

Одночастотная МОРА-система с качеством пучка, близким к дифракционному пределу*

Д. Чучумишев, А. Гайдаржиев, А. Трифонов, И. Бучваров

Пучок излучения импульсного одночастотного Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности, обладающий близким к дифракционному пределу качеством (240 мкДж, 830 пс при 0.5 кГц), усиливается в системе усиления мощности задающего генератора до энергии импульса 13 мДж. Система, состоящая из предусилителя и двухкаскадного усилителя с диодной накачкой, обеспечивает сохранение длительности импульса, качества пучка и линейной поляризации.

Ключевые слова: лазерные системы и новые лазерные материалы, лазерные усилители, твердотельные лазеры с диодной накачкой.

1. Введение

Сверхкомпактные и надежные лазерные системы, генерирующие импульсы с высокой энергией (на уровне десятков мДж) и высокой пиковой мощностью (свыше 10 МВт) при килогерцевых частотах повторения в дифракционно-ограниченных пучках востребованы для ряда приложений, например синтеза новых материалов, удаленного видения, химического опознавания, дистанционного зондирования [1, 2], обработки материалов [3, 4], высокоэффективного нелинейно-оптического преобразования [5] и оптических параметрических процессов [6]. Микрочип-лазеры с пассивной модуляцией добротности являются простыми, миниатюрными и удобными в эксплуатации источниками, которые способны обеспечить генерацию одночастотных субнаносекундных импульсов с высокой частотой повторения и дифракционно-ограниченным выходом в ближней ИК области [7]. Однако небольшой объем усиливающей среды ограничивает количество энергии, которое может быть запасено в активной среде, поэтому микрочип-лазеры могут излучать только очень умеренные импульсные энергии (как правило, до сотен микроджоулей).

Для преодоления этого недостатка были разработаны системы со сложной геометрией усиления, что позволило получить среднюю мощность до 5.7 Вт при энергии в 500-пикосекундном импульсе 0.2 мДж [8]. Недавно была использована геометрия с полным внутренним отражением (bounce geometry) для усиления излучения Nd:YVO₄-лазера с пассивной модуляцией добротности и получения энергии до 0.54 мДж при длительности импульса 577 пс [9]. Хотя эти подходы обладают некоторыми преимуществами в плане выходной эффективности лазера, они име-

ют ограничения в масштабировании энергии либо из-за активной среды, либо из-за схемы усиления. Для микрочип-лазера на Nd:YAG ($\lambda = 1.064$ нм) с пассивной модуляцией добротности в качестве активных сред для усилителя могут быть использованы как кристаллы Nd:YAG, так и Nd:YVO₄ [10]. Выбор активного материала и его геометрия продиктованы заданными конечной и начальной энергиями импульса. Например, Nd:YVO₄ имеет большее сечение излучения и меньшую интенсивность насыщения. Следовательно, он предпочтителен для масштабирования выходной энергии генераторов с энергиями импульсов от единиц до нескольких десятков микроджоулей. Хотя у Nd:YAG коэффициент усиления меньше, чем у Nd:YVO₄, у него лучше механические и тепловые свойства, а также больше время жизни возбужденного состояния. Следовательно, Nd:YAG предпочтительнее использовать в качестве усиливающей среды для высокоэнергетических (от 1 до 10 мДж на частотах повторения ~1 кГц) субнаносекундных лазерных систем. Однако для огромного разнообразия существующих килогерцевых лазерных систем выходная энергия импульса существенно меньше 10 мДж, тогда как частота повторения систем с импульсной энергией 10–100 мДж не превышает 100 Гц.

В настоящей работе мы сообщаем об усилении импульсов одночастотного Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности (240 мкДж, 830 пс при 0.5 кГц) до энергии 13 мДж в двухкаскадном усилителе с диодной накачкой при сохранении длительности импульса, близкого к дифракционному качеству пучка и линейной поляризации.

2. Экспериментальная установка

Схема эксперимента показана на рис. 1. В качестве задающего генератора использовался микрочип-лазер с пассивной модуляцией добротности и зеркальными покрытиями, нанесенными непосредственно на активный элемент из Cr⁴⁺:YAG/Nd:YAG. Продольная накачка лазера осуществлялась квазинепрерывной линейкой диодных лазеров мощностью 70 Вт (Jenoptik Laser GmbH, JOLD70-QPXF-1L), запитанной импульсами тока (80 мкс,

*Перевод В.В.Шувалова.

D.Chuchumishev, A.Gaydardzhiev, A.Trifonov, I.Buchvarov. Department of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., BG-1164, Sofia, Bulgaria; e-mail: d.chuchumishev@phys.uni-sofia.bg, a.gaydardzhiev@phys.uni-sofia.bg, trifonov@phys.uni-sofia.bg, ivan.buchvarov@phys.uni-sofia.bg

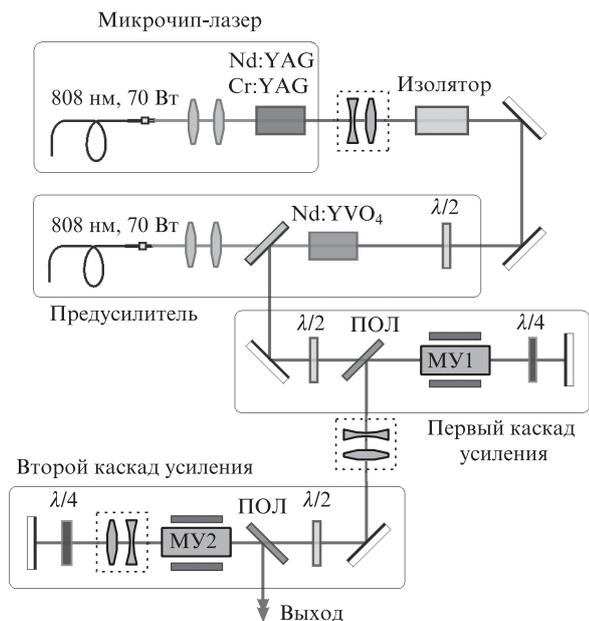


Рис.1. Схема МОРА-системы, состоящей из предусилителя и двух-каскадного усилителя с диодной накачкой: МУ1, МУ2 – модули усиления с поперечной накачкой; ПОЛ – поляризатор.

70 А) с частотой повторения 0.5 кГц. Пучок накачки поступал через оптическое волокно с центральной жилой диаметром 400 мкм, изображение торца волокна переносилось на активный элемент объективом из асферических линз с коэффициентом увеличения 1:1. Одночастотный режим работы генератора достигался за счет короткой длины резонатора (7 мм). Максимальная энергия поляризованного выходного излучения составляла 240 мкДж при частоте повторения 0.5 кГц. Длительности импульсов излучения от генератора и с выхода МОРА-системы измерялись с помощью осциллографа с полосой 1.5 ГГц и InGaAs-фотодиода (полное время отклика системы детектирования составляло 350 пс). Качество пучка на выходе каждого каскада усиления измерялось коммерческим анализатором пучка на основе CCD.

Излучение задающего генератора предварительно усиливается при однократном проходе кристалла Nd:YVO₄ длиной 9 мм с 0.5 ат. % легирующей примеси и торцевой накачке. Дальнейшее усиление обеспечивается двумя двухпроходными каскадами с поперечно накачиваемыми модулями (рис.1). В каждом модуле используется стержень из кристалла Nd:YAG с уровнем легирования до 0.6 ат. %, диаметром 3 мм при длине 90 мм. Часть стержня (50 мм длины) накачивается тремя линиями лазерных диодов, каждая из которых состоит из пяти 40-ваттных лазерных диодов. Оптимальные размеры пучков в каждом каскаде усиления достигаются за счет использования двухлинзовых объективов, которые обеспечивают диаметры пучков 0.7, 1.3 и 2 мм (по уровню 1/e²) в предусилителе, первом и втором каскадах усиления соответственно. Двухпроходное усиление в последних двух каскадах реализуется посредством поляризатора и четвертьволновой пластинки. В установке линейно поляризованное (p) излучение совершает один проход через поляризатор, модуль усиления и четвертьволновую пластинку. Отразившись от глухого зеркала, импульс второй раз проходит через четвертьволновую пластинку, меняя за счет этого

свою поляризацию на ортогональную (s), и после прохождения через активной кристалл отражается поляризатором (см. рис.1).

3. Результаты и их обсуждение

Для эффективного извлечения энергии из импульсно-го усилителя плотность энергии входного сигнала должна быть близка к плотности насыщения используемого лазерного материала. Учитывая, что активная среда Nd:YAG имеет плотность насыщения 0.67 Дж/см², а диаметр используемых стержней равен 3 мм, необходимо иметь энергию входного импульса в несколько миллиджоулей при длительности 0.8 нс, чтобы эффективно извлечь запасенную в активных средах энергию. В нашей установке это условие выполняется за счет использования предварительного усилителя, накачиваемого второй линией лазерных диодов с волоконным выходом (Jenoptik Laser GmbH, JOLD70-QPXF-1L) (длина волны 808 нм, длительность импульсов 120 мкс, полная энергия 6.2 мДж). Кристалл Nd:YVO₄ в качестве активной среды для предусилителя выбран из-за своей низкой плотности насыщения, которая более чем в пять раз ниже (0.12 Дж/см²), чем у Nd:YAG, что обеспечивает более высокое усиление за один проход. Из рис.2,а следует, что предусилитель работает в режиме насыщения, и это позволило получить импульсы с энергией 0.84 мДж на частоте повторения 0.5 кГц с 10%-ной эффективностью извлечения при близком к дифракционному пределу качестве пучка (рис.2,б).

Для дальнейшего повышения энергии импульса (свыше 10 мДж) использовалась импульсная оптическая накачка (120 мДж, 200 мкс) каждого из усилительных моду-

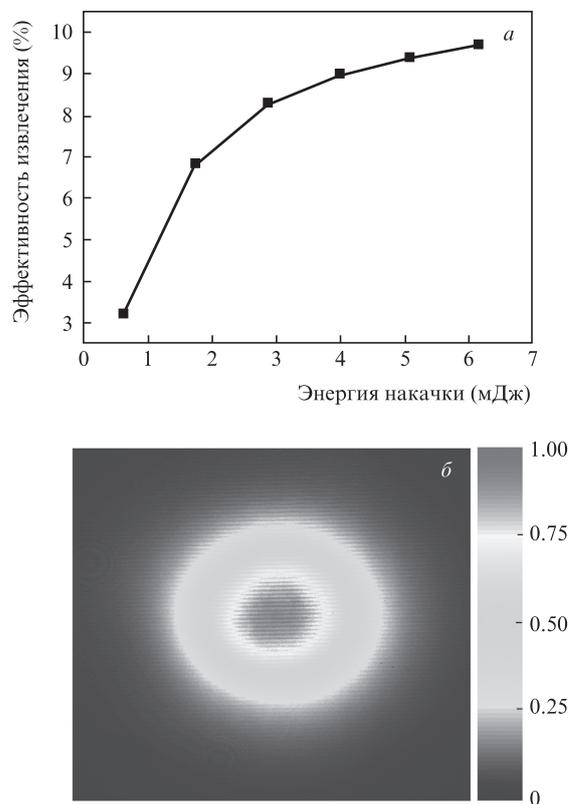


Рис.2. Насыщение усиления на одном проходе через Nd:YVO₄-предусилитель (а) и профиль лазерного пучка после предусилителя (б).

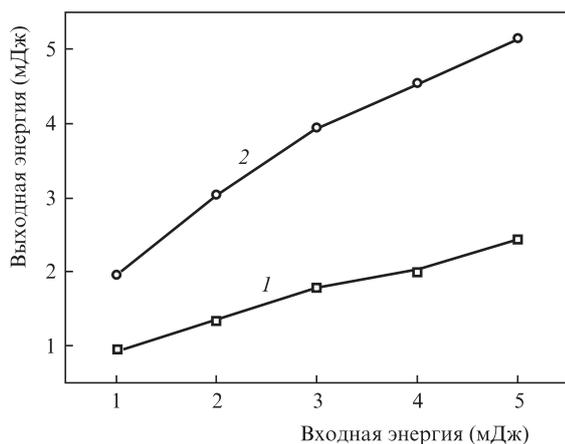


Рис.3. Зависимость энергии выходного импульса от энергии входного импульса для одно- (1) и двухпроходного (2) усиления в первом усилительном каскаде.

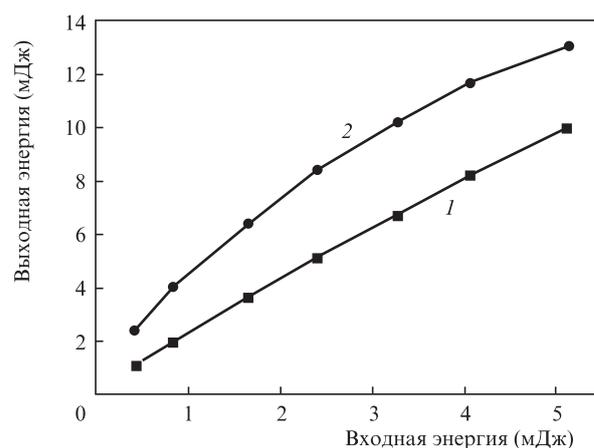


Рис.4. Зависимость энергии выходного импульса от энергии входного импульса для одно- (1) и двухпроходного (2) усиления во втором усилительном каскаде.

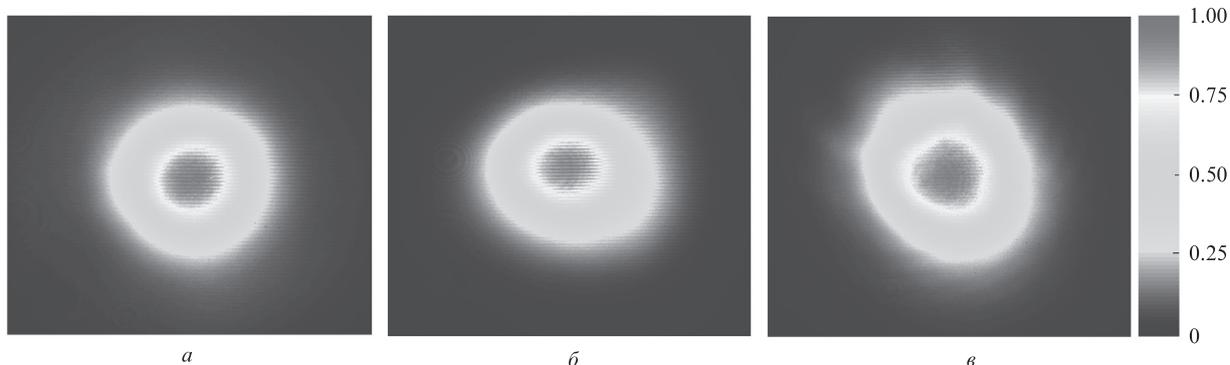


Рис.5. Профиль лазерного пучка на выходе задающего генератора (а), после первого (б) и после второго (в) каскадов усиления.

лей. Была получена средняя выходная мощность всей системы 6.5 Вт, что соответствует энергии одиночного импульса 13 мДж. На рис.3 и 4 показано, что насыщение усиления достигается на втором проходе через последний модуль усилителя. Однако это не приводит к существенному укорочению импульса на выходе МОРА, и длительность выходного импульса такая же, как у микрочип-лазера (830 пс). Полученная пиковая мощность импульса составляет 15.7 МВт. На рис.5 представлены наблюдаемые профили пучка: после задающего генератора (параметры качества $M_x^2 \times M_y^2 = 1.38 \times 1.31$), после первого каскада ($M_x^2 \times M_y^2 = 1.39 \times 1.33$) и на выходе второго каскада ($M_x^2 \times M_y^2 = 1.4 \times 1.35$). Очевидно отсутствие значительного ухудшения качества пучка как после первого, так и после второго каскада усилителя.

4. Выводы

Продемонстрирована субнаносекундная одночастотная лазерная МОРА-система, генерирующая интенсивные (15.7 МВт) одномодовые импульсы длительностью 830 пс с энергией до 13 мДж при частоте повторения 0.5 кГц и близком к дифракционному пределу качестве пучка. Предлагаемый подход легко масштабируется с целью

получения более высоких энергий импульса. Достигнутый уровень интенсивности и характеристики пучка делают МОРА-систему привлекательным источником накачки оптических параметрических усилителей.

Авторы признательны за поддержку со стороны проектов DO/02/134/2009 и DRG02-4/2010, финансируемых Болгарским министерством образования, молодежи и науки.

1. Du S.T., Zhou J., Zhang F.B., Feng Y.T., Lou Q.H., Chen W.B. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **50** (10), 2546 (2008).
2. Ostermeyer M., Kappe P., Menzel R., Wulfmeyer V. *Appl. Opt.*, **44** (4), 582 (2005).
3. Hwang D., Ryu S.G., Misra N., Jeon H., Grigoropoulos C.P. *Appl. Phys. A*, **6** (2), 289 (2009).
4. O'Neill W., Li K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 462 (2009).
5. Cerny P., Jelinkova H., Zverev P.G., Basiev T.T. *Progr. Quantum Electron.*, **28** (2), 113 (2004).
6. Debuisschert T. *Quantum Semicl. Opt.*, **9** (2), 209 (1997).
7. Zayhowski J.J. *Solid-State Lasers and Applications*. Ed. by A. Sennaroglu (CRC Press, 2007, p. 1–76).
8. Forget S., Balembois F., Georges P., Devilder P.J. *Appl. Phys. B*, **75** (4–5), 481 (2002).
9. Agnesi A., Dallochio P., Pirzio F., Reali G. *Appl. Phys. B*, **98** (4), 737 (2010).
10. Manni J.G. *Opt. Commun.*, **252** (1–3), 117 (2005).