

文章编号: 1001-3806(2012)01-0087-03

非稳腔大功率绿光激光器的研究

欧天有¹ 张宁¹ 庞庆生² 李港²

(1. 中国人民解放军 61711 部队 喀什 844000; 2. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘要: 为了提高激光的光束质量和提供准直的平行光束, 为抽运钛宝石提供优良的大功率的绿光抽运源, 对激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 声光调 Q 腔内倍频固体激光器进行了研究。实验中采用凸平直线非稳腔, 将凸面镜和增益介质热透镜效应等效为望远镜系统进行分析。由实验可知, 凸平非稳腔具有较大模体积、良好的稳定性等优点; 利用二类相位匹配的磷酸钛氧钾晶体进行腔内倍频, 当抽运功率为 200W 时, 获得脉宽 109ns、重复频率 9.3kHz、发散角小于 2mrad 的 42W 绿光输出, 光光转换效率达到 21%。24h 长时间的工作, 不稳定性小于 2%。结果表明, 利用非稳腔腔型, 在侧面抽运的模块中可以实现高效的大功率绿光输出。

关键词: 激光器; 非稳腔; 绿光激光器; 平凸谐振腔

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.022

Study on high power green lasers with unstable resonators

OU Tian-you¹, ZHANG Ning¹, PANG Qing-sheng², LI Gang²

(1. 61711 Unit, Chinese People's Liberation Army, Kashi 844000, China; 2. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to improve its laser beam quality, obtain collimated laser beam and provide an excellent high-power green laser source to pump Ti:sapphire, a diode-side-pumped acoustic-optic Q-switched intra-cavity frequency doubling Nd:YAG laser was studied. In the experiment, a convex-plane unstable resonator was adopted assuming the convex mirrors and gain medium thermal lens as a telescope system. Experimental results show that a convex-plane unstable resonator has larger mode volume and better stability. Using a second type phase-matched KTP (KTiOPO₄) for intra-cavity frequency doubling, with 200W pump power, 42W green laser was output with 109ns pulse width, 9.3kHz pulse repetition frequency, less than 2mrad divergent angle, 21% optical-optical conversion efficiency and instability less than 2% during 24h work. It is proven that an effective output of green laser can be achieved with an unstable resonator and side pump module.

Key words: lasers; unstable cavity; green laser; convex-plane resonator

引言

在大功率全固态激光器领域, 多数人利用稳定腔的结构来研究大功率激光器, 却忽视了非稳腔具有模式好、模体积大等优点。全固态高重复频率、高平均功率、窄脉宽绿光激光器具有体积小、质量轻、结构紧凑、寿命长等优点, 在分离同位素及军事方面都有广泛应用, 在大型的娱乐场所绿光更能表演出美丽的动画。近年来, 随着国内外半导体激光器的迅速发展, 全固态绿光激光器的研究也有了很大进展^[1-8]。本文中研究并分析了非稳腔的理论和实验, 提出了利用非稳腔和外腔谐振倍频能输出更大的功率。非稳腔不仅仅能用侧面抽运的激光器中, 也能用在端面抽运的激光器

中^[9-40]。

1 理论分析

1.1 凸平腔理论的计算

凸平腔是一种非稳腔, 谐振腔的凸面镜和激光晶体中由于热效应产生的热透镜等效一个半径为 R_{eff} 的凹面镜^[10], 如图 1 所示。

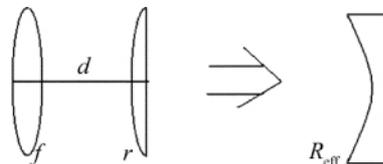


Fig. 1 Schematic of effective cavity

通过矩阵的转换, 推导出下式:

$$R_{\text{eff}} = \frac{2 \left[\left(1 - \frac{2d}{r}\right)(f-d) - d \right]}{\left(1 - \frac{d}{f}\right) \left(2 + \frac{f}{r} - \frac{d}{r}\right)} \quad (1)$$

作者简介: 欧天有(1985-), 男, 助理工程师, 现从事超短激光脉冲技术及其应用的研究。

E-mail: outy03@qq.com

收稿日期: 2011-03-15; 收到修改稿日期: 2011-05-17

式中 d 为热透镜与凸面镜的距离 f 为热焦距 r 为凸面镜的曲率半径。根据上式, 在 $r = -600\text{mm}$, $d = 50\text{mm}$ 情况下等效的曲率半径与热焦距 f 的关系如图 2 所示。

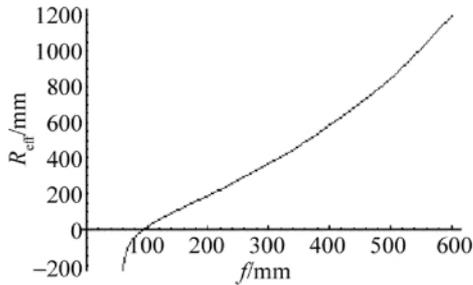


Fig. 2 Effective curvature radius as a function of thermal focal length

随着抽运功率的增加, 热效应增加即 f 值减小。从图 2 中可以看出 f 值减小, 等效半径 R_{eff} 也在减小。

利用凹平腔的理论来模拟和计算, 对于凹平腔, 平面镜上的光斑半径 w_1 和凹面镜上的光斑半径 w_2 有如下公式^[11]:

$$w_1^2 = \frac{\lambda}{\pi} [L(R-L)]^2 \quad (2)$$

$$w_2^2 = \frac{\lambda}{\pi} R \left[\frac{L}{R-L} \right]^2 \quad (3)$$

式中 L 为谐振腔的光学长度, R 为凹面镜的曲率半径 λ 为振荡激光波长。把 (2) 式中的 R 变为 R_{eff} 就可以在凸镜上面计算光斑半径 w 的变化:

$$w^2 = \frac{\lambda}{\pi} R_{\text{eff}} \left[\frac{L}{R_{\text{eff}} - L} \right]^2 \quad (4)$$

在 $r = -600\text{mm}$, $d = 50\text{mm}$, $L = 300\text{mm}$ 两个腔镜上的光斑变化分别如图 3、图 4 所示。

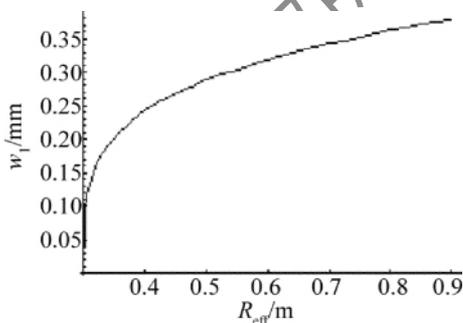


Fig. 3 Mode radius on flat mirror via the effective curvature radius

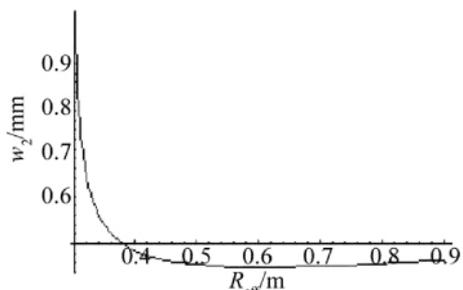


Fig. 4 Mode radius on convex mirror via the effective curvature radius

从图 2、图 3 和图 4 中可以看出, 随着抽运功率增加, 热效应明显增加, f 值在减小, 等效半径 R_{eff} 也在减小。随着 R_{eff} 的减小, 凸面镜上的光斑开始变化不明显, 激光晶体离凸面反射镜较近, 凸面镜上的光斑和晶体棒上的光斑接近, 这样对于激光器而言有较大的模体积, 有利于基频光的大功率输出, 而平面镜上的光斑减小得比较明显, 这样的变化有利于倍频效率的提高。因此凹凸激光腔能够克服热效应带来的影响, 使激光器能在较好的状态下运行。此外凹凸腔还有如下优点: (1) 小曲率半径的右凸左平腔结构有利于激光振荡的热稳定性; (2) 在无需调节腔长的情况下, 就能够使激光器处于稳定的基模运行状态; (3) 谐振腔等效为一个带有光学镇流器的右凹左平腔的谐振腔; (4) 谐振腔类似猫眼反射谐振腔, 具有猫眼反射谐振腔的优点。

通过实验也证明了上述几点。在实验上与平平腔的调节性能相比较, 谐振腔结构的稳定性远比平平腔稳定, 凹凸腔基频光的光束质量好、发散角小、倍频效率高。

1.2 外腔谐振倍频理论

ASKIN 等人^[12] 首先提出利用外腔谐振倍频的方法来获得高效稳定的倍频输出。用这种方法可使激光谐振腔和外腔谐振倍频腔各自独立达到最佳状态, 可以提高倍频转换效率。外腔谐振倍频腔结构原理图如图 5 所示。其中 P_1 为基频光抽运功率, P_r 为由倍频腔通过 M_3 反射的基频光功率, P_c 为基频光在倍频腔内的循环功率, P_2 为由 M_2 输出的由反向传播的倍频光经 M_3 反射后与正向传播的倍频光的和。通过调整 M_3 或倍频晶体的位置, 控制经 M_3 反射后基频光和倍频光的相对位相, 可以使每个往返周期产生的倍频光干涉增强, 通过选择 M_3 耦合镜的透射率, 使基频抽运光全部耦合进倍频腔, 即倍频腔实现阻抗匹配^[13], 达到提高倍频效率的目的。

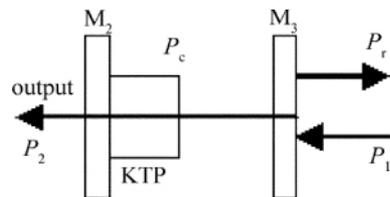


Fig. 5 External resonant second harmonic generation cavity

2 实验研究

实验中, 采用连续半导体侧面抽运模块, 最大抽运功率为 200W, 激光介质的尺寸为 $\varnothing 3\text{mm} \times 65\text{mm}$ 侧面打毛, 两端磨成平面, 轴向为 [111] 方向, 两端镀有 1064nm 和 532nm 增透膜。腔镜凸面镜 M_1 的 $R = -600\text{mm}$, 镀 1064nm 高反膜; 耦合波输出镜 M_2 平片, 镀 1064nm 高反膜、532nm 高透膜; M_3 为 532nm 谐波

反射镜, 双面镀 1064nm 减反膜, 一面镀 532nm 高反膜; 声光 Q 开关(acoustic-optic Q-switch) 器件调制频率为 2kHz ~ 25kHz; 倍频晶体采用二类相位匹配 KTP 尺寸为 3mm × 3mm × 10mm, 两端镀 1064nm 和 532nm 增透膜, 切割角度 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$ 。功率计为美国相干公司 100W 功率计, 示波器为美国泰克公司 500MHz 带宽示波器, 光电管型号为 GT101, 整个实验中采用统一的水冷方式, 冷却水温度精确保持在 19℃, 实验装置见图 6。

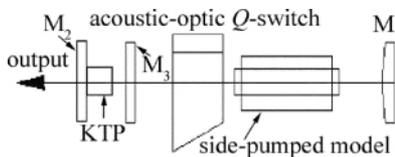


Fig. 6 Schematic of cavity for output of green light

实验中, KTP 晶体紧靠 M₂ 精确地调节角度, 以获得最高的倍频效率; 仔细调节 532nm 谐波反射镜 M₃ 的状态, 即调节经过谐波反射镜的倍频光与透过谐波反射镜基频光的倍频光的相对位相, 使每个往返周期产生的倍频光干涉增强, 达到提高倍频效率^[13-15]; 声光调制器也是影响输出功率的关键因素之一, 绿光输出对其调节非常敏感, 因此对它也进行了精确调节; 在抽运电流 29A 时, 通过调节冷却水的控制温度和调 Q 重复频率, 优化了谐振腔的参量以及晶体的角度等。在调制器最佳重复频率 9.3kHz、冷却水最佳控制温度 19℃ 时, 得到了绿光最大功率为 42W 的稳定输出, 脉冲宽度为 109ns, 发散角小于 2mrad。脉宽的示意图见图 7, 图 8 为绿光输出光斑。

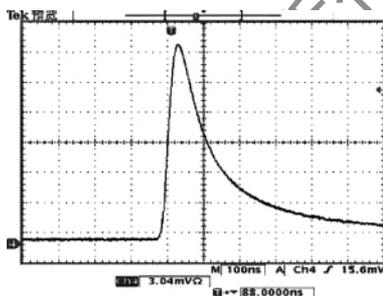


Fig. 7 Oscilloscope trace of a single Q-switched pulse at 9.3kHz

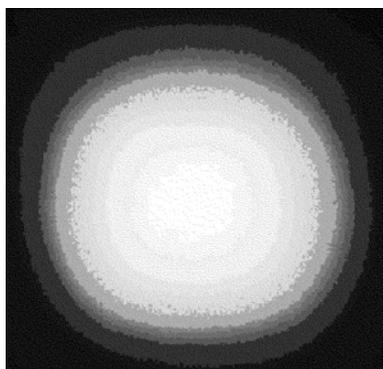


Fig. 8 Photo of green laser spot

图 9 为 532nm 绿光电流输入和功率输出曲线。

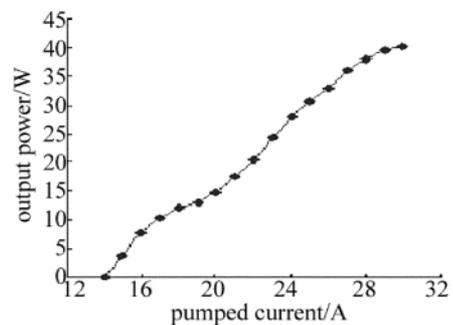


Fig. 9 Output power of green laser as a function of pump current

3 结 论

利用激光晶体中热效应产生的热透镜与凸面腔镜, 组成了一个类似的猫眼谐振腔结构, 并对此类谐振腔进行了深入分析、计算和实验研究, 得出了凸平非稳腔具有基模模体积最大、远场发散角最小、稳定性好等优点, 实现了在重复频率为 9.3kHz 下绿光平均功率为 42W 的高效输出, 此时发散角为 2mrad, 光光转换效率高达 21%。但是在理论和实验的过程中, 怎么根据热效应去选取腔镜的曲率以及对 KTP 在倍频中的相位失配的补偿问题还需要进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] CHANG J J, DRAGON E P, EBBERDS C A, *et al.* An efficient diode-pumped Nd:YAG laser with 451 W of CW IR and 182 W of pulsed green output [C]//OSA TOPS on Advanced Solid-state Lasers. Coeur D'Alene, Idaho, USA: High Power Laser Sources, 1998: 300-304.
- [2] SUSUMU K, SHUICHI F, KOJI Y. Highly efficient 68 W green-beam generation by use of an intracavity frequency-doubled diode side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser [J]. Applied Optics, 1998, 37 (27): 6401-6404.
- [3] JIANG D Sh, ZHOU Sh H, ZHAO H, *et al.* High average power double frequency operation of Nd:YAG rod lasers side pumped by diode arrays [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(4): 301-303 (in Chinese).
- [4] XU D G, YAO J Q, CHEN J, *et al.* High stabilization 85 W all solid state green laser operation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (4): 385-389 (in Chinese).
- [5] XU D G, YAO J Q, GUO L, *et al.* 104 W laser diode pumped intracavity frequency doubled Nd:YAG green light laser [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 925-928 (in Chinese).
- [6] JIANG D Sh, ZHAO H, WANG J J, *et al.* 120 W diode pumped green Nd:YAG laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 7-10 (in Chinese).
- [7] GONG M L, ZHANG Z P, GAO S, *et al.* Diode corner-pumped TEM₀₀ Nd:YAG lasers [J]. Laser Technology, 2009, 33(1): 1-4 (in Chinese).
- [8] LI Ch R, CHEN X Y, LI X, *et al.* 164 W LD side-pumped quasi-continuous-wave Nd:YAG/HGTR-KTP green laser [J]. Laser Technology, 2009, 33(3): 291-291 (in Chinese).
- [9] WU D E, YAN C F, ZHANG G Y, *et al.* Choice of resonant cavity for LD end-pumped solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(1): 32-37 (in Chinese).

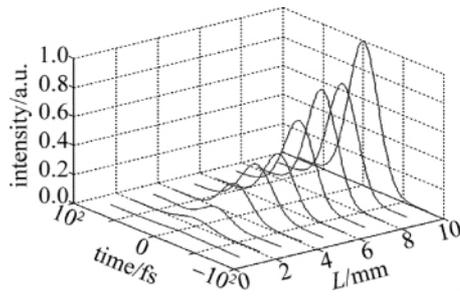


Fig. 4 Transmission process of the sum-frequency pulse in the aperiodic poled optical superlattice

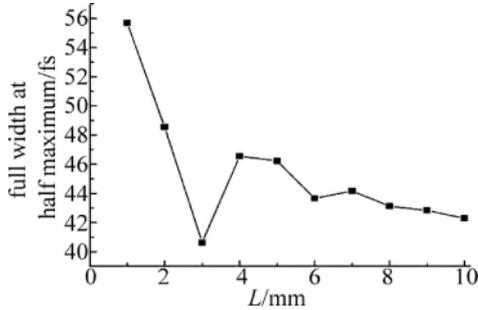


Fig. 5 Full width at half maximum of idle pulse in the aperiodic poled optical superlattice

3 结 论

(1) 经过理论研究和频过程在准位相匹配光栅中耦合波的频域模型, 获得了和频光的输出物理模式。
 (2) 提出了采用平顶长脉宽激光与飞秒激光相互作用, 能够有效地解决群速率失配问题, 并可以采用较长的晶体提高转换效率。利用遗传算法寻找出最优的光学超晶格结构, 使得各频谱的位相基本一致, 通过和频方式得到飞秒量级的蓝光。

本工作提供了一种新的用两个激光器通过和频方式产生短波长超短脉冲激光的方法。

参 考 文 献

[1] FEURER T, VAUGHAN J C, NELSON K A. Sation temporal coherent control of lattice vibrational wave [J]. *Science*, 2003, 299 (5606): 374-377.

(上接第 89 页)

[10] ZHANG J, QUADE M, DU K M, *et al.* Efficient TEM₀₀ operation of Nd:YVO₄ laser end pumped by fibre-coupled diode laser[J]. *SPIE*, 1997, 3097: 629-632.
 [11] KOGELNIK H, LI T. Laser beam and resonators [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(10): 1550-1567.
 [12] ASKIN A, BOYED G D, DZIEDZIC J M. Resonant optical second harmonic generation and mixing [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1966, QE2(6): 109-123.
 [13] ZHANG K Sh, ZHANG J, XIE Ch D, *et al.* Efficient second har-

[2] TIAN P F, KEUSTERS D, SUZAKI Y, *et al.* Femtosecond phase-coherent two-dimensional spectroscopy [J]. *Science*, 2003, 300 (5625): 1553-1555.
 [3] CHEN B F. Numerical simulation of femtosecond pulse measurement with SPIDER [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 13-15 (in Chinese).
 [4] LIU W J, LI H J, QU Sh L, *et al.* Femtosecond pulse compression in external cavity [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 665-667 (in Chinese).
 [5] ASHIHARA S, SHIMURA T, KURODA K. Group-velocity matched second-harmonic generation in tilted quasi-phase-matched gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, A20(5): 853-856.
 [6] FUJIOKA N, ASHIHARA S, ONO H, *et al.* Group-velocity-matched noncollinear second-harmonic generation in quasi-phase matching [J]. *Journal of the Optical Society of America* 2005, B22(6): 1283-1289.
 [7] GAO S M, YANG C X, JIN G F. Wavelength converter based on linearly chirped gratings in lithium niobate through cascaded second-order processes [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20(8): 1272-1274.
 [8] ZHANG J Y, HUANG J Y, WANG H. *et al.* Second-harmonic generation from regeneratively amplified femtosecond laser pulses in BBO and LBO crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1998, B15(1): 200-209.
 [9] CHEVILLE R A, REITEN M T, HALAS N J. Wide-bandwidth frequency doubling with high conversion efficiency [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(19): 1343-1345.
 [10] LI P Ch, CHEN X F, Y CHEN Y P. Pulse compression during second-harmonic generation in engineered aperiodic quasiphasematching gratings [J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6807-6814.
 [11] IMESHEV G, ARBORE M A, FEJER M M, *et al.* Ultrashort-pulse second-harmonic generation with longitudinally nonuniform quasi-phase matching gratings: pulse compression and shaping [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, B17(2): 304-318.
 [12] IMESHEV G, ARBORE M A, KASRIEL S, *et al.* Pulse shaping and compression by second-harmonic generation with quasi-phase-matching gratings in the presence of arbitrary dispersion [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, B17(8): 1420-1437.
 [13] IMESHEV G, FEJER M M, GALVANASKAS A. Pulse shaping by difference-frequency mixing with quasi-phase-matching gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2001, B18(4): 534-539.
 [14] JUNDT D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(20): 1553-1555.

monic generation of 1.06 μm using an external resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8): 1015-1018 (in Chinese).

[14] WANG N R, WANG C Zh, ZHAO Ch M, *et al.* 138W narrow pulse width solid state green laser operation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(8): 1017-1020 (in Chinese).
 [15] ZHAO Zh L, ZHU J Q, CHEN L H, *et al.* Grads-compensating temperature control for crystal in high power green light laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 623-627 (in Chinese).