

09

Режим пассивной модуляции добротности твердотельного лазера с многопетлевым резонатором

© А.П. Погода, Г.В. Бурковский, П.С. Макарчук, И.С. Хахалин,
А.С. Борейшо, А.В. Федин

Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург
E-mail: Pogoda@lsystems.ru

Поступило в Редакцию 28 октября 2015 г.

Исследован компактный импульсно-периодический YAG:Nd^{3+} -лазер с само-накачиваемым обращающим волновой фронт многопетлевым резонатором и пассивной модуляцией добротности кристаллами YAG:Cr^{4+} и GSGG:Cr^{4+} . Показана возможность управления энергетическими и временными параметрами излучения отдельных пиков в цуге практически без изменения энергии цуга. В эксперименте реализован режим генерации импульсов модулированного излучения с пиковой мощностью до 30 MW и пространственной яркостью $1.7 \cdot 10^{15} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ при параметре качества излучения M^2 менее 1.2.

Решение многих практических задач требует создания компактных твердотельных лазерных систем ближнего ИК-диапазона с большой энергией, пиковой мощностью и высоким оптическим качеством импульса модулированного излучения, обладающих одновременно малыми массогабаритными характеристиками. Одним из решений указанной задачи является применение методов самообращения волнового фронта (самоОВФ), позволяющих не только динамически компенсировать внутриврезонаторные искажения, но и получать мощное излучение с высоким качеством и пространственной яркостью [1–6].

Исследования генерации самоОВФ-лазеров как с одним, так и с несколькими активными элементами, в которых сами внутриврезонаторные пучки записывают ОВФ-зеркала, показали, что наиболее высокое качество выходного излучения может быть получено, когда в лазере создается не менее двух ОВФ-зеркал на динамических решетках усиления. Это могут быть либо динамические решетки, одновременно записанные

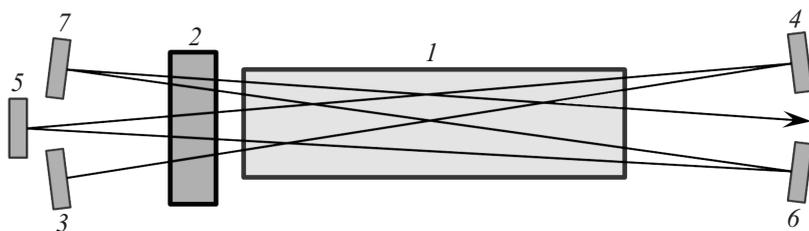


Рис. 1. Схема лазера: 1 — активный элемент, 2 — ПЛЗ, 3–7 — зеркала резонатора.

в одной активной среде [7,8], либо набор решеток в различных активных элементах в случае, если лазер содержит их несколько [9].

Применение пассивного лазерного затвора (ПЛЗ) в самоОВФ-лазере обеспечивает генерацию мощных импульсов одномодового излучения [7,9,10]. В работах [10,11] была показана высокая эффективность генерации YAG:Nd³⁺-лазера с ПЛЗ и самоОВФ при четырехволновом взаимодействии (ЧВВ) в активной среде и в ПЛЗ. При использовании двух YAG:Nd³⁺ активных элементов, энергии импульсов ламповой накачки 63.5 J каждого активного элемента и частоте следования импульсов 30 Hz получена энергия отдельного импульса излучения 202 mJ и пиковая мощность 4 MW при начальном пропускании $T_0 = 58\%$ ПЛЗ на кристалле LiF:F₂⁻, а при применении ПЛЗ с $T_0 = 20\%$ соответственно 350 mJ и 17.5 MW. Однако длина резонатора такого лазера составила около 1.8 m, что существенно ограничивает возможности его практического применения.

В работах [12,13] показана возможность создания компактного самоОВФ-лазера с энергией импульсов более 100 mJ и пиковой мощностью более 1 MW при диодной накачке и использовании оптически плотных ПЛЗ на кристалле YAG:Cr⁴⁺. В данной работе исследуется возможность дальнейшего увеличения пространственно-энергетических параметров генерации компактного многопетлевого лазера [13] с одним активным элементом и узкополосной диодной накачкой.

Схема лазера с габаритными размерами 36 × 10 × 10 см представлена на рис. 1. В качестве активного элемента 1 использовали кристалл YAG:Nd³⁺ размером Ø6.3 × 110 mm и с концентрацией ионов Nd³⁺: 0.6 at.%. Выбор активной среды обусловлен высокой теплопроводностью и механической прочностью матрицы на основе граната, что позволило

использовать его без охлаждения при частоте следования импульсов накачки 1 Нз. Поперечная накачка активного элемента осуществлялась диодными матрицами типа СЛМ-3-2. Энергия импульсов накачки достигала 6.4 J при их длительности 475 μ s.

Излучение в лазере развивается из спонтанной люминесценции, последовательно отражаясь от зеркал (3–7, рис. 1). Обратная связь формируется путем перераспределения энергии внутрирезонаторных пучков в результате многократного ЧВВ в активной среде. В режиме свободной генерации энергия импульса излучения достигала 1.25 J при расходимости, близкой к дифракционному пределу (параметр качества $M^2 = 1.3$).

Для пассивной модуляции добротности YAG:Nd³⁺-лазера был использован ПЛЗ (2, рис. 1) на основе кристаллов YAG:Cr⁴⁺ и GSGG:Cr⁴⁺ с различными коэффициентами начального пропускания T_0 от 5 до 90%, которые устанавливали в область пересечения всех внутрирезонаторных пучков. Выбор материала обусловлен компактностью ПЛЗ по сравнению с насыщающимися поглотителями на основе кристаллов LiF:F₂⁻. Контроль энергетических параметров генерации проводился цифровым измерителем Ophir Vega, а временных параметров — быстродействующим фотодетектором Ophir FPS1 и цифровым осциллографом WJ354A.

На рис. 2, *a* представлена зависимость энергии импульса в цуге, на рис. 2, *b* — энергии цуга, а на рис. 2, *c* — пиковой мощности отдельного импульса в цуге от начального пропускания ПЛЗ GSGG:Cr⁴⁺ и YAG:Cr⁴⁺. Видно, что изменение начального пропускания ПЛЗ YAG:Cr⁴⁺ в диапазоне от 10 до 40% (выделенный диапазон на рис. 2, *b*), позволяет изменять энергию отдельного импульса в цуге в диапазоне 30–132 мJ и его пиковую мощность в интервале 0.25–19 MW без существенного, не более 20%, изменения энергии цуга импульсов. Из полученных данных следует, что ПЛЗ на кристалле YAG:Cr⁴⁺ обеспечивает более высокие энергетические параметры излучения, что может быть связано с меньшими неактивными потерями в матрице ПЛЗ из YAG. При использовании ПЛЗ YAG с $T_0 = 5\%$ энергия импульса модулированного излучения составила 176 мJ, а пиковая мощность 28 MW.

Следует отметить, что энергосъем, составивший $Q = 51 \text{ J/cm}^2$ в исследованном лазере при использовании ПЛЗ YAG с $T_0 = 5\%$, оказался незначительно меньше, чем в YAG:Nd³⁺-лазере с двумя аналогичными активными элементами и ПЛЗ LiF:F₂⁻ с $T_0 = 20\%$, составивший

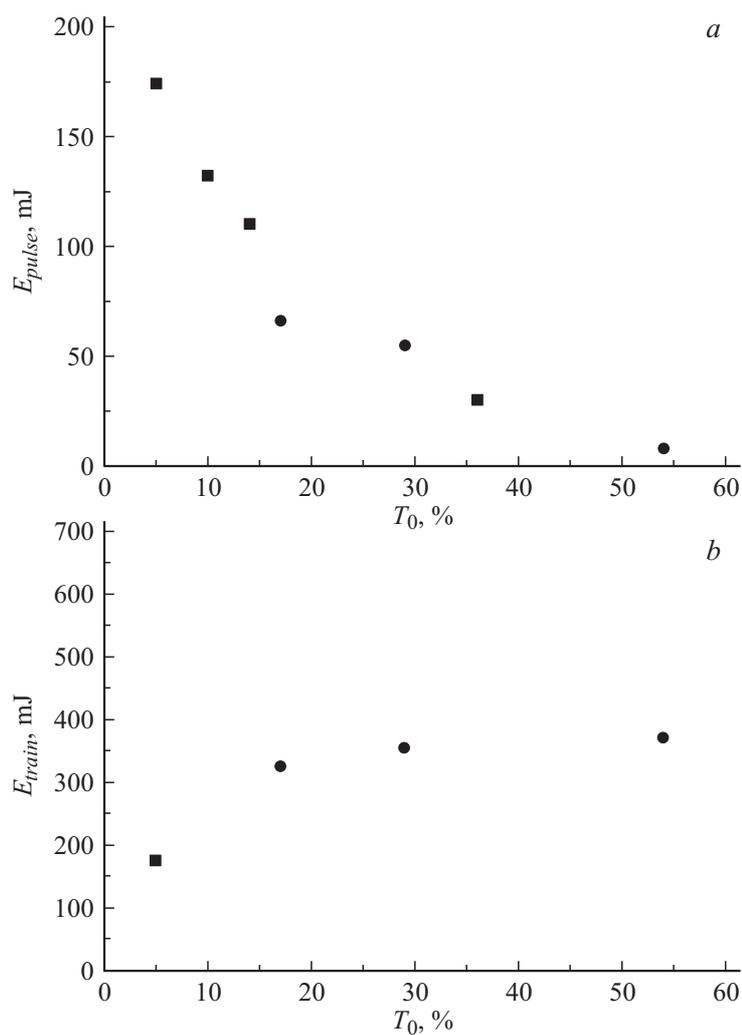


Рис. 2. Энергетические и временные зависимости: *a* — энергии пика E_{pulse} в цуге, *b* — энергии цуга E_{train} ; *c* — пиковой мощности P_{peak} генерации от коэффициента начального пропускания ПЛЗ (YAG:Cr⁴⁺ — квадраты, GSGG:Cr⁴⁺ — круги, в рамках — количество пиков в цуге).

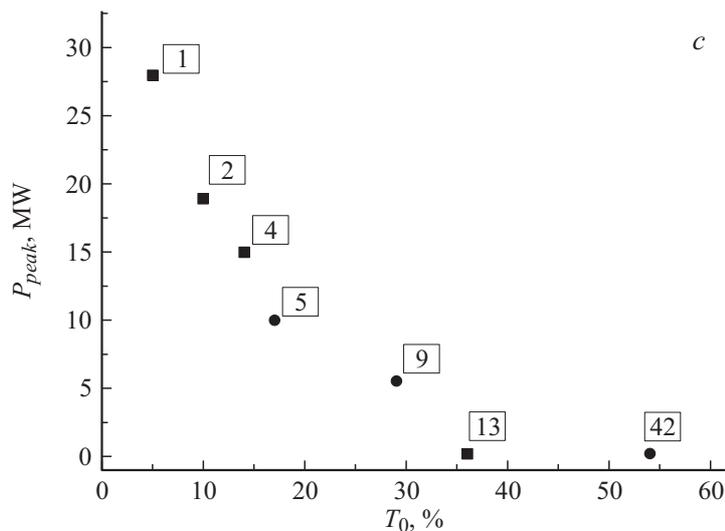


Рис. 2 (продолжение).

$Q = 56 \text{ J/cm}^2$, что указывает на высокую эффективность компактного многопетлевого лазера с одним активным элементом и узкополосной диодной накачкой. Кроме того, пространственная яркость исследованного лазера достигала $1.7 \cdot 10^{15} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, что на порядок превышает таковую $1 \cdot 10^{14} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ для лазера с двумя активными элементами. При этом, несмотря на столь существенное увеличение пиковой мощности импульсов излучения, пространственные параметры генерации остаются близкими к дифракционному пределу. Измерение параметра качества излучения проводилось методом „ножа“ с контролем значения диаметра пучка камерой Ophir SP620U с пространственным разрешением 1600×1200 пикселей, пространственный размер пикселя которой составлял $4.40 \times 4.40 \mu\text{m}$. Измеренный при $T_0 = 90\%$ (ПЛЗ $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$) параметр качества излучения M^2 не превосходит значение 1.4. С уменьшением начального пропускания ПЛЗ до $T_0 = 10\%$ параметр качества излучения улучшается и составляет $M^2 = 1.15$ (рис. 3, а). На рис. 3, б представлено пространственное распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка выходного излучения в режиме модуляции добротности с помощью ПЛЗ при частоте следования импульсов 1 Hz.

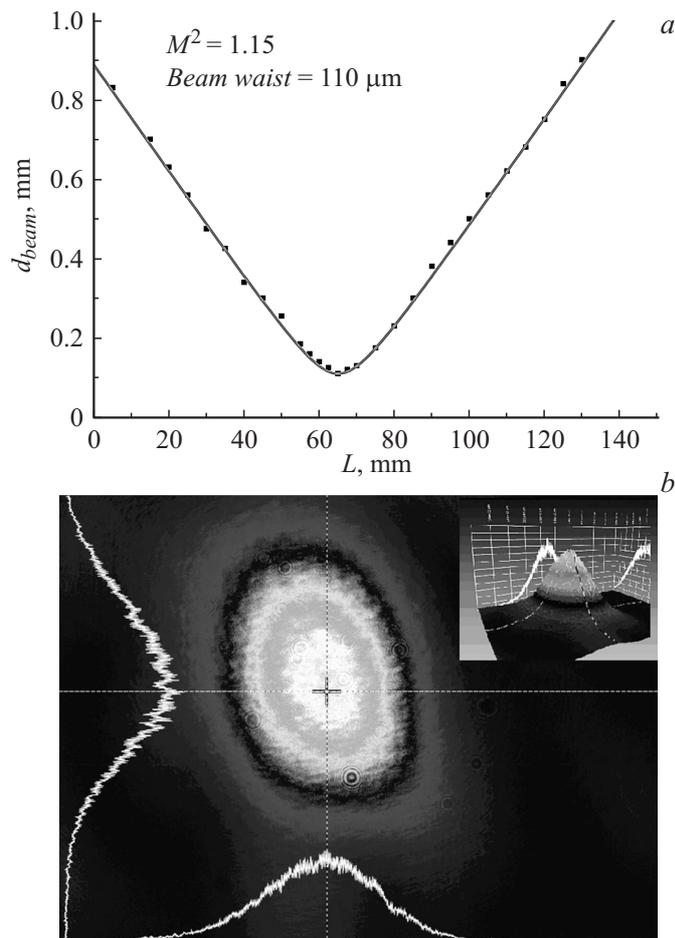


Рис. 3. Пространственные характеристики излучения: *a* — зависимость диаметра пучка сфокусированного выходного излучения d_{beam} от расстояния до фокуса L при измерении параметра качества пучка методом „ножа“; *b* — пространственное распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка в режиме модуляции добротности ПЛЗ при частоте следования импульсов 1 Hz. На рисунке — контурный график изолиний интенсивностей, на вкладке — объемное изображение.

Таким образом, в результате проведенных исследований режима пассивной модуляции добротности насыщающимися поглотителями $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$ и $\text{GSGG}:\text{Cr}^{4+}$ импульсного твердотельного $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера с диодной мультикиловаттной накачкой и многопетлевым резонатором получена пиковая мощность генерации до 28 MW. Также установлена возможность управления энергетическими и временными параметрами генерации (энергией в импульсе и пиковой мощностью) в диапазоне от 250 kW до 19 MW при изменении энергии в пуле генерации в пределах 20%. Это расширяет возможности применения лазера, особенно в случае расположения мишеней на существенно различных расстояниях от излучателя, без изменения теплового режима работы лазера.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПЧ ГЗ № 9.1354.2014/К Минобрнауки России.

Список литературы

- [1] Бельдюгин И.М., Беренберг В.А., Васильев А.Е. и др. // Квантовая электроника. 1989. 16. № 6. С. 1142–1145.
- [2] Syed K.S., Crofts G.J., Green R.P.M. et al. // J. Opt. Soc. Am. B. 1997. V. 14. N 8. P. 2067–2078.
- [3] Sillard P., Brignon A. // Opt. Soc. Am. B. 1998. V. 15. N 12. P. 2917–2928.
- [4] Antipov O.L., Chausov D.V., Kuzhelev A.S. et al. // IEEE J. Quantum Electron. 2001. V. 37. N 5. P. 716–724.
- [5] Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 5. С. 145–148.
- [6] Zendzian W., Jabczynski J.K., Kaskow M. et al. // Opt. Lett. 2012. V. 37. P. 2598–2600.
- [7] Fedin A.V., Basiev T.T., Gavrilov A.V. et al. // Proc. SPIE. 2000. V. 4353. P. 214–220.
- [8] Лебедев В.Ф., Погода А.П., Сметанин С.Н. и др. // ЖТФ. 2014. В. 12 (84). С. 107–111.
- [9] Fedin A.V., Kyalbieva S.A., Gavrilov A.V. et al. // Proc. SPIE. 2001. V. 4644. P. 312–318.
- [10] Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T. et al. // Laser Phys. 1999. V. 9. N 2. P. 433–436.
- [11] Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 5. С. 145–148.
- [12] Zendzian W., Kaskow M., Jabczynski J.K. // Opt. Express. 2014. V. 22. N 25. P. 30657–30662.
- [13] Pogoda A.P., Lebedev V.F., Makarchuk P.S. et al. // Opt. Memory Neural Networks. 2013. V. 22. N 4. P. 267–271.