

09

Стабилизация спектра генерации твердотельного импульсного Nd–YAG-лазера с многопетлевым резонатором

© А.П. Погода¹, А.А. Сергеев¹, А.В. Федин¹, А.С. Иванов²,
Н.В. Никоноров²

¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
E-mail: Pogoda@lsystems.ru

Поступило в Редакцию 17 ноября 2016 г.

Предложен способ стабилизации частоты и сужения ширины полосы генерации импульсного твердотельного Nd–YAG-лазера с динамическим самоадаптивным многопетлевым резонатором путем введения внутррезонаторной стационарной объемной брэгговской решетки. Это позволяет зафиксировать частоту и уменьшить ширину спектральной линии генерации с 18 до 4 pm.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.08.44539.16571

Применение методов самообращения волнового фронта (самоОВФ) позволяет создавать компактные лазерные системы с большой энергией, пиковой мощностью и высоким оптическим качеством импульса модулированного излучения, обладающие к тому же малыми массогабаритными характеристиками [1–3]. Мощное излучение с высокой пространственной яркостью требуется для решения многих практических задач обработки материалов, спектроскопии, преобразования в актуальные спектральные диапазоны, голографии [4–7].

Подобные лазерные системы с самоОВФ были реализованы как с ламповой [4], так и с диодной [3] накачкой. Исследования, проведенные нами на наиболее широко применяемых активных средах, таких как алюмоиттриевый гранат с неодимом (Nd:YAG), гадолиний-галлиевый гранат с неодимом (Nd:GGG), силикатные и фосфатные стекла с неодимом, показали [1–10], что самоОВФ в результате дифракции на

динамических решетках коэффициента усиления, записанных непосредственно в активной среде, позволяет получать одномодовое, близкое к одночастотному, излучение цугов наносекундных импульсов, энергия которых может достигать 0.5 J при пиковой мощности до 20 MW и пространственной яркости до $5 \cdot 10^{14} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$. При этом в отдельных случаях удастся получать одночастотные импульсы генерации с шириной полосы около 1 pm ($\sim 300 \text{ MHz}$). Это обусловлено спектральной селекцией при более высокой эффективности обратной связи для основной моды, которая преодолевает порог генерации значительно раньше и имеет более высокое превышение над порогом, чем остальные моды.

Однако при больших превышениях над порогом частота генерации произвольным образом изменяется от импульса к импульсу в пределах центральной части полосы усиления активной среды. Такая нестабильность существенно ограничивает применение данного лазера [7–10].

Перспективным путем решения данной задачи представляется применение комплексного стационарно-динамического голографического способа, в котором для формирования динамических решеток коэффициента усиления вводится дополнительный селективный элемент — стационарная объемная брэгговская решетка, применение которой во внешнем резонаторе полупроводникового лазера [11] позволяло эффективно стабилизировать длину волны и сужать ширину полосы генерации.

Задачей представленной работы является исследование влияния внутрирезонаторной пропускающей объемной брэгговской решетки на спектральную ширину излучения Nd:YAG-лазера с динамическим самоадаптивным многопетлевым резонатором.

В настоящей работе использована малогабаритная лазерная система с самоОВФ при многоволновом взаимодействии в активной (усиливающей) среде и среде пассивного лазерного затвора (ПЛЗ).

Для исследования лазерной генерации использован квантрон с цилиндрическим активным элементом Nd:YAG (1.1 at.% Nd³⁺) размером $6.3 \times 100 \text{ mm}$. Поперечная четырехсторонняя импульсно-периодическая накачка активного элемента (АЭ) осуществлялась двенадцатью матрицами лазерных диодов типа СЛМ 3-2 с размерами излучающей площадки $5 \times 25 \text{ mm}$ и пиковой мощностью до 2 kW каждая. Максимальная энергия накачки составила 10.3 J. В качестве ПЛЗ применяли кристалл LiF:F₂⁻ с начальным пропусканием $T_0 = 14\%$ и длиной 51.5 mm. Длина лазера составляла 55 cm.

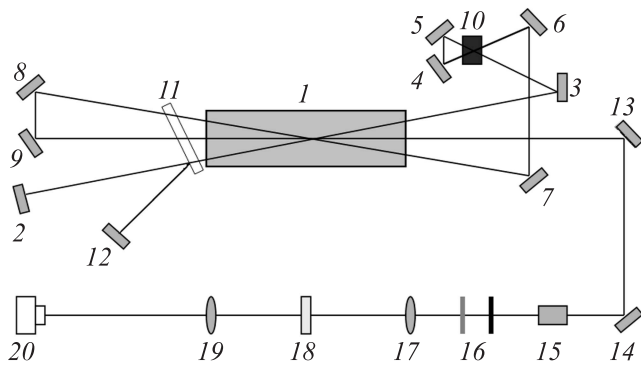


Рис. 1. Оптическая схема проведения эксперимента: 1 — активный элемент; 2, 12 — глухие зеркала; 3–9, 13, 14 — поворотные зеркала; 10 — пассивный затвор LiF:F_2^- (начальное пропускание $T_0 = 14\%$); 11 — стационарная брэгговская решетка; 15 — нелинейный кристалл для получения второй гармоники; 16 — инфракрасный и нейтральный фильтры; 17, 19 — линзы; 18 — эталон Фабри-Перо; 20 — ПЗС-матрица.

Оптическая схема лазера представлена на рис. 1. Лазер состоит из одного АЭ 1, глухого зеркала 2, шести поворотных зеркал 3–9 и ПЛЗ 10. Для стабилизации частоты и сужения спектра генерации была использована пропускающая объемная брэгговская решетка 11, записанная в фототерморефрактивном стекле [12], синтезированном в университете ИТМО. За счет чисто фазового характера записываемых решеток данный материал предоставляет возможность получения решеток с дифракционной эффективностью до 99%. Решетка была записана с помощью УФ-излучения He–Cd-лазера (325 nm) под длину волны генерации в 1064 nm в объеме стекла толщиной 1 mm. Угол дифракции на рабочей длине волны был выбран 27.1° . Дифракционная эффективность записанной решетки составила 75%.

Исследования проводили путем сравнения спектрального состава излучения лазера с брэгговской решеткой и без нее. Решетку 11 (рис. 1) устанавливали по ходу распространения лучей в резонаторе перед глухим зеркалом 2 таким образом, чтобы условие Брэгга выполнялось только для излучения, распространяющегося в направлении зеркала 2. Для остальных внутрирезонаторных пучков условие Брэгга не выполняется, поэтому они с решеткой не взаимодействовали благодаря высокой

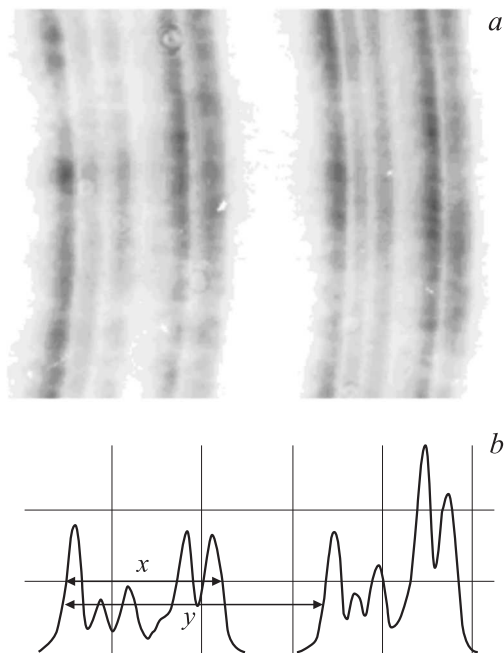


Рис. 2. Сравнение спектра лазера в режиме генерации цуга импульсов: интерферограмма (*a*) и ее сечение (*b*) в отсутствие стационарной брэгговской решетки; интерферограмма (*c*) и ее сечение (*d*) при наличии в схеме стационарной брэгговской решетки.

угловой селективности используемой решетки. Так как дифракционная эффективность решетки превышала 90%, то зеркало 2 в формировании генерации не участвовало. Вместо этого в первом порядке дифракции на эквивалентном расстоянии устанавливали зеркало 12 для обеспечения обратной связи.

Измерения спектрального состава излучения проводили путем преобразования его во вторую гармонику с помощью нелинейного кристалла 15 (рис. 1). Излучение второй гармоники, прошедшее через инфракрасный и нейтральный фильтры 16, а также расширяющую пучок линзу 17, попадают на эталон Фабри-Перо 17 с интервалом свободной дисперсии 28 nm. Далее полученная интерферограмма проецируется

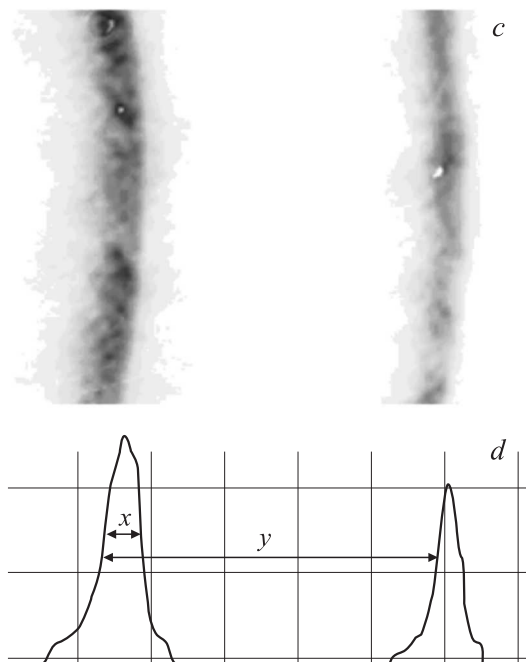


Рис. 2 (продолжение).

линзой 19 на ПЗС-матрицу камеры Ophir-Spiricon 20. Полученную интерферограмму обрабатывали с помощью программного пакета Fiji, позволяющего построить сечение интерферограммы.

Лазерная система работает следующим образом. Генерация начинается с шумового излучения в АЭ. По мере развития генерации внутрирезонаторными пересекающимися пучками в АЭ записываются пропускающие решетки коэффициента усиления и решетки показателя преломления в ПЛЗ, образующие самоподстраивающийся адаптивный резонатор лазера. На образовавшихся решетках происходят перераспределение поля излучения и обращение его волнового фронта. При установке стационарной объемной брэгговской решетки она выделяет центральные компоненты контура усиления уже на стадии шумового излучения, что приводит к стабилизации частоты генерации лазера.

Записанные в активной среде динамические решетки совместно со стационарной брэгговской решеткой производят селекцию пространственных, спектральных и поляризационных компонентов излучения. ПЛЗ реализует режим пассивной модуляции добротности и позволяет получить излучение в виде цуга импульсов наносекундной длительности.

На рис. 2 представлены интерферограммы и их сечения, полученные в режиме генерации цуга из 11 импульсов, без брэгговской решетки (a, b) и после ее установки (c, d). Видно, что в первом случае интерферограмма содержит 2–6 колец в рамках одного порядка интерференции, что свидетельствует о наличии соответствующего количества продольных мод. Суммарная ширина полосы определялась по формуле $x/y \cdot \Delta\lambda$, где x — расстояние между крайними модами на интерферограмме, y — расстояние между соседними порядками на интерферограмме, $\Delta\lambda$ — интервал свободной дисперсии, равный 28 nm. Полученные результаты показали, что без решетки суммарная спектральная ширина составила 18 nm, а при использовании решетки — не превышала 4 nm. При этом центральная частота излучения оставалась постоянной.

Таким образом, применение комплексного стационарно-динамического голографического способа позволило стабилизировать частоту и сузить с 18 до 4 nm ширину полосы генерации твердотельного импульсного самоОВФ-лазера с поперечной диодной накачкой. При этом излучение лазера обладает высокой энергией в импульсе до 100 mJ, пиковой мощностью до 10 MW и спектральной яркостью до $6 \cdot 10^{13} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, что делает лазер полезным для решения широкого круга практических задач.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-23-00136).

Список литературы

- [1] Лебедев В.Ф., Погода А.П., Сметанин С.Н. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 12. С. 107–111.
- [2] Pogoda A.P., Lebedev V.F., Makarchuk P.S. et al. // Optical Memory and Neural Networks. 2013. V. 22. N 4. P. 267–271.
- [3] Погода А.П., Бурковский Г.В., Макаrchук П.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 6. С. 35–41.

- [4] *Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В.* // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 2. С. 145–148.
- [5] *Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Осико В.В.* и др. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 4. С. 385–387.
- [6] *Басиев Т.Т., Басиева М.Н., Гаврилов А.В.* и др. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 8. С. 710–715.
- [7] *Солохин С.А., Сметанин С.Н., Гаврилов А.В.* и др. // Известия РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. № 10. С. 1242–1246.
- [8] *Basiev T.T., Fedin A.V., Osiko V.V.* et al. // Laser Phys. 2001. V. 11. N 6. P. 807–809.
- [9] *Басиев Т.Т., Сметанин С.Н., Федин А.В.* и др. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. В. 3. С. 378–384.
- [10] *Федин А.В., Сметанин С.Н., Шепелев А.Е.* и др. // Оборонная техника. 2013. № 7–8. С. 80–82.
- [11] *Ivanov S.A., Nikonorov N.V., Ignat'ev A.I.* et al. // Semiconductors. 2016. V. 50. N 6. P. 819–823.
- [12] *Ivanov S.A., Ignat'ev A.I., Nikonorov N.V.* et al. // J. Opt. Technol. 2014. V. 81. N 6. P. 356–360.