

文章编号: 1001-3806(2017)01-0010-04

输出波长可控的共孔径 0.532 μm /1.064 μm /3.9 μm 激光器研究

郑奇¹, 孙军²

(1. 湖北民族学院 理学院, 恩施 445000; 2. 南开大学 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457)

摘要: 为了实现激光器同孔径下多种波长高功率高频率的可控输出, 采用激光放大、高重频调 Q 、光参量振荡、倍频及扫描反射镜等方法, 进行了理论分析和实验验证。取得了在电源电流为 42A、调 Q 频率 10kHz 的共孔径下, 选择性输出 40W 的 0.532 μm 、100W 的 1.064 μm 和 12.6W 的 3.9 μm 激光的实验数据。结果表明, 该激光器实验装置可实现同孔径下多种波长高功率、高频率可控输出。

关键词: 激光器; 共孔径; 波长可控; 光参量振荡; 周期性极化; 基频

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.003

Laser research of output wavelength controlled common aperture 0.532 μm /1.064 μm /3.9 μm

ZHENG Qi¹, SUN Jun²

(1. School of Science, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Nankai University, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to achieve the laser of high power, high frequency and controllable output with the same aperture, using the method of laser amplifier, high frequency tuning Q , optical parametric oscillator (OPO), frequency doubling and scanning reflection mirror, theoretical analysis and experimental verification were carried out. Selective laser outputs 0.532 μm of 40W, 1.064 μm of 100W, 3.9 μm of 12.6W were gotten under the condition of power supply current of 42A, Q frequency of 10kHz and the same aperture. The results show that the laser with high power, high frequency, controllable output and the same aperture can be achieved by this experimental device.

Key words: lasers; same aperture; wavelength controllable; optical parametric oscillator; periodically poled; fundamental frequency

引言

多波段可控输出激光器在光电对抗领域有重要应用。这类激光器输出波段范围跨度大, 激光器设计、镀膜难度较大, 本文中对该类激光器进行了实验探索。实验中采用一级激光放大技术、非线性周期极化钽酸锂 (periodically poled LiTaO₃, PPLT) 晶体光参量振荡 (optical parametric oscillator, OPO) 技术、双 MgO:LN 电光开关激光切换技术及电控扫描反射镜技术, 实现了多种波长共孔径激光的高功率输出, 试验为该类激光器的工程应用积累了经验。

1 1.064 μm 基频光设计

由于激光器要求输出 3 种波长, 而在这 3 种波长中, 0.532 μm 和 1.064 μm 技术成熟, 实现较为简单, 3.9 μm 激光波长跨度大, 激光转换效率低, 因此 1.064 μm 激光器在功率选择由 3.9 μm 激光输出来确定。1.064 μm 激光通过 OPO 转换到 3.9 μm 输出效率可达 10% 以上, 因此要实现十几瓦的 3.9 μm 激光输出, 至少需要 100W 左右的 1.064 μm 激光输出。为了降低 1.064 μm 激光器中元器件的功率负荷, 在 1.064 μm 激光实现上, 采用一级放大装置, 在调 Q 选择上, 选择容易实现高频输出的声光开关, 由于倍频及 OPO 需要偏振光, 在光路中增加了起偏器^[1]。为了防止杂散光对振荡级的影响, 在输出镜放大级中添加了隔离器, 其光路原理如图 1 所示。其工作原理如下: 激光器工作时激光电源触发二极管阵列放电, 产生在钇铝石榴石 (yttrium aluminum garnet, YAG) 激光晶体吸收带内 808nm 的光谱辐射。这些光谱辐射由聚光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61575099)

作者简介: 郑奇 (1975-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事物理学与光电子技术应用的研究。

E-mail: zhengqi789@126.com

收稿日期: 2015-12-15; 收到修改稿日期: 2016-01-13

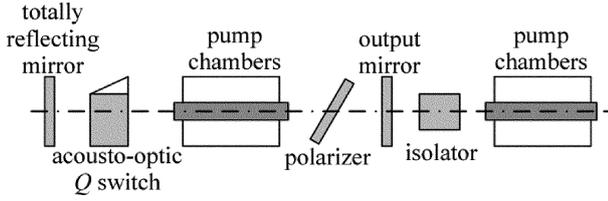


Fig. 1 Experimental light path diagram of fundamental frequency light
腔^[2]反射聚焦到激光工作物质上,完成基态离子的跃迁。为了提高激光脉冲能量及峰值功率,这时以声光 Q 开关组成的开关关闭,阻止腔镜的反馈,进而阻断谐振腔激光振荡。当激光工作介质激发态能级储存的反转粒子数达到极大值时,Q 开关迅速打开,腔内形成激光振荡,产生高峰值功率 1.064μm 波长激光脉冲。再经由放大级种子光放大,产生大功率的激光脉冲^[3-5]。实验过程中对聚光腔和声光调 Q 开关采用循环液体冷却,水温为 22℃。

2 0.532μm 激光产生设计

用于 1.064μm 激光非线性变换常用的晶体有磷酸钛氧钾 (KTiOPO₄, KTP)、三硼酸锂 (LiB₃O₅, LBO)、偏硼酸钡 (BaB₂O₄, BBO) 等。KTP 晶体光学性能好、透光范围大、走离小、价格低廉。在 1.064μm 的二次谐波时可产生 70% 左右的效率。在本方案中选用了 II 类临界相位匹配 KTP 晶体进行腔外倍频^[6],KTP 晶体两端面镀 1.064μm 和 0.532μm 增透膜,尺寸为 6mm × 6mm × 20mm,在切割角度 θ = 90°,φ = 26.5° 条件下,有效非线性系数为 3.28pm/V。本方案中晶体在较高温度切割,主要是提高其抗损伤能力和提高激光的稳定性。在光路实现上,使用基频 1.06μm 激光一次通过实现,其光路示意图如图 2 所示。

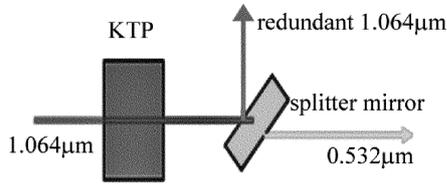


Fig. 2 Principle diagram of laser frequency doubling

3 3.9μm 激光产生设计

本方案中选用基频 1.06μm 激光抽运非线性周期极化钽酸锂 (periodically poled LiTaO₃, PPLT) 晶体 OPO 技术来产生 3.9μm 激光。OPO 中的波长转换需要同时满足能量和动量守恒(相位匹配)方程^[7],守恒方程如下:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_s} \quad (1)$$

$$\frac{n_p(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_i(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{n_s(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{1}{\Lambda(T)} = 0 \quad (2)$$

式中,λ_p 为抽运光波长;λ_i 为闲频光波长;λ_s 为信号光波长;T 为晶体温度;n_p(λ_p, T) 为抽运光在温度 T 时的折射率;n_i(λ_i, T) 为闲频光在温度 T 时的折射率;n_s(λ_s, T) 为信号光在温度 T 时的折射率;Λ(T) 为非线性晶体的极化周期。

当晶体温度控温在 25℃、抽运光为 1.06μm、信号光为 1.46μm 时,输出 3.9μm 激光,由上式计算出 PPLT 晶体的极化周期 Λ = 29.2μm。原理光路如图 3 所示。

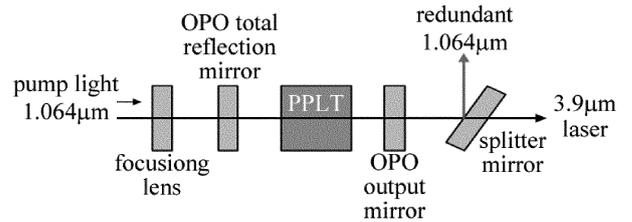


Fig. 3 Principle diagram of OPO

4 波长可控的共孔径高功率、高重频激光器实验

综上所述,最终设计的激光器总体光路如图 4 所示。图中, I 为 1.064μm 基频激光器,其主要作用是产生高功率高频 1.064μm 激光;II 为波长输出可控的共孔径输出激光器核心部分,主要用于完成 0.532μm 和 3.9μm 激光的产生、1.064μm 激光的分光以及 3 种波长的共孔径选择输出^[7-9]。

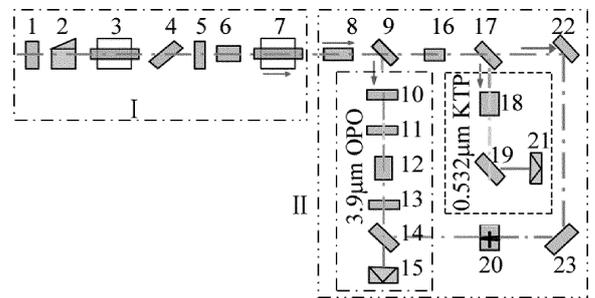


Fig. 4 General layout of experimental light path (I—fundamental frequency light path diagram; II—the output wavelength controllable common aperture laser output optical path; 1—total reflection mirror; 2—acousto-optic Q switch; 3, 7—pump chambers; 4, 9, 17—polarizer; 5—output mirror; 6—isolator; 8, 16—electro-optical crystal (LN); 10—focusing lens; 11—OPO total reflection mirror; 12—PPLT; 13—OPO output mirror; 14, 19—splitter mirror; 15, 21—dump; 18—KTP; 20, 22, 23—45° reflection mirror)

图 4 中 1, 2, 3, 4, 5 组成激光器振荡级,用于产生 1.06μm 激光。其中 1 为平凹的基频激光器全反镜,凹面镀 1.064μm 高反介质硬膜(反射率 R > 99.5%),

曲率半径 $\rho_1 = 2\text{m}$; 2 为声光调 Q 开关, 频率 10kHz ; 3 为激光二极管 (laser diode, LD) 侧抽运模块, 由激光二极管抽运阵列和激光增益介质 Nd:YAG 组成; 4 为偏振片; 5 为输出镜, 平平镜, 对 $1.06\mu\text{m}$ 透过率 $t = 20\%$; 6 为隔离器; 7 为与 3 同样功率的 LD 侧抽运模块, 用于激光能量的放大。

图 4 中 8, 9, 16, 17 组成光路切换装置, 主要用于基频 $1.06\mu\text{m}$ 激光到 $3.9\mu\text{m}$ 和 $0.532\mu\text{m}$ 激光光路的切换。其中 9, 17 为偏振器, 8, 16 为掺镁铌酸锂晶体, 该晶体掺铍 0.486mol , 掺镁 0.065mol , 掺锌 0.04mol , 晶体内部均匀性 $\Delta n_e < 3 \times 10^{-5}$, 晶体大小为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 16\text{mm}$ 。

图 4 中 10 ~ 15 组成 $3.9\mu\text{m}$ 激光产生光路, 用于产生 $3.9\mu\text{m}$ 激光。其中 10 为聚焦透镜, 镀 $1.064\mu\text{m}$ 增透介质硬膜, 透镜曲率半径 $\rho_2 = -300\text{mm}$ 。11, 12, 13 组成光参量振荡器, 实现 $3.9\mu\text{m}$ 波段激光输出。11 为中红外 OPO 腔全反镜, 靠近抽运源端镀 $1.064\mu\text{m}$ 增透介质硬膜 ($t > 99.9\%$), 靠近 PPLT 晶体的面镀 $1.4\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 高反膜 ($R > 99.9\%$) 和 $3.7\mu\text{m} \sim 4.0\mu\text{m}$ 高反膜 ($R > 99\%$)。13 为中红外 OPO 腔输出镜, 内侧镀 $1.06\mu\text{m}$ 介质硬增透膜 ($t > 98\%$), $1.4\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 高反介质硬膜 ($R > 99.8\%$) 和 $3.7\mu\text{m} \sim 4.0\mu\text{m}$ 部分透过介质硬膜 ($t = 20\%$)。12 为周期极化晶体 PPLT 晶体, 尺寸为 $50\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$, 极化周期为 $29.2\mu\text{m}$, 用于实现 2 阶非线性频率变换产生 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 波段激光输出。当 $1.06\mu\text{m}$ 抽运光入射 OPO 腔, 抽运周期极化晶体 PPLT 晶体, 产生 $1.46\mu\text{m}$ 信号光, 信号光在腔镜的反馈下开始振荡, 其和 $1.06\mu\text{m}$ 抽运光在 PPLT 内发生光参量振荡效应 ($\frac{2\pi}{3.9\mu\text{m}} = \frac{2\pi}{1.06\mu\text{m}} - \frac{2\pi}{1.46\mu\text{m}}$), 产生 $3.9\mu\text{m}$ 闲频光^[10]。14 为谐波反射镜, 对 $3.9\mu\text{m}$ 高反, 对剩余未转换激光增透。15 为光吸收器主要吸收剩余光^[11]。

图 4 中 18, 19, 21 组成 $0.532\mu\text{m}$ 激光产生光路, 用于产生 $0.532\mu\text{m}$ 激光。其中 18 为 KTP 晶体, 尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 7\text{mm}$; 19 为谐波反射镜; 21 为光吸收器, 用以吸收剩余 $1.064\mu\text{m}$ 激光。

图 4 中 22, 23 组成 $1.064\mu\text{m}$ 激光耦合光路, 用于将 $1.064\mu\text{m}$ 激光反射进电控扫描反射镜 20, 实现共孔径输出。其中 22 和 23 为 $1.064\mu\text{m}$ 45° 反射镜, 反射率为 99.9% 。

当激光器需要输出 $3.9\mu\text{m}$ 激光时, 8 号晶体加半波电压, $1.064\mu\text{m}$ 激光偏振面产生旋转, 激光经过偏振器 9 反射, 光进入 $3.9\mu\text{m}$ OPO 激光光路产生 $3.9\mu\text{m}$ 激光, 再经谐波反射镜 14 反射后, 进入反射镜 20 然后

输出 (电机控制的公用 45° 反射镜, 镀 3 种波长全反膜, 当需要那个波长输出, 电机控制反射镜对准那个激光输出口), 剩余未转换激光通过吸收器吸收^[12-13]。

当激光器需要输出 $0.532\mu\text{m}$ 激光时, 16 号晶体加半波电压, $1.064\mu\text{m}$ 激光偏振面产生旋转, 激光经过偏振器 17 反射, 光进入 $0.532\mu\text{m}$ 激光光路产生 $0.532\mu\text{m}$ 激光, 经谐波反射镜 19 反射后, 进入反射镜 20 然后输出, 剩余未转换激光通过吸收器吸收^[13-14]。

当激光器需要输出 $1.064\mu\text{m}$ 激光时, 8 号和 16 号晶体不加半波电压, 激光经过反射镜 22, 23 反射, 进入反射镜 20 然后输出。

当电源电流 42A 、调 Q 频率为 10kHz 的时, 在反射镜 20 后测得的 $1.064\mu\text{m}$ 激光最高输出功率为 100W 。当 8 号晶体加电, 在反射镜 20 后测得的 $3.9\mu\text{m}$ 激光输出功率如图 5 所示。实验中发现, PPLT 晶体出现绿、红及黄闪烁现象, 这是因为晶体产生了 2 阶非线性

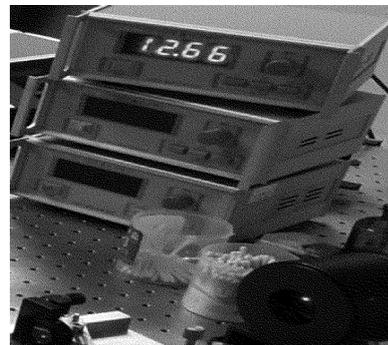


Fig. 5 $3.9\mu\text{m}$ laser output power

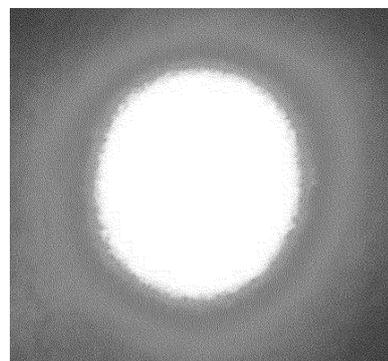


Fig. 6 $0.532\mu\text{m}$ laser image



Fig. 7 $0.532\mu\text{m}$ laser output power

效应,出现红绿黄光所致。

当16号晶体加半波电压时,在反射镜20后测得的光斑如图6所示。0.532 μm 激光输出功率为40W,如图7所示。

5 结论

利用激光放大技术,非线性周期极化PPLT晶体OPO技术,双MgO:LN电光开关激光切换技术及扫描反射镜技术,可以实现多种波长同口径激光高功率输出,实验结果表明:在电源电流42A、调Q频率10kHz及共孔径条件下,可实现40W的0.532 μm 、100W的1.064 μm 、12.6W的3.9 μm 激光选择性输出。

参考文献

- [1] MAO X J, BI G J, ZHU X B, *et al.* A novel increase polarized laser output oscillator[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(10):1044-1046 (in Chinese).
- [2] DEGNAN J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(2):214-220.
- [3] ZOU Y, MAO X J, BI G J, *et al.* LD side-pumped 10kHz picosecond regenerative amplifier[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9):983-985 (in Chinese).
- [4] WU Y, LONG X L, JIAO Zh X, *et al.* Optimal design of high power Nd:YAG laser based on compensation of thermal lens effect[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3):377-380 (in Chinese).
- [5] NAKAI S, KANABE T, KAWASHIMA T, *et al.* Development of high average power DPSSL with high beam quality[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2000, 4065:29-39.
- [6] YI J H, MOON H J, LEE J M. Diode-pumped 100W green Nd:YAG rod laser[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(18):3732-3737.
- [7] XIE Y Zh, WAN Y, DENG H R, *et al.* Study on mid-infrared laser PPMgLN optical parametric oscillators[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3):368-371 (in Chinese).
- [8] BI G J, ZHONG G Sh, MAO X J, *et al.* Research on double electro-optic Q-switch high repetition laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(5):510-512 (in Chinese).
- [9] CHO K H, RHEE B K. Intracavity infrared OPO using periodically poled Mg-doped stoichiometric LiTaO₃ for generating high average power[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, 6875:68751A.
- [10] YAN B X, BI Y, ZHOU M, *et al.* Highly efficient continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO:PPLN[J]. *Chinese Physical Letters*, 2010, 27(12):124203.
- [11] YIN X H, HOU L Q, DONG Y. Development of pumping configurations for high average power solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006(5):30-34 (in Chinese).
- [12] PENG X Y, XU L, ANAND A. Highly efficient high-repetition-rate tunable all-solid-state optical parametric oscillator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(1):53-61.
- [13] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S, *et al.* High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(2):105-107.
- [14] SONG Zh, LIU L R, ZHOU Y, *et al.* Effect of the polarization direction of incident light on electro-optic modulator for light propagation near the optical axis in LN[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3):319-322 (in Chinese).