

МОЩНЫЙ ОДНОМОВОДНЫЙ ДИОДНО-НАКАЧИВАЕМЫЙ Nd:YAG-ЛАЗЕР С ИЗЛУЧЕНИЕМ ГАРМОНИК 0,532 мкм И 0,355 мкм ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Донин, А.В. Никонов, Д.В. Яковин, А.В. Грибанов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия

В настоящее время твердотельные лазеры переживают второе рождение за счет использования вместо дуговых ламп диодно-лазерной накачки, которая обеспечивает им высокие КПД (более 10%) и срок службы (более 10000 часов). Существенное повышение указанных характеристик значительно расширяет технологические возможности таких полностью твердотельных лазеров (ПТТЛ). Выпускаемые зарубежными фирмами (Lee Laser, Trumpf, IPG Photonics и др.) ПТТЛ имеют среднюю мощность 0,6÷10 кВт в ближней ИК-области спектра. Они генерируют в многомодовом режиме излучение на переходах Nd^{3+} и Yb^{3+} (1,03÷1,075 мкм).

Для прецизионной обработки материалов требуется одномодовый лазер с более коротковолновым излучением. Одномодовый режим легко реализуется при продольной накачке ПТТЛ (либо использованием одномодового волокна для волоконного лазера), однако это приводит к существенному (на 1÷2 порядка) снижению средней выходной мощности лазера. Более коротковолновое излучение реализуется с помощью генерации гармоник (2-й, 3-ей и 4-ой.) в нелинейных кристаллах (соответственно длины волн для Nd:YAG-лазера 0,532 мкм, 0,355 мкм и 0,266 мкм). Нелинейное преобразование частоты требует повышенной плотности потока излучения, приводящее к разрушению нелинейных кристаллов и их антиотражающих покрытий. В результате достижение средней мощности более 100 Вт в коротковолновом диапазоне становится проблематичным.

Например, имеющая наибольшие успехи в получении мощного коротковолнового излучения фирма “Lee Laser” (США) продает ПТТЛ со средней мощностью излучения на 0,53 мкм до 100 Вт в многомодовом и до 8 Вт в одномодовом режимах для поперечной накачки и до 4 Вт для продольной. При этом длительность импульса (300÷500 нс) практически не регулируется (существенно меняется только частота следования импульсов за счет модуляции добротности резонатора). Другой подход использует фирма “Lumera Lasers” (Германия) в модели ПТТЛ “Staccato”, в которой используется непрерывная продольная накачка Nd:YVO₄-лазера с синхронизацией мод и регулируемой (50÷100-кГц) частотой выброса импульса (cavity-damper). При этом из-за слишком малой энергии импульса приходится использовать дополнительный усилительный каскад, что приводит к усложнению и значительному удорожанию этой модели. Однако и в этом случае энергия импульса излучения на 0,53 мкм (~0,05 мДж) и средняя мощность (4 Вт) малы, а длительность импульса (≤ 15 пс) практически не меняется.

Возможности прецизионной обработки материалов лазером заданной средней мощности и частоты повторения существенно увеличиваются при регулируемой в широких пределах длительности импульса генерации.

В данном сообщении представлена разработка одномодового диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с мощностью излучения вплоть до 100 Вт, 50 Вт и 20 Вт соответственно для длин волн 1,064 мкм, 0,532 мкм и 0,355 мкм с частотой следования импульсов (1÷50 кГц) и возможностью варьирования временных параметров импульса (10÷100 пс, 50÷500 нс). Разработка была выполнена на основе сравнительно простой схемы одномодового Nd:YAG-лазера с поперечной диодной накачкой, модуляцией добротности

© В.И. Донин, А.В. Никонов, Д.В. Яковин, А.В. Грибанов 2011

резонатора (Q-Switch) и внутрирезонаторной генерацией гармоник [1]. Такая схема обеспечивает эффективное преобразование гармоник (~80%) при длительностях импульса генерации 50÷500 нс. Характеристики и общий вид лазера представлены в таблице и на рисунке.

Характеристики одномодового Nd:YAG-лазера

Длина волны, мкм	1,064	0,532	0,355
Выходная мощность в режиме Q-Switch, Вт	25/100	>15/>50	>7/20
Тип излучения	TEM ₀₀ , (M ² <1.5)		
Режимы работы	CW, Q-Switch, Mode locking		
Частота повторения – f, кГц	0-20		
Длительность импульса (Q-Switch, при f ~3кГц), нс	100	50	<50
Вес, кг	10/15 лазерная головка 80/100 общий вес (с источниками и охладителем)		
Потребляемая мощность лазера, кВт	0,6/2,0		
Потребляемая мощность охладителя, кВт	1,0		
Расход воды, м ³ /час	0 (замкнутый цикл)		

Сокращение длительности отдельного импульса вплоть до ~10 пс осуществляется путем синхронизации мод лазера. Повышение пиковой мощности без снижения энергии отдельного Q-switch-импульса может быть выполнено за счет синхронизации мод внутри такого импульса. Предварительные эксперименты с одновременным использованием модуляции добротности и синхронизации мод (режим Q-Switch + Mode locking) показали, что при средней мощности излучения на 0,53 мкм ~1 Вт пиковая мощность составляет ~1 МВт [2].

С лазером, работающем в режиме модуляции добротности с внутрирезонаторным удвоением (импульсы ~100 нс, энергия в импульсе ~1 мДж, частота повторения 3-10 кГц), также были проведены предварительные эксперименты по пробивке отверстий диаметром от 5 мкм до 10мм в различных материалах (нержавеющая сталь, медь, алюминий, бериллиевая бронза, поликристаллический алмаз, керамика) толщиной 0,1-1мм, показавшие его перспективность для этих целей.

Данная разработка имеет преимущества перед лучшими зарубежными образцами (регулируемая длительность импульса, более низкая цена при сравнимых компактности и невысоком энергопотреблении). Она



Внешний вид излучателя с источником питания.

позволит обеспечить в стране импортозамещение дорогостоящих зарубежных установок в таких областях, как точная обработка в машиностроении, производство изделий микромеханики, обработка алмазных и сапфировых подложек в микроэлектронике, изготовление деталей водородных топливных элементов, резка и прошивка отверстий в многослойных материалах и т.д.

Расширение спектральных характеристик лазера для других применений

Наряду с указанными в Таблице линиями генерация может осуществляться на известных переходах 1,319 и 0,946 мкм, а также и на полученных с узкоселективным резонатором новых 1,112 мкм, 0,899 мкм, 0,884 мкм и 0,869 мкм. Удвоением частоты можно получать генерацию на линиях 659 и 473 нм, а также [3, 4] на 556, 450, 442 и 435 нм. Эффективность η (по диодной накачке) трех последних линий мала ($1 \div 0,3$ %). Однако первые три линии имеют эффективность $\eta \approx 5$ % для поперечной накачки и $\eta \approx 18$ % для продольной [5]. В лазере с продольной накачкой на рамановском рассеянии в активном кристалле (Nd:YVO_4) получена генерация на 588 нм при $\eta \approx 24$ % [6]. В рамановском лазере с внешним резонатором на алмазе при лазерной накачке 532 нм получена генерация на линии 573 нм при КПД преобразования 65 % [7].

Генерацией суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах можно также расширять применение лазера. Например, в [8] смешением линий 1,064 и 1,319 мкм в LBO, расположенном во внешнем кольцевом резонаторе получена непрерывная генерация на линии 589,15 нм мощностью 20 Вт с возможностью перестройки в пределах D_2 -линии Na (589,156÷589,160 нм) при потребляемой “от розетки” мощности 300 Вт (без учета 1 кВт-го охладителя). Это позволяет заменять громоздкие и неэкономичные лазерные системы на основе красителя родамин 6Ж при создании искусственных звезд для адаптивных оптических систем и при локации верхних слоев атмосферы [9]. Другой пример-генерация разностных частот с целью получения терагерцового излучения. Для этого можно использовать лазер с двумя активными средами Nd:YVO_4 и Nd:GdVO_4 в резонаторе с длинами волн генерации 1,0641 и 1,0628 мкм [10], что позволяет получить перестраиваемое излучение в области $0,2 \div 0,5$ ТГц и средней мощностью ~ 10 мВт при суммарной мощности лазера 12 Вт. Терагерцовое излучение можно получать и параметрической генерацией, однако за счет большого различия длин волн генерации и накачки энергетический КПД преобразования также будет мал. Параметрика эффективна при меньшем различии длин волн, например, в [11] с Nd:YAG лазером мощностью 104 Вт получена средняя мощность 16 Вт на длине волны 3,84 мкм и 46 Вт на длине волны 1,47 мкм.

Непрерывная перестройка в широкой области спектра может быть получена на основе $\text{Ti}^{+3}:\text{Al}_2\text{O}_3$ лазера, накачиваемого “зеленым” ПТТЛ [12]. Область генерации титан-сапфирового лазера составляет $\sim 0,66 \div 1,1$ мкм, мощность генерации и КПД преобразования в непрерывном режиме могут достигать до ~ 40 Вт и ~ 40 % [13]. Используя вторую и третью гармоники можно получать непрерывную перестройку вплоть до ~ 280 нм [14]. В область генерации $\sim 280 \div 320$ нм попадает целый ряд поглощающих примесей в атмосфере, таких как SO_2 , OH , NO , O_3 , ClO и др., контроль за которыми дает информацию о стратосферной концентрации озона, возможных кислотных дождях, смогах и т.д.

Для медицинских применений может оказаться полезным малогабаритный перестраиваемый (550÷750 нм) лазер на красителях с накачкой “зеленым” ПТТЛ [15], поскольку он может заменять целый набор полупроводниковых лазеров с фиксированной длиной волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донин В.И., Никонов А.В., Яковин Д.В. Эффективное удвоение частоты в Nd:YAG -лазере с поперечной диодной накачкой // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, №10. С. 930-932.

2. Грибанов А.В., Донин В.И., Хомутов А.Н., Яковин Д.В., Яковин М.Д. Синхронизация мод нелинейным кристаллом в зеленом Q-switch Nd:YAG лазере с диодной накачкой// Труды молодежной школы-конференции с международным участием “Лазеры и лазерные технологии”, посвященной 50-летию первого в мире лазера. 22-27 ноября 2010, г. Томск, С. 51-52.
3. Wang Z. et al. Yellow-green 52,3 W laser at 556 nm based on frequency doubling of a diode side-pumped Q-switched Nd:YAG laser// *Applied Optics*, 2010. V. 49, №18. P. 3465-3469.
4. Lu Y. et al. Diode-pumped cw Nd:YAG three-level laser at 869 nm// *Optics Letters*. 2010. V. 35, №21. P. 3670-3672.
5. Quan Z. et al. All-solid-state 556 nm yellow-green laser generated by frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser// *J. Opt. Soc. Am. B*. 2009. V. 26, №10. P.1939-1943.
6. Zhu L. et al. Yellow-light generation of 5,7 W by intracavity doubling self-Raman laser of YVO₄/Nd:YVO₄ composite// *Optics Letters*. 2009. V. 34, №18. P. 2763-2765.
7. Mildren R.P., Sabella A. Highly efficient diamond Raman laser// *Optics Letters*. 2009. V. 34, №18. P. 2811-2813.
8. Bienfang J.C. et al. 20W of continuous-wave sodium D₂ resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers// *Optics Letters*. 2003. V. 28, №22. P. 2219-2221.
9. She C.Y., Latifi H. et al. Two-frequency lidar technique for mesospheric Na temperature measurements// *Geophys. Research Lett.* 1990. V. 17, №7. P/ 329-932.
10. Singh A.G. et al. Dual wavelength operation in diode-end-pumped hybrid vanadate laser// *Pramana-J. Phys.* 2010. V. 75, №5. P. 929-934.
11. Peng Y et al. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN// *Optics Letters*. 2009. V. 34, №19. P. 2897-2899.
12. Грибанов А.В., Донин В.И., Яковин Д.В. Титан-сапфировый лазер с импульсной накачкой второй гармоникой излучения диодно-накачиваемого Nd:YAG лазера для целей двухфотонной спектроскопии// *Квантовая электроника*. 2009. Т. 39, №3. С. 244-246.
13. Donin V.I., Ivanov V.A., Kovalevskii V.I., Yakovin D.V. CW generation from Ti:sapphire pumped with a high-power Ar⁺-laser// *Optics Commun.*, 1995. V. 122, №1-3. P.4 0-42.
14. Грибанов А.В., Донин В.И., Хомутов А.Н., Яковин Д.В. Компактный перестраиваемый ультрафиолетовый Ti:Sa лазер с преобразованием частоты// Сборник трудов второй международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. 07-09 февраля 2006., г. Санкт-Петербург. С. 153.
15. Soldatov A.N., Donin V.I., Yakovin D.V. Reimer I.V. Laser dyes excited by high PRR Nd:YAG laser second-harmonic radiation// *Proc. SPIE*. 2007. V. 6938. P. 6938O1-6938O4.

HIGH-POWER DIODE-PUMPED TEM₀₀ Nd:YAG LASER WITH HARMONICS AT 0.53 μ m AND 0.355 μ m FOR MICROMACHING OF MATERIALS

Donin V.I., Nikonov A.V., Yakovin D.V., Griбанov A.V.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS,
Novosibirsk, Russia

Abstract

In this paper we present the development of single-mode diode-pumped Nd:YAG-laser with output power up to 100 watts, 50 watts and 20 watts respectively for wavelengths of 1.064 μ m, 0.532 μ m and 0.355 μ m with a pulse repetition rate (1 ÷ 50 kHz) and the possibility of varying the temporal parameters of the pulse (10 ÷ 100 ps, 50 ÷ 500 ns). Development was done on the basis of a relatively simple scheme of Nd: YAG-laser with transverse diode-pumped, Q-switched resonator and efficient intracavity harmonic generation. We discuss the temporal and spectral characteristics of the laser and its possible applications.