селекторами [18] на плоскопараллельных подложках зеркал. Так, период модуляции спектра в режиме самосинхронизации мод (рис. 3(б), нижняя кривая) соответствует области свободной дисперсии интерферометра ( $\sim 0.083 \text{ см}^{-1}$ ) на пластинах зеркал резонатора толщиной 4 мм.

Повторное (за одну вспышку лампы-накачки) [19] включение модулятора добротности (через 15–60 мкс) позволяет получить два цуга пикосекундных импульсов с управляемой задержкой между ними. Существенно, что второй цуг импульсов синхронизован относительно первого цуга с точностью, кратной периоду следования импульсов в цугах. Это свойство генерации последовательности цугов весьма важно для ряда приложений, таких как повышение эффективности обработки материалов (увеличение скорости абляции), в методах дистанционного лазерного зондирования и в экспериментах “накачка-зондирование” для изучения эволюции микросекундных релаксационных процессов.

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность переключения генерации  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазера из одночастотного режима генерации наносекундного импульса (длительностью  $\sim 35 \text{ нс}$ ) в режим синхронизации мод и генерации цуга пикосекундных импульсов без изменения оптических элементов резонатора. Выбор режима работы лазера и формы лазерного импульса производят с помощью активного элемента лазера, который выполняет роль селектора продольных мод. Такой лазер является удобным инструментом при изучении процессов абляции, а также эволюции спектра лазерной плазмы (для количественного анализа состава мишени), которые зависят от длительности импульсов воздействия.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Ильичеву за полезные замечания и предоставление скоростного осциллографа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты РФФИ NN 11-02-00034, 11-02-01202-а, 12-02-31398-мол\_а и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28 в части подпрограммы “Физика, химия и биология воды”.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. М. Климентов, П. А. Пивоваров, В. И. Конов и др. Квант. электр. **34**(6), 537 (2004).
- [2] А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, Л. В. Селезнев и др. ЖЭТФ **143**(3), 403 (2013).
- [3] V. Lednev, S. M. Pershin, A. F. Bunkin, J. Anal. At. Spectrom. **25**(11), 1745 (2010).
- [4] О. Звелто, *Принципы лазеров* (Лань, Москва, 2008).
- [5] А. Е. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, USA, 1986).
- [6] П. Г. Крюков, Квант. электр. **31**(2), 95 (2001).
- [7] *Сверхкороткие световые импульсы*, под. ред. Шапиро С. (Мир, Москва, 1981).
- [8] П. Г. Крюков, В. С. Летохов, УФН **99**, 169 (1969).
- [9] *Femtosecond Laser Pulses*, Ed. Rulliere C. (Berlin, Springer-Verlag, 1998).
- [10] M. A. Duguay, S. L. Shapiro, and P. M. Rentzepis, Phys. Rev. Lett. **19**(18), 1014 (1967).
- [11] H. Stutz and M. Bass, J. Appl. Phys. **40**(1), 377 (1969).
- [12] Е. Г. Ларионцев, В. Н. Серкин, Изв. Вузов СССР, Радиофизика **17**, 679 (1974).
- [13] J. A. Fleck, Jr., Phys. Rev. Lett. **21**(3), 131 (1968).
- [14] С. М. Першин, Г. П. Арумов, А. Ю. Бухаров и др. Квант. электр., **14**, 1366 (1987).
- [15] А. Л. Егоров, В. В. Коробкин, Р. В. Серов, Квант. электр. **2**, 513 (1975).
- [16] Б. И. Денкер, Н. Н. Ильичев, А. А. Малютин и др., Квант. электр. **9**, 1840 (1982).
- [17] S. M. Pershin, Phys. of Wave Phen. **11**(2), 78 (2003).
- [18] В. К. Клинков, Ч. К. Мухтаров, ЖЭТФ **61**, 6(12), 2249 (1971).
- [19] F. Colao, V. Lazić, R. Fantoni, and S. Pershin, Spectrochimica Acta B **57**, 1167 (2002).

Поступила в редакцию 26 апреля 2013 г.