

ЛАЗЕРЫ

Малогабаритный Nd:YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и самонакачивающимся фазово-сопряженным многопетлевым резонатором

Г.В.Бурковский, А.В.Федин, А.П.Погода, А.С.Борейшо

Представлен мощный малогабаритный импульсно-периодический Nd:YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором. Получены цуги импульсов с энергией 2.55 Дж и параметром качества излучения $M^2 \leq 1.2$ при расходимости 0.35 мрад и пространственной яркости 7×10^{14} Вт·см⁻²·ср⁻¹. Пиковая мощность одночастотных импульсов превысила 21 МВт при их энергии 230 мДж. Ширина полосы генерации составила 300 МГц.

Ключевые слова: самообращение волнового фронта, решетки коэффициента усиления, пассивная модуляция добротности.

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 появился интерес к лазерам с самонакачивающимся фазово-сопряженным петлевым резонатором, 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].

Исследования генерации самоОВФ-лазеров показали необходимость записи не менее двух ОВФ-зеркал 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 однододового 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 АЭ Nd:YAG размерами $\varnothing 6.3 \times 100$ мм, энергии накачки $E_p = 63.5$ Дж, подводимой к лампе-вспышке каждого квантрон-

на, при длительности импульсов 200 мкс и частоте их следования 30 Гц была получена энергия отдельного импульса излучения 200 мДж и пиковая мощность 4 МВт при начальном пропускании ПЛЗ на основе кристалла LiF:F₂ $T_0 = 58\%$, а при применении ПЛЗ с $T_0 = 20\%$ – 350 мДж и 17.5 МВт соответственно. Однако длина такой системы составила около 180 см, что существенно ограничивает ее практическое применение.

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

В настоящей работе представлена малогабаритная лазерная система 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 из Nd:YAG (с концентрацией Nd³⁺ 0.9 ат.%) размером $\varnothing 8 \times 180$ мм. Поперечная импульсно-периодическая накачка АЭ осуществлялась 16 матрицами лазерных диодов типа СЛМ 3-2 с пиковой мощностью до 2 кВт каждая. Матрицы располагались вдоль АЭ в четыре ряда по 4 матрицы в каждом ряду. Максимальная суммарная энергия накачки составила $E_p = 14.5$ Дж.

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 $T_0 = 14\%$ (длина ПЛЗ составляет 51.5 мм). Наилучшие результаты были получены при характерной длине $L = 60$ см (рис. 1).

Лазерная генерация начинается с шумового излучения в АЭ. По мере развития генерации, в АЭ внутрирезонаторными пересекающимися пучками записываются пропускающие решетки коэффициента усиления и решетки показателя преломления в ПЛЗ, образующие самоподстраивающийся адаптивный резонатор лазера. На об-

Г.В.Бурковский, А.В.Федин, А.П.Погода, А.С.Борейшо. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Россия, 190005 С.-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1; ООО «НПП «Лазерные системы», Россия, 198515 С.-Петербург, п. Стрельна, ул. Связи, 34, лит. А, ОЭЗ «Нойдорф»; e-mail: a_fedin@list.ru, pogoda@lsystems.ru, boreysho@lsystems.ru

Поступила в редакцию 7 июня 2016 г., после доработки 23 сентября 2016 г.

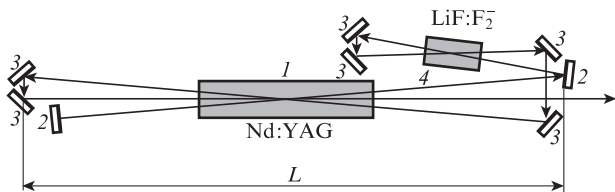


Рис.1. Оптическая схема Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии: 1 – АЭ; 2 – глухие зеркала; 3 – поворотные зеркала; 4 – пассивный лазерный затвор на основе кристалла LiF:F₂⁻.

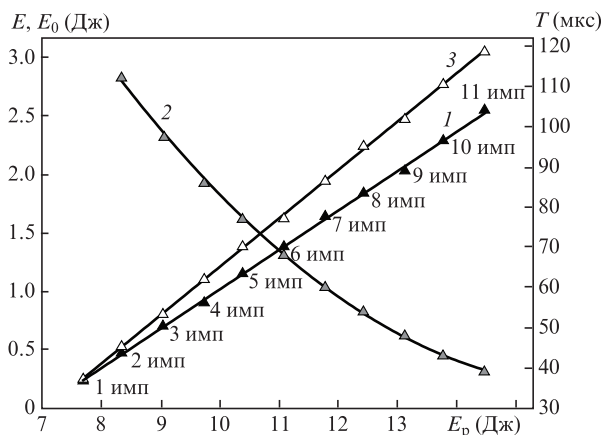


Рис.2. Экспериментальные зависимости энергетических параметров излучения Nd:YAG-лазера от энергии импульсов накачки E_p при длительности импульса накачки $\tau = 475$ мкс и частоте их следования 10 Гц: энергия цуга импульсов E (1); период следования импульсов T в цуге (2) и энергия импульса свободной генерации E_0 (3).

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

На рис.2 показаны экспериментально полученные зависимости энергии цуга импульсов модулированного излучения, периода их следования в цуге, а также импульсов свободной генерации от энергии импульсов накачки при частоте их следования 10 Гц. Около каждой экспериментальной точки зависимости 1 указано количество импульсов в цуге. Из рис.2 видно, что с увеличением энергии импульсов накачки увеличивается число импульсов в цуге и сокращается период их следования. При этом длительность отдельного импульса в цуге (11 нс) и их энергия (230 мДж) оставались неизменными, как и пиковая мощность (21 МВт). Это приводит к росту энергии цуга импульсов с увеличением энергии импульсов накачки. При максимальной энергии накачки 14.5 Дж энергия цуга из 11 импульсов составила 2.55 Дж (кривая 1, рис.2), что соответствует 83% от максимальной энергии импульсов свободной генерации 3.05 Дж, полученной также при максимальной энергии накачки в этом лазере без ПЛЗ. Отметим, что при максимальной энергии накачки энергия излучения в плоскопараллельном резонаторе длиной 40 см с пропусканием выходного зеркала $T_0 = 54\%$ достигала 5.95 Дж, что соответствует оптической эффективности генерации 41%. Измерения энергетических параметров генерации лазера проводились с помощью пиро-

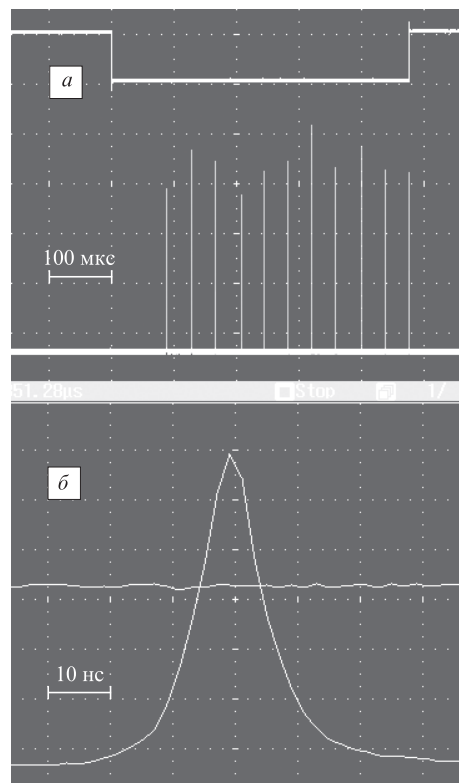


Рис.3. Осциллограммы цуга импульсов (а) и отдельного импульса в цуге (б).

электрического приемника Ophir PE50BF-DIV-V2 и универсальной головки Vega Ophir.

Осциллограмма цуга импульсов, состоящая из 11 мощных импульсов лазерной генерации, и временной профиль отдельного импульса в цуге показаны на рис.3. Видно, что импульсы модулированного излучения имеют гладкий временной профиль, что свидетельствует об одномодовом и близком к одночастотному характере излучения [6–8]. Осциллограммы получены с помощью лавинного фотодиода Ophir FPS1 SENSOR ROHS и двулучевого осциллографа LeCroy WaveJet 352A (500 МГц), в котором первый (верхний) канал регистрировал форму импульса накачки, а второй (нижний) – импульс лазерного излучения.

На рис.4,а приведен поперечный профиль лазерного пучка. Видно, что распределение интенсивности в поперечном сечении пучка близко к гауссову. Оценку параметра качества излучения проводили по искусственно созданной перетяжке пучка с помощью положительной линзы с фокусным расстоянием 41 см на основании измерений диаметра пучка методом движущегося резкого края (нож Фуко) по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности в ее распределении по поперечному сечению. Установлено, что определенный в двух ортогональных направлениях параметр качества пучка M^2 не превышал 1.2, что оказалось меньше, чем для импульсов свободной генерации вследствие пространственной селективности ПЛЗ на основе кристалла LiF:F₂⁻ ($M^2 = 1.35$). Зависимость диаметра лазерного пучка от расстояния до линзы для горизонтального направления представлена на рис.4,б. Диаметр пучка на выходе лазера, измеренный по уровню $1/e^2$, равнялся 5.4 мм. Расходимость модулированного излучения составила 0.35 мрад, а пространственная яркость –

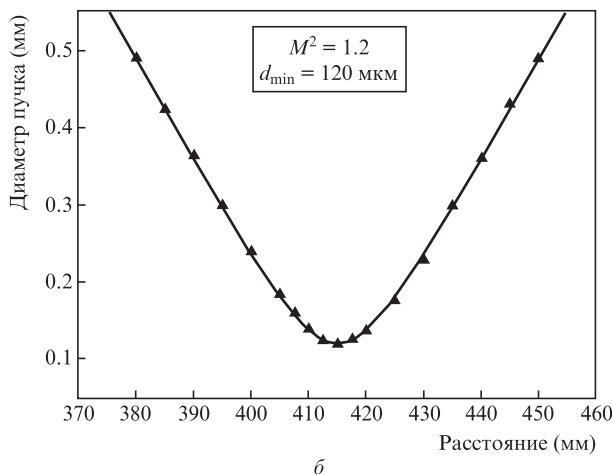
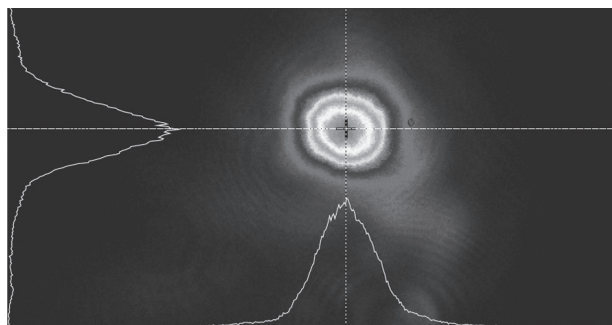


Рис.4. Профиль пучка с распределением интенсивности в поперечном сечении (а) и зависимость диаметра пучка от расстояния до линзы с фокусным расстоянием 41 см (б).

$7 \times 10^{14} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$. Профиль выходного лазерного пучка регистрировался с помощью камеры BeamGage SP620U (Ophir-Spiricon).

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

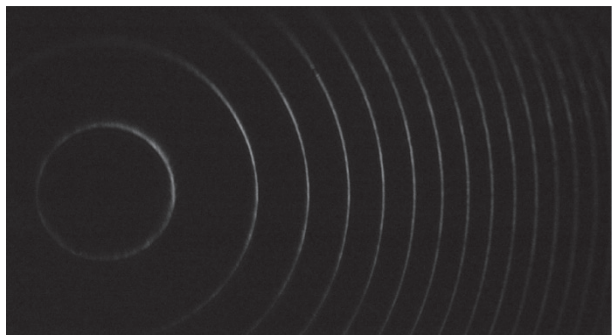


Рис.5. Интерферограмма отдельного импульса (частота следования импульсов 30 Гц).

имеет вид серии узких, эквидистантных колец интерференции. Это свидетельствует о том, что генерация осуществляется на одной продольной моде с шириной полосы $\Delta\nu = 300 \text{ МГц}$ ($\Delta\lambda = 0.28 \text{ нм}$).

Исследования показали, что излучение является вертикально поляризованным со степенью поляризации более 0.9. В плоскопараллельном резонаторе, о котором упоминалось ранее, излучение было неполяризованным. В режиме свободной генерации при малых длительностях импульсов накачки (60–100 нс) излучение имело вертикальную поляризацию со степенью не менее 0.9. При увеличении длительности импульса накачки степень поляризации уменьшалась, а при длительности импульсов накачки 475 нс излучение становилось неполяризованным. Наименьшая степень поляризации наблюдалась при превышении длительностью импульса накачки времени жизни 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 с 230 мДж и 21 МВт до 120 мДж и 11 МВт соответственно. Полученные результаты показывают, что уменьшение длины взаимодействия в ПЛЗ снижает положительную обратную связь в самоОВФ-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 кристалле LiF:F_2^- с начальным пропусканием $T_0 = 14\%$ и самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии позволяет получать 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 АЭ и пассивного лазерного затвора с более высокой дифракционной эффективностью, что позволяет получать высокие энергетические и пространственные параметры самоОВФ-лазера на основе Nd:YAG с ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- .

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

1. Лебедев В.Ф., Погода А.П., Сметанин С.Н. и др. *ЖТФ*, **12**, 107 (2014).
2. Antipov O.L., Chaouov D.V., Kuzhelev A.S., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 716 (2001).
3. Fedin A.V., Basiev T.T., Gavrilov A.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4353**, 214 (2000).
4. Fedin A.V., Kyalbieva S.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 312 (2001).
5. Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T. et al. *Laser Phys.*, **9**, 433 (1999).
6. Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **27**, 145 (1999).
7. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Милов С.Б., Федин А.В., Конюшкин В.А. *Квантовая электроника*, **18**, 223 (1991).
8. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **20**, 594 (1993).