

Композитные, полностью поликристаллические керамические Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазеры с пассивной модуляцией добротности и высокой пиковой мощностью*

О.Санду, Г.Саламу, Н.Павел, Т.Даскалу, Д.Чучумишев, А.Гайдарджиев, И.Бучаров

Разработаны композитные Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазеры с пассивной модуляцией добротности и высокой пиковой мощностью, состоящие из полностью поликристаллических связанных Nd:YAG- и Cr⁴⁺:YAG-керамик. Обсуждаются два применения таких лазеров. Создан лазер на легированной до 1.1 ат. % Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-керамике, квазинепрерывно накачиваемый излучением лазерного диода в герцевом диапазоне частот следования с энергией лазерных импульсов 2.5 мДж и пиковой мощностью 1.9 МВт. При удвоении частоты выходного лазерного излучения в нелинейном кристалле LiB₃O₅ при комнатной температуре достигнута энергия импульса 0.36 мДж и пиковая мощность 0.3 МВт в зеленой области спектра на длине волны 532 нм при эффективности преобразования 27%. Лазер на сильно допированной (1.5 ат. %) Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-керамике успешно работал в диапазоне частот следования 50–500 Гц, генерируя импульсы с энергией от 0.8 до 1.0 мДж и пиковой мощностью ~1 МВт. В результате усиления лазерного излучения в системе задающий генератор–усилитель мощности генерировались лазерные импульсы с энергией 11 мДж при частоте следования 250 Гц.

Ключевые слова: неодимовые лазеры, пассивная модуляция добротности, керамические лазеры, диодная накачка.

1. Введение

Развитие технологии производства керамик позволяет в настоящее время получать поликристаллические кубические лазерные среды очень хорошего оптического качества. Использование таких лазерных сред имеет ряд ключевых преимуществ. Это высокая концентрация допирования (особенно для ионов Nd³⁺ в алюмо-иттриевом гранате (YAG), простота изготовления керамических образцов большого размера, недорогое массовое производство. Прозрачный поликристаллический образец Nd:YAG-керамики с оптическими характеристиками, сходными с характеристиками монокристалла, был впервые произведен методом твердотельной реакции; в 1995 г. на этой керамике (с легированием 1.1 ат. %) была получена первая лазерная генерация на длине волны 1.064 мкм [1, 2]. Позднее модифицированный метод осаждения карбомида позволил изготовить крупные мелкозернистые керамические лазерные стержни из Nd:YAG, использованные в 2002 г. в непрерывном керамическом лазере мощностью 1.46 кВт с эффективностью по свету (относительно излучения накачки) 42% [3]. Кроме того, керамические технологии позволяют реализовать многослойные лазерные компоненты. Непрерывная выходная мощность в 144 Вт с эффективностью по свету 64% была достигнута для

композитного керамического Nd:YAG-лазера с легированной сердцевиной в 2007 г. [4]. Недавно с использованием системы задающий генератор – усилитель мощности (МОРА) на основе керамических Nd:YAG-стержней с квазинепрерывной накачкой была получена средняя мощность до 1020 Вт с эффективностью по свету ~30% [5].

Керамические технологии позволили также создать для насыщающегося поглотителя новый материал Cr⁴⁺:YAG, с использованием которого в режиме пассивной модуляции добротности получена генерация в полностью поликристаллическом Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазере, изготовленном из дискретных элементов [6], а также в композитных Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG- [7, 8] и Yb:YAG/Cr, Yb:YAG-лазерах [9]. В этих работах накачка осуществлялась излучением маломощного (несколько ватт) непрерывного диодного лазера, и поэтому были получены лазерные импульсы с малой энергией ($E_p = 172$ мкДж). Их длительность t_p составляла 237 пс (пиковая мощность 0.72 МВт), а частота следования была равна 3.5 кГц [8]. Кроме того, частотой следования импульсов лазера с пассивной модуляцией добротности можно управлять с помощью квазинепрерывной диодной накачки. Пользуясь этим методом и следуя некоторым правилам оптимизации [10, 11], были реализованы композитные, полностью поликристаллические керамические Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазеры с пассивной модуляцией добротности, энергией импульса до 2.4 мДж и пиковой мощностью 2.8 МВт [12]. Частота следования лазерных импульсов регулировалась от нескольких герц до 100 Гц, а выходной пучок состоял из двух или трех независимых пучков. Эти монокристаллические лазеры, показанные на рис. 1, рассматриваются как очень хорошая альтернатива свече зажигания двигателей внутреннего сгорания.

В настоящей работе мы сообщаем о лазерных характеристиках композитных, полностью поликристаллических керамических Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазеров с пассивной модуляцией добротности при различных уровнях

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

O.Sandu, G.Salamu, N.Pavel, T.Dascalu. Laboratory of Solid-State Quantum Electronics, National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest R-077125, Romania; e-mail: oana.sandu@infpr.ro, gabriela.salamu@infpr.ro, nicolaie.pavel@infpr.ro, traian.dascalu@infpr.ro
D.Chuchumishev, A.Gaydardzhiev, I.Buchvarov. Department of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., BG-1164, Sofia, Bulgaria; e-mail: danail.ch@gmail.com, a.gaydardzhiev@phys.uni-sofia.bg, ivan.buchvarov@phys.uni-sofia.bg

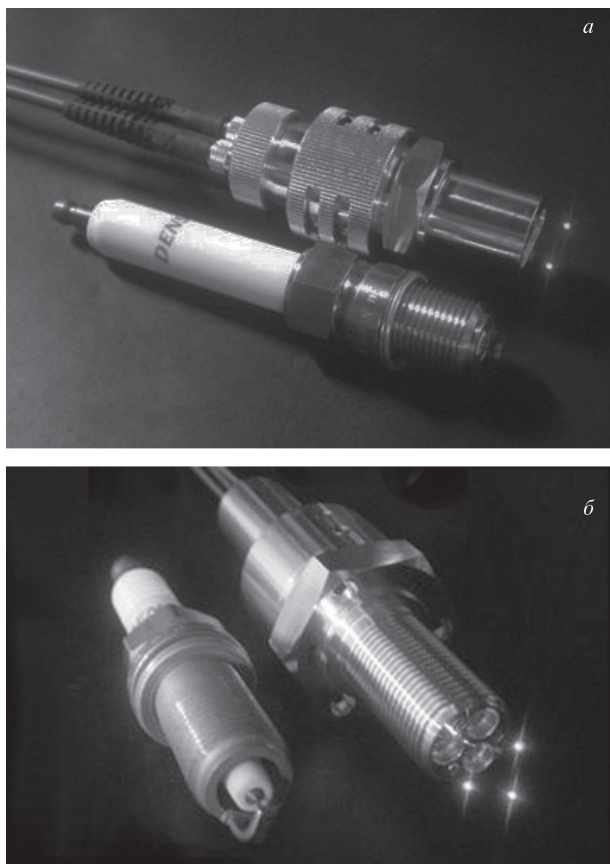


Рис.1. Лазеры из композитной Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-керамики с двух- (а) и трехпучковым (б) выходом излучения. Классическая свеча зажигания показана для сравнения, иллюстрируется также лазерный пробой воздуха. (Приведено с согласия Т.Тайра из Института молекулярной науки, Окадзаки, Япония).

допирования ионами неодима и акцентируем внимание на двух случаях использования такого лазерного устройства. Во-первых, для генерации лазерных импульсов с высокой пиковой мощностью в зеленой части видимого спектра ($\lambda = 532$ нм) за счет однопроходного удвоения частоты основного лазерного излучения ($\lambda = 1.064$ мкм) с дополнительным резонатором. Во-вторых, в качестве задающего генератора в МОР-системе, дающей на выходе усиление энергии импульса до 11 мДж (пиковая мощность ~ 12.8 МВт) при большой (250 Гц) частоте их следования.

2. Композитный керамический Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазер для генерации лазерных импульсов высокой пиковой мощности на $\lambda = 532$ нм

Схема экспериментальной установки представлена на рис.2. Для накачки мы использовали диодный лазер JOLD-540-QAFN-6A (Jenoptik, Германия) с выводом излучения ($\lambda_p = 807$ нм) с помощью оптического волокна (диаметр 1.0 мм, числовая апертура NA = 0.39). Частота следования импульсов накачки и их длительность составляли 2 Гц и 250 мкс. Пара ахроматических линз была использована для построения изображения торца волокна в пятно радиусом 0.65 мм на Nd:YAG. Композитная, полностью поликристаллическая среда из Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-керамики (Baikowski Japan Co., Ltd) состоит из

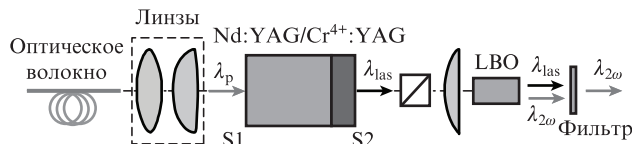


Рис.2. Схема композитного, полностью поликристаллического керамического Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности.

Nd:YAG-керамики (1.1 ат. %) толщиной 7.2 мм, соединенной с Cr⁴⁺:YAG-керамикой (SA) с начальным пропусканием $T_0 = 0.30$. Общая длина керамической среды 9.5 мм. Примерно 95% излучения накачки поглощается в Nd:YAG-керамике, что предотвращает просветление Cr⁴⁺:YAG [13]. Поверхность S1 Nd:YAG-керамики действует как заднее зеркало лазера, поэтому на нее было нанесено покрытие, высокоотражающее ($R > 99.8\%$) на λ_{las} и хорошо пропускающее ($T > 98\%$) на λ_p . Выходным зеркалом служила поверхность S2 Cr⁴⁺:YAG-керамики, на которую было нанесено покрытие с пропусканием 50% на λ_{las} .

Керамический Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазер генерировал импульсы с энергией $E = 2.5$ мДж и длительностью 1.3 нс (FWHM), что соответствует пиковой мощности импульса 1.9 МВт. Энергия импульса накачки E_p была равна 32 мДж. Параметр M^2 лазерного пучка был определен методом дифракции на краю ножа и составил 3.15. Кроме того, поляризационное отношение для лазерного пучка (определенное с помощью поляризатора с отношением коэффициентов экстинкции 100000:1) составляло $\sim 95\%$.

Для анализа лазерных характеристик мы использовали численную модель, в которой скоростное уравнение для режима пассивной модуляции добротности [14, 15] учитывает влияние размера пятна излучения накачки [12, 16]. Распределение интенсивности в пучке накачки полагалось столбобразным с радиусом w_p , в лазерном пучке – гауссовым с радиусом w_g . Для лучшего понимания напомним, что энергия лазерного импульса дается общим соотношением

$$E = \frac{h\nu A_g}{2\gamma_g \sigma_g} \ln R \ln \left(\frac{n_{gf}}{n_{gi}} \right), \tag{1}$$

где $h\nu$ – энергия фотона на λ_{las} ; σ_g – сечение вынужденного излучения ионов Nd; γ_g – фактор редуцирования инверсии; A_g – эффективная площадь лазерного пучка в Nd:YAG-керамике; R – коэффициент отражения выходного зеркала. Начальная инверсия населенности (т.е. разность концентраций ионов неодима на верхнем и нижнем рабочих уровнях с учетом их статвесов) есть

$$n_{gi} = \frac{-\ln R + L - \ln T_0^2}{2\sigma_g l_g [1 - \exp(-2a^2)]}, \tag{2}$$

где $a = w_p/w_g$; L – потери за полный обход резонатора без потерь на выходном зеркале; l_g – толщина Nd:YAG-керамики. Конечная инверсия населенности n_{gf} связана с n_{gi} уравнением

$$\left(1 - \frac{n_{gf}}{n_{gi}} \right) + \left[1 + \frac{(1 - \delta) \ln T_0^2}{\beta} \right] \ln \left(\frac{n_{gf}}{n_{gi}} \right) + \frac{1}{\alpha} \frac{(1 - \delta) \ln T_0^2}{\beta} \left[1 - \left(\frac{n_{gf}}{n_{gi}} \right)^\alpha \right] = 0. \tag{3}$$

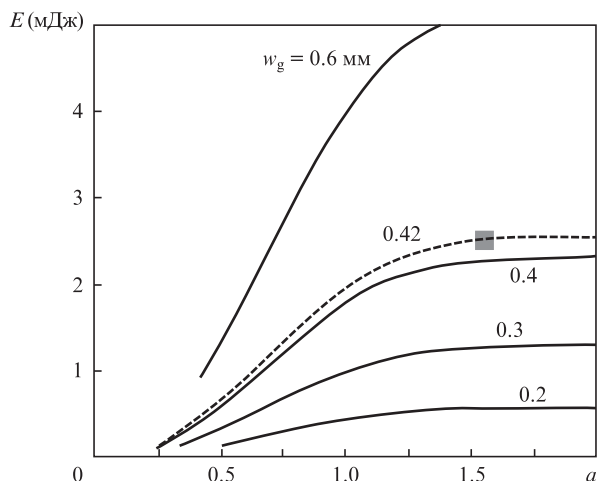


Рис.3. Зависимости энергии импульса лазерного излучения на $\lambda_{\text{las}} = 1.064$ мкм от отношения $a = w_p/w_g$; квадрат – результат эксперимента, кривые – результаты моделирования.

Здесь $\delta = \sigma_{\text{ESA}}/\sigma_{\text{SA}}$; σ_{SA} и σ_{ESA} – сечения поглощения ионов Cr⁴⁺ в основном и возбужденном состояниях; $\beta = (-\ln R + L - \ln T_0^2)/[1 - \exp(-2a^2)]$; $\alpha = (\gamma_{\text{SA}}\sigma_{\text{SA}})/(\gamma_{\text{g}}\sigma_{\text{g}})(A_{\text{g}}/A_{\text{SA}})$; γ_{SA} – фактор редуцирования инверсии для Cr⁴⁺:YAG-керамики; A_{SA} – эффективная площадь лазерного пучка в Cr⁴⁺:YAG-керамике. Кроме того, мы оценили фокусное расстояние тепловой линзы, индуцированной в Nd:YAG-керамике оптической накачкой, в соответствии с приведенной в [17] моделью.

Зависимости энергии лазерного импульса E от отношения $a = w_p/w_g$ представлены на рис.3. Спектроскопические параметры Nd:YAG- и Cr⁴⁺:YAG-керамик, использованные при численном моделировании, взяты из [12], потери на полный обход резонатора считались равными 0.06 (0.01 для Nd:YAG и 0.05 для Cr⁴⁺:YAG). Используя соотношение $E_p = h\nu_p V_p n_{\text{gi}}$ ($h\nu_p$ – энергия фотона накачки, V_p – накачиваемый объем Nd:YAG-керамики), мы рассчитали энергию импульса накачки (рис.4).

Если лазерный резонатор устроен так, чтобы поддерживать радиус лазерного пучка w_g постоянным, то малое значение a (т. е. малое w_p) обеспечит наличие лазерной генерации при пониженных энергиях накачки, однако в этом случае и энергия лазерного импульса будет низкой. При увеличении размера пятна пучка накачки w_p увеличивается как E , так и E_p . Оказывается, должно существовать значение, сверх которого любое увеличение w_p не будет приводить к увеличению E , хотя E_p будет расти. В этом случае только центральная часть зоны с инверсной населенностью взаимодействует с лазерной модой, тогда как инверсия в наружной части зоны уменьшается за счет спонтанного излучения, что приводит к нагреву лазерной среды [16]. Наши расчеты показали, что фокусное расстояние линзы, теплоиндуцированной в Nd:YAG-керамике с легированием 1.1 ат.%, равно ~ 90 м, а соответствующее значение w_g составило ~ 0.42 мм по результатам расчета резонатора с использованием ABCD-матрицы. Согласие результатов моделирования и экспериментов на рис.3 и 4 является хорошим, особенно если учесть неопределенность в оценке параметров тепловой линзы в Nd:YAG-керамике, а также других физических или спектроскопических параметров Nd:YAG- и Cr⁴⁺:YAG-керамик.

Мы удвоили частоту выходного излучения лазера, используя однопроходную генерацию второй гармоники в

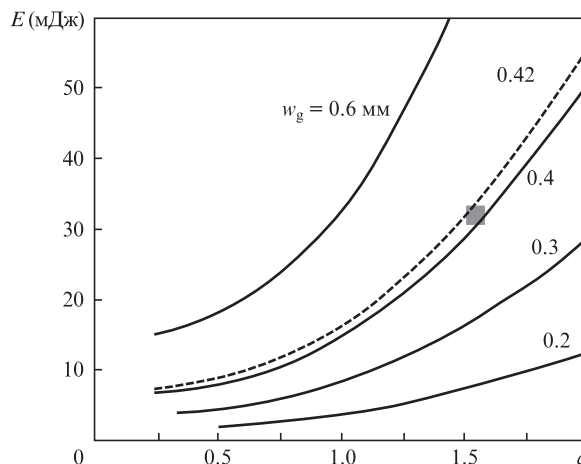


Рис.4. Зависимости энергии импульса накачки от $a = w_p/w_g$; квадрат – результат эксперимента, кривые – результаты моделирования.

нелинейном кристалле LBO толщиной 10 мм в режиме фазового синхронизма I типа ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 11.4^\circ$) при комнатной температуре (25°C). Поверхности кристалла LBO были просветлены как для λ_{las} , так и для $\lambda_{2\omega}$. Лазерный пучок фокусировался в нелинейный кристалл LBO линзами с разными фокусными расстояниями (от 100 до 150 мм), а фильтр использовался для отделения зеленого света от преобразованного основного излучения. Энергия импульса линейно поляризованного основного излучения ограничивалась величиной 1.3 мДж для того, чтобы избежать повреждения кристалла LBO. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании линзы с фокусным расстоянием 125 мм, фокусирующей лазерный пучок с $\lambda_{\text{las}} = 1.064$ мкм в LBO до радиуса ~ 0.74 мм. Энергия импульса излучения второй гармоники составляла 0.36 мДж, что соответствует эффективности преобразования от ИК к зеленому излучению 27%. Эта эффективность близка к результатам, полученным при однопроходном удвоении частоты излучения Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-микрочип-лазера в нелинейном кристалле ВВО [18]. Однако энергия «зеленого» импульса, полученная в нашей работе, была гораздо выше, а пиковая мощность импульса достигала 0.3 МВт. Сочетание микрочип-лазера, генерирующего импульсы с высокими энергией и пиковой мощностью, с нелинейным материалом для генерации второй гармоники открывает простой способ создания импульсного видимого лазерного излучения мегаваттного уровня мощности [19]. Более того, возможна и эффективная генерация лазерного излучения в УФ области спектра.

3. Композитный керамический Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-лазер как задающий генератор в МОР-системе

Лазерный источник с высокой средней мощностью и большой энергией импульса в среднем ИК диапазоне (2.5 – 4.0 мкм) представляет интерес для различных научных и промышленных приложений, таких как дистанционное зондирование и молекулярная спектроскопия, а также для медицинских приложений, в которых используется эффективное поглощение воды в окрестности 3 мкм. Такой лазер может быть реализован за счет применения оптического параметрического генератора на основе пе-

риодически-поляризованного стехиометрического LiTaO_3 [20]. Источник накачки для такого параметрического устройства должен генерировать лазерные импульсы с большой энергией (свыше 10 мДж), малой длительностью (менее 1 нс) и высокой частотой следования (несколько сотен герц) на $\lambda_{\text{las}} = 1.064$ мкм. Схема такого источника накачки (рис.5) состоит из двухкаскадного двухпроходного усилителя из стержней кристалла Nd:YAG . Задающим генератором для МОР-системы является композитный, полностью поликристаллический керамический $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -лазер с высоким уровнем легирования ионами Nd^{3+} и пассивной модуляцией добротности.

С целью уменьшения длительности импульсов генератора мы использовали композитную, полностью поликристаллическую $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -среду с увеличенным до 1.5 ат. % уровнем допирования. Это позволило нам уменьшить толщину Nd:YAG -керамики до 5.2 мм, сохранив высокую (~95%) эффективность поглощения пучка накачки. Насыщающийся поглотитель из $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -керамики имеет те же характеристики, что и $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -керамика, описанная в разд.2. Наконец, толщина $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -среды составляла 7.5 мм, что является обязательным для получения лазерных импульсов длительностью менее 1 нс. Композитная среда закреплялась в медном держателе при температуре 20 °С. В качестве источника накачки мы использовали диодный лазер (Jenoptik, Германия), связанный волокном (диаметр 600 мкм, $\text{NA} = 0.22$) с оптической системой, отображающей торец волокна в Nd:YAG -керамику. Длительность импульса накачки составляла 250 мкс, а частота следования варьировалась от 50 до 500 Гц.

При частоте следования 50 Гц $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -лазер генерировал импульсы с энергией $E = 0.78$ мДж, длительностью 860 пс и соответствующей пиковой мощностью ~0.9 МВт; качество пучка было хорошим ($M^2 = 1.32$).

Увеличивая частоту следования импульсов накачки до 500 Гц при сохранении их длительности, мы смогли увеличить энергию лазерных импульсов (рис.6). Лазерные импульсы с энергией до 1.05 мДж были получены при частоте следования 500 Гц, при этом энергия увеличилась на ~35% по сравнению с энергией, измеренной при частоте 50 Гц. Конечно, это потребовало также роста энергии импульса накачки. Минимальное значение E_p при частоте

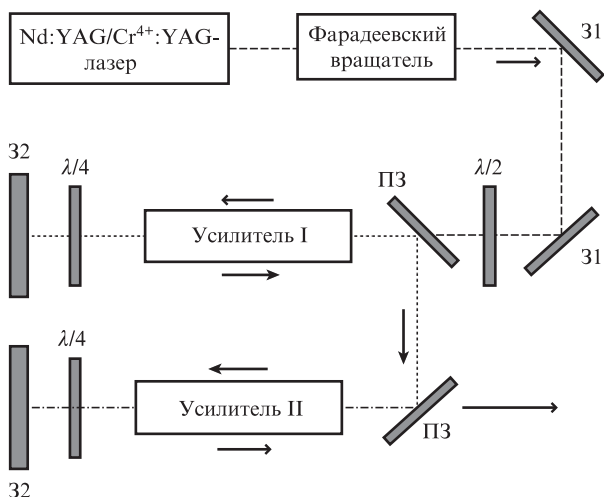


Рис.5. Схема двухкаскадного двухпроходного усилителя (ПЗ – поляризационное зеркало).

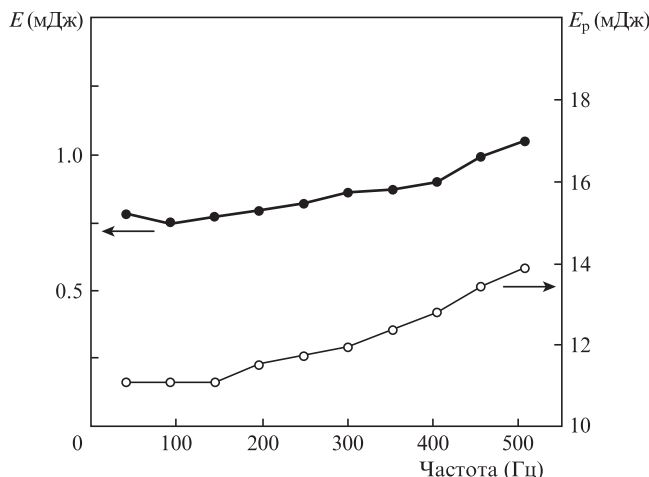


Рис.6. Зависимости энергий лазерного импульса и импульса накачки от частоты следования импульсов накачки.

те 500 Гц составило 13.8 мДж (т.е. на ~25% больше, чем при частоте 50 Гц), а параметр M^2 лазерного пучка был равен 3.15, что указывает на снижение качества пучка при высокой частоте следования. Такое поведение (увеличение энергии E лазерных импульсов при высокой частоте следования) наблюдается также в $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -лазерах с пассивной модуляцией добротности, состоящих из дискретных монокристаллических [21, 22] или композитных керамических [12] компонентов. Основной причиной такого поведения является снижение эффективного сечения вынужденного излучения ионов Nd^{3+} в Nd:YAG [23] из-за увеличения температуры среды вследствие тепловых эффектов, индуцированных оптической накачкой.

Лазерный пучок, выходящий из композитной $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -среды, усиливался затем при использовании МОР-конфигурации (рис.5). Каждый стержень из Nd:YAG (монокристалл диаметром 3 мм и длиной 90 мм) имел уровень допирования ионами неодима 0.6 ат. % и накачивался сбоку излучением диодных лазеров. При фиксированной частоте следования ~250 Гц энергия лазерного импульса, измеренная за вращателем Фарадея, составляла 0.54 мДж. Двухпроходное усиление в первом каскаде усилителя увеличило эту энергию до 3.6 мДж, а конечная энергия лазерного импульса после второго усилителя составляла 11.0 мДж (т.е. пиковая мощность была равна ~12.8 МВт). Параметры лазерных импульсов, полученных в системе МОР, соответствуют нашей первоначальной цели. Улучшить их можно за счет увеличения эффективности поглощения излучения накачки в Nd:YAG -стержнях системы МОР в результате оптимизации пространственного перекрытия входного пучка и области усиления в каждом Nd:YAG -стержне или за счет построения каскада предварительного усилителя.

4. Выводы

Мы сообщили о выходных характеристиках композитных, полностью поликристаллических керамических $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ -лазеров с пассивной модуляцией добротности. Лазер на $\text{Nd:YAG/Cr}^{4+}:\text{YAG}$ (допирование 1.1 ат. %) был использован для генерации лазерных импульсов в зеленой области спектра на длине волны 532 нм с энергией 0.36 мДж и пиковой мощностью 0.3 МВт при однопроходном удвоении частоты основного излучения

на длине волны 1.064 мкм в нелинейном кристалле LBO при комнатной температуре. Такой лазер может быть использован для получения лазерных импульсов высокой пиковой мощности в видимой и УФ областях спектра за счет однопроходного нелинейного преобразования. Импульсы лазера на основе сильнодопированной (1.5 ат. %) Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG-керамики, были усилены в МОРА-системе. Был продемонстрирован лазерный источник, генерирующий мощные (11 мДж), короткие (860 пс) импульсы с большой частотой следования (250 Гц) на 1.064 мкм, который может быть использован для накачки ПГС.

Работа была поддержана проектом 72150/01.10.2008, финансируемым Министерством науки, образования и молодежи Румынии и двусторонним Румыно-Болгарским проектом (455CB/20.10.2010 RO, DRG02-4/2010 BG).

1. Ikesue A., Kamata K., Yoshida K. *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 225 (1995).
2. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., Yoshida K. *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 1033 (1995).
3. Lu J., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T., Akiyama Y., Kaminskii A.A. *J. Alloys. Compounds*, **341**, 220 (2002).
4. Kracht D., Freiburg D., Wilhelm R., Frede M., Fallnich C. *Opt. Express*, **14**, 2690 (2006).
5. Li C.Y., Bo Y., Wang B.S., Tian C.Y., Peng Q.J., Cui D.F., Xu Z.Y., Liu W.B., Feng X.Q., Pan Y.B. *Opt. Commun.*, **283**, 5145 (2010).
6. Feng Y., Lu J., Takaichi K., Ueda K-I., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A.A. *Appl. Opt.*, **43**, 2944 (2004).
7. Dong J., Ueda K-I., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A.A. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 191106 (2007).
8. Dong J., Ueda K-I., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A.A. *Opt. Express*, **15**, 14516 (2007).
9. Zhou J.Y., Ma J., Dong J., Cheng Y., Ueda K-I., Kaminskii A.A. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 591 (2011).
10. Sakai H., Kan H., Taira T. *Opt. Express*, **16**, 19891 (2008).
11. Tsunekane M., Inohara T., Ando A., Kido N., Kanehara K., Taira T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 277 (2010).
12. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. *Opt. Express*, **19**, 9378 (2011).
13. Jaspán M.A., Welford D., Russell J.A. *Appl. Opt.*, **43**, 2555 (2004).
14. Degnan J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 1890 (1995).
15. Pavel N., Saikawa J., Kurimura S., Taira T. *Jap. J. Appl. Phys.*, **40**, 1253 (2001).
16. Li S.T., Zhang X.Y., Wang Q.P., Li P., Chang J., Zhang X.L., Cong Z.H. *Appl. Phys. B*, **88**, 221 (2007).
17. Innocenzi M.E., Yura H.T., Fincher C.L., Fields R.A. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1831 (1990).
18. Major A., Sukhoy K., Zhao H., Lima Jr. I.T. *Laser Phys.*, **21**, 57 (2011).
19. Bhandari S., Taira T. *Opt. Express*, **19**, 19135 (2011).
20. Gaydardzhiev A., Chuchumishev D., Buchvarov I., Shumov D., Samuelson S., in *Techn. Dig. CLEO Europe – EQEC 2011 Conf.* (Munich, Germany, presentation CD.P.19).
21. Dascalu T., Pavel N. *Laser Phys.*, **19**, 2090 (2009).
22. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. *Opt. Lett.*, **35**, 1617 (2010).
23. Rapaport A., Zhao S., Xiao G., Howard A., Bass M. *Appl. Opt.*, **41**, 7052 (2002).