

Одномодовый Nd:YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором

© Г.В. Бурковский,^{1,2} А.В. Федин,^{1,2} Д.О. Большанин,¹ А.П. Погода,^{1,2} А.С. Борейшо^{1,2}

¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург, Россия

² ООО НПП „Лазерные системы“, 198515 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: burkovsky.georgy@mail.ru, pogoda@lsystems.ru

(Поступило в Редакцию 6 июля 2016 г. В окончательной редакции 29 декабря 2016 г.)

Предложен мощный малогабаритный импульсно-периодический Nd:YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся резонатором, обрабатывающим волновой фронт. Получены пули импульсов с энергией 1.5 J и параметром качества излучения $M^2 \leq 1.2$ при расходимости 0.4 mrad и пространственной яркости $5 \cdot 10^{14}$ W/(cm² · sr). Пиковая мощность одночастотных импульсов превышала 15 MW при энергии 170 mJ, которым соответствовала ширина полосы генерации 300 MHz.

DOI: 10.21883/JTF.2017.08.44727.1970

Практическое использование оптико-электронных комплексов на базе твердотельных лазерных систем требует создания высокоэнергетических малогабаритных твердотельных лазеров с качеством модулированного излучения, близким к дифракционному пределу. Благодаря развитию технологий диодной лазерной накачки вновь появляется интерес к лазерам с самонакачивающимися фазово-сопряженными петлевыми резонаторами, в которых лазерная среда является не только усилителем лазерного излучения, но и элементом оптической связи при самообращении волнового фронта (самоОВФ) в результате вырожденного четырехволнового взаимодействия. Использование принципов самоОВФ позволяет разрабатывать адаптивные лазерные системы, осуществляющие компенсацию искажений генерируемого излучения [1,2]. Исследование генерации самоОВФ лазеров показали необходимость записи не менее двух ОВФ зеркала на динамических решетках для реализации высокоэнергетичных режимов с высокой пространственной яркостью. Это могут быть либо динамические решетки, одновременно записанные в одном активном элементе (АЭ) [1,3], либо набор решеток в различных АЭ [4]. Применение пассивного лазерного затвора (ПЛЗ) в самоОВФ лазере обеспечивает усиление обратной дифракционной связи и генерацию мощных импульсов одномодового модулированного излучения в случае записи в нем динамических голографических решеток [3–5]. В работах [5,6] была показана высокая эффективность генерации Nd:YAG-лазера с самоОВФ в активной среде и ПЛЗ. При использовании двух Nd:YAG-АЭ размерами $\varnothing 6.3 \times 100$ mm при энергии накачки $E = 63.5$ J, подводимой к лампе-вспышке каждого квантрона, длительности импульсов 200 μ s и частоте их следования 30 Hz была получена энергия отдельного импульса излучения 200 mJ и пиковая мощность 4 MW при начальном пропускании $T_0 = 58\%$ ПЛЗ на основе кристалла LiF:F₂⁻, а при применении ПЛЗ с $T_0 = 20\%$

соответственно 350 mJ и 17.5 MW. Однако длина такой системы составила около 180 cm, что существенно ограничивает его практическое применения [6].

Одним из решений настоящей задачи является повышение дифракционной эффективности динамических решеток (коэффициента усиления), что позволяет повысить пространственно-энергетические и спектральные параметры лазерной генерации при уменьшении габаритных размеров системы.

В настоящей работе мы предлагаем малогабаритную адаптивную лазерную систему с самоОВФ при многоволновом взаимодействии в активной (усиливающей) среде и ПЛЗ, в которой в процессе развития генерации происходит включение динамического петлевого резонатора.

Для исследования лазерной генерации с поперечной диодной накачкой нами был разработан и создан квантрон с лазерным кристаллом Nd:YAG (1.1 at.% Nd³⁺) размером $\varnothing 6.3 \times 100$ mm. Поперечная импульсно-периодическая накачка АЭ осуществлялась двенадцатью матрицами лазерных диодов типа СЛМ 3–2 с размерами излучающей площадки 5×25 mm и пиковой мощностью до 2 kW каждая. Матрицы располагались вдоль АЭ в четыре ряда по три матрицы в каждом ряду. Максимальная энергия накачки составила $E_p = 10.3$ J.

Оптическая схема лазера представлена на рис. 1. Лазер состоит из одного АЭ 1, двух глухих зеркал 2, шести поворотных зеркал 3 и ПЛЗ 4 на основе кристалла LiF:F₂⁻ с начальным пропусканием $T_0 = 14\%$. Наилучшие результаты были получены при характерной длине L , равной 55 cm.

Лазерная 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.

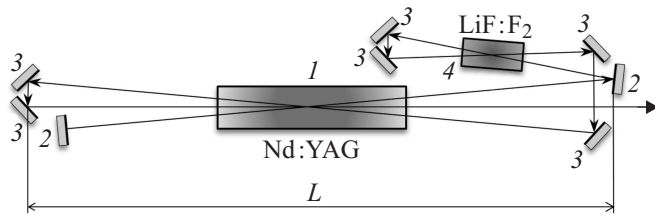


Рис. 1. Оптическая схема Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии: 1 — активный элемент, 2 — глухие зеркала, 3 — поворотные зеркала, 4 — пассивный лазерный затвор LiF:F_2^- .

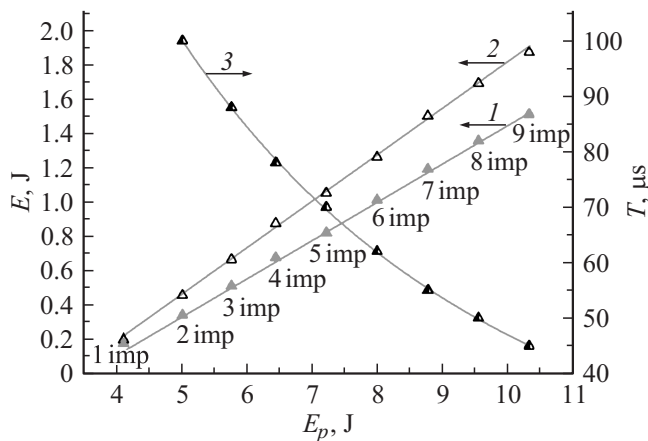


Рис. 2. Экспериментальная зависимость энергетических параметров излучения Nd:YAG-лазера от энергии импульсов накачки E_p при длительности импульса накачки $\tau = 475 \mu\text{s}$ и частоте их следования 10 Hz: 1 — энергия пучка импульсов E_s , 2 — энергия импульса свободной генерации E_0 , 3 — период следования импульсов в пучке T .

На образовавшихся решетках происходит перераспределение поля излучения и обращение его волнового фронта [6]. Записанные решетки производят селекцию пространственных, спектральных и поляризационных характеристик. ПЛЗ позволяет получить излучение в виде пучка импульсов наносекундной длительности.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости энергии пучка импульсов модулированного излучения 1 и периода их следования в пучке 3, а также энергии импульсов свободной генерации 2 от энергии импульсов накачки при частоте их следования 10 Hz. Около каждой экспериментальной точки зависимости 1 указано количество импульсов в пучке. Из рис. 2 видно, что с увеличением энергии импульсов накачки скорость роста инверсии населенностей повышается, а порог генерации остается неизменным. Это приводит к уменьшению времени развития импульса, в результате чего сокращается период следования импульсов и увеличивается их число в пучке. При этом длительность отдельного импульса в пучке 11 ns и его энергия 170 mJ оставались неизменными, как и пиковая мощность 15 MW. Это приводит к росту энергии пучка импульсов с увеличением энергии

импульсов накачки. При максимальной энергии накачки 10.3 J энергия пучка из 9 импульсов составила 1.5 J, что соответствует 83% от максимальной энергии 1.8 J импульсов свободной генерации (зависимость 1, рис. 2). Отметим, что при максимальной энергии накачки энергия излучения в плоскопараллельном резонаторе длиной 40 см с пропусканием выходного зеркала $T_0 = 54\%$ достигала 3.7 J, что соответствует оптическому КПД генерации 36%. Измерения энергетических параметров генерации лазера проводили с помощью пироэлектрического приемника Ophir PE50BF-DIV-V2 и универсальной головки Vega Ophir.

На рис. 3, а представлена осциллограмма пучка импульсов, состоящая из 9 мощных импульсов лазерной генерации. Длительность импульсов излучения (рис. 3, б), определяемая начальным пропусканием ПЛЗ и длиной резонатора. Увеличение оптической плотности затвора (уменьшение его начального пропускания) приводит к росту порогового значения инверсной населенности, которое обуславливает генерацию лазерных импульсов с большей энергией и меньшей длительностью. При этом период следования, определяемый временем достижения пороговой инверсии, возрастает. При начальном пропускании ПЛЗ $T_0 = 14\%$ длительность импульса составила 11 ns и в пределах погрешности измерения не зависела от энергии импульсов накачки. При этом все импульсы модулированного излучения имели гладкий временной профиль, что свидетельствует об одномодовом и близким к одночастотному характеру излучения [6–8]. Осциллограммы получены с помощью лавинного фотодиода Ophir FPS1 SENSOR ROHS и двулучевого осциллографа LeCroy WaveJet 352A (500 MHz), в котором первый (верхний) канал регистрировал форму импульса накачки, а второй (нижний) канал — импульс лазерного излучения.

На рис. 4, а приведено распределение интенсивности в поперечном сечении пучка. Измеренное методом ножа в двух ортогональных направлениях значение параметра качества пучка не превышало $M^2 \leq 1.2$, что оказалось меньше такового ($M^2 = 1.35$) для импульсов свободной генерации вследствие пространственной селективности LiF:F_2^- -ПЛЗ. Расходимость модулированного излучения составила 0.4 mrad, а пространственная яркость $5 \cdot 10^{14} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$. Зависимость диаметра лазерного пучка от расстояния для горизонтального направления представлена на (рис. 4, б). Профиль выходного лазерного пучка регистрировался с помощью камеры BeamGage SP620U (Ophir-Spiricon).

Для измерения ширины спектра излучения использовали эталон Фабри–Перо с интервалом свободной дисперсии $\Delta\lambda = 4.7 \text{ pm}$. Для получения интерферограммы излучение было преобразовано во вторую гармонику. На рис. 5 представлена интерферограмма, полученная в режиме одиночного импульса при частоте их следования 30 Hz. В этом режиме генерации спектр излучения характеризует интерферограмма в виде серии

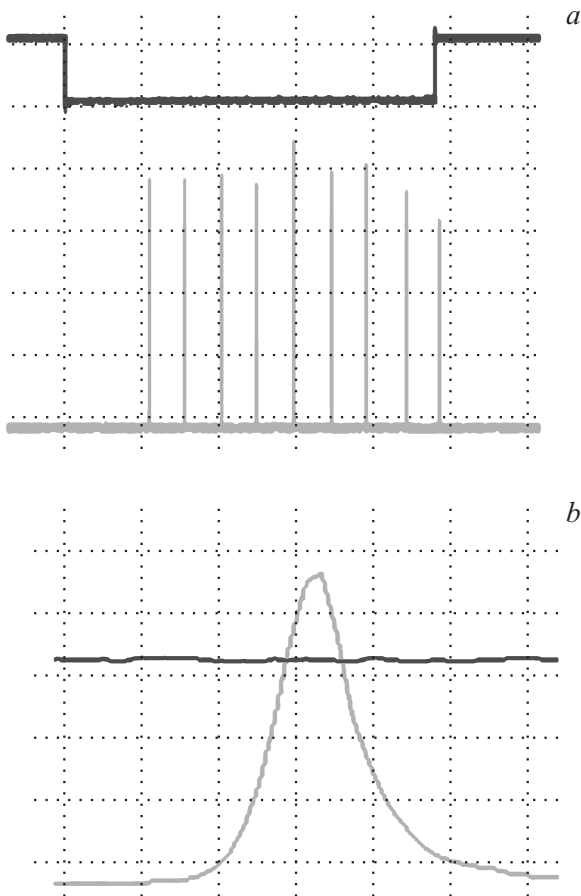


Рис. 3. Осциллограмма пуга импульсов (а), профиль импульса пуга (b).

узких эквидистантных колец интерференции, которая указывает на то, что генерация осуществляется на одной продольной моде с шириной полосы $\Delta\nu = 300$ MHz ($\Delta\lambda = 0.28$ nm).

Исследование поляризации излучения показало, что оно является вертикально поляризованным со степенью поляризации более 0.9 во всем интервале длительности импульсов накачки 60–475 μ s. В указанном ранее плоскопараллельном резонаторе излучение было неполяризованным. В режиме свободной генерации при малых длительностях импульсов накачки (60–100 μ s) излучение имело вертикальную поляризацию со степенью не менее 0.9. При увеличении длительности импульса накачки наблюдалось уменьшение степени поляризации. Так, при длительности импульсов накачки 475 μ s излучение становится неполяризованным. Наибольшее уменьшение степени поляризации наблюдалось при увеличении длительности импульса накачки до величины, превышающей время жизни возбужденного состояния ионов Nd^{3+} .

Следует отметить, что смещение ПЛЗ из среднего положения (рис. 1) вдоль оптической оси на 2–3 см приводило к значительному ухудшению пространственно-энергетических характеристик. Энергия импульсов и

пиковая мощность уменьшались от 170 mJ и 15 MW до 90 mJ и 8 MW соответственно. Полученные результаты показывают, что уменьшение длины взаимодействия в ПЛЗ снижает положительную обратную связь в само-ОВФ резонаторе и приводит к ухудшению энергетических и временных параметров генерации [6].

Таким образом, исследованный малогабаритный Nd:YAG-лазер с динамическим петлевым резонатором, пассивным лазерным затвором на фототропном кри-

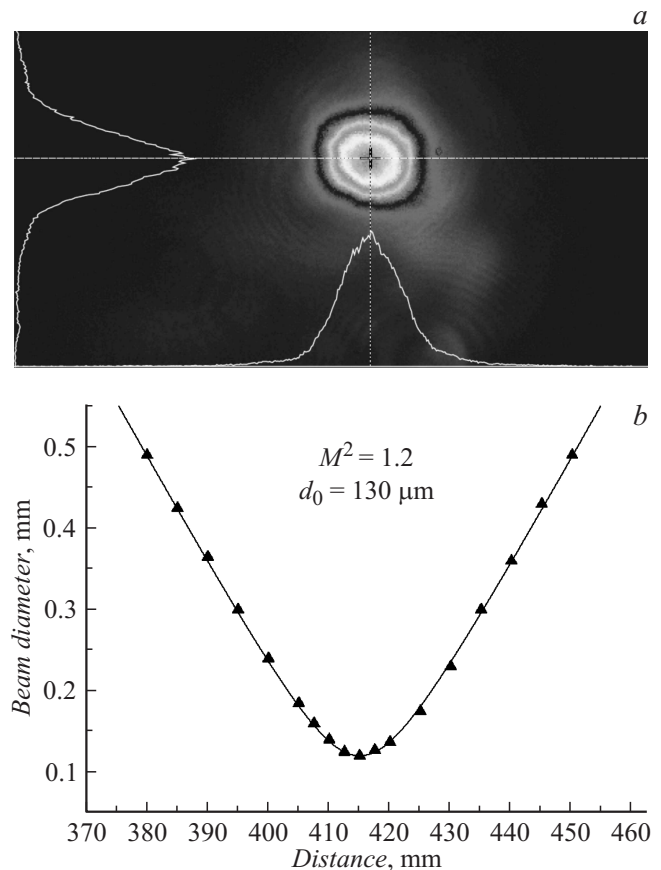


Рис. 4. Профиль пучка с распределением интенсивности в поперечном сечении (а), зависимость диаметра пучка за фокусирующей линзой от расстояния (параметр M^2) (b).

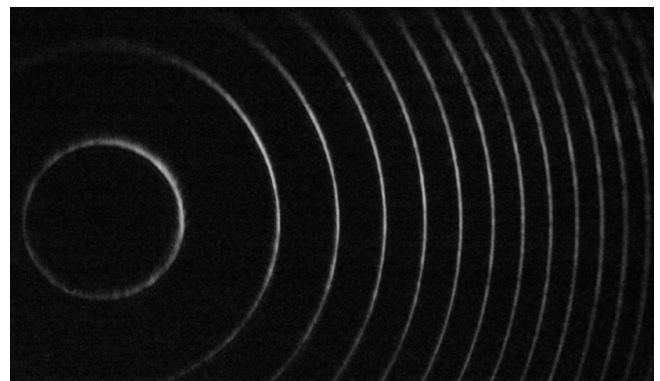


Рис. 5. Интерферограмма отдельного импульса (частота следования 30 Hz).

сталле LiF:F_2^- с начальным пропусканием $T_0 = 14\%$ и самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии позволил получить мощную, одночастотную генерацию с качеством излучения, близким к дифракционному пределу. Реализация таких параметров стала возможной благодаря применению многопетлевой схемы резонатора для создания ОВФ зеркал в среде активного элемента и пассивного лазерного затвора с более высокой дифракционной эффективностью, что позволило существенно повысить энергетическую и пространственную эффективность самообращения волнового фронта Nd:YAG-лазера с ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- .

Список литературы

- [1] Лебедев В.Ф., Погода А.П., Сметанин С.Н. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 107–111.
- [2] Antipov O.L., Chausov D.V., Kuzhelev A.S. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 2001. Vol. 37. N 5. P. 716–724.
- [3] Fedin A.V., Basiev T.T., Gavrilov A.V. et al. // Proceed. SPIE. 2000. Vol. 4353. P. 214–220.
- [4] Fedin A.V., Kyalbieva S.A. et al. // Proceed. SPIE. 2001. Vol. 4644. P. 312–318.
- [5] Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T. et al. // Laser Phys. 1999. Vol. 9. N 2. P. 433–436.
- [6] Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В. и др. // Квант. электрон. 1999. Т. 27. Вып. 5. С. 145–148.
- [7] Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Милов С.Б., Федин А.В., Конюшкин В.А. // Квант. электрон. 1991. Т. 18. Вып. 2. С. 223–225.
- [8] Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Федин А.В. // Квант. электрон. 1993. Т. 20. Вып. 6. С. 594–596.