

文章编号: 0258-7025(2007)11-1488-04

23.6 W 高效率 2 μm 激光器

谢 刚, 彭跃峰, 鲁燕华, 王卫民, 武德勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了一台高重复频率高效率 2 μm 激光器。理论计算了 1.064 μm 激光抽运 II 类相位匹配 KTP 晶体的角度调谐曲线, 得出 KTP 晶体按 $\varphi = 0^\circ, \theta = 54^\circ$ 切割可获得近简并波长的 2 μm 激光输出。使用 1.064 μm Nd:YAG 模块作为抽运源, 抽运内腔式双晶体走离补偿双谐振光参量振荡器(DROPO), 在 7 kHz 声光调 Q 频率下, 获得 23.6 W 的 2.12 μm 激光输出, 808 nm 激光二极管(LD) 出光获得 2 μm 激光的斜率效率超过 19%。

关键词 激光器; 2 μm 激光器; KTP 晶体; 光参量振荡器

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

High Efficiency 23.6 W, 2 μm Laser

XIE Gang, PENG Yue-feng, LU Yan-hua, WANG Wei-min, WU De-yong

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A high-repetition-rate high-efficiency 2 μm laser was demonstrated. The tuning curve of the type II phase matching KTP crystal pumped by 1.064 μm laser was calculated and it shows that when cut at $\varphi = 0^\circ, \theta = 54^\circ$, a KTP optical parametric oscillator (OPO) gets output at near degenerated wavelength at 2 μm . The pump source was 1.064 μm Nd:YAG module. Walk-off compensation was realized by two short crystals in intracavity doubly resonant optical parametric oscillator (DROPO) and the average power of 23.6 W at 2.12 μm is obtained. The pulse repetition frequency of acoustic-optic Q-switch was 7 kHz and the slope efficiency of 808 nm laser diode (LD) to 2 μm laser was higher than 19%.

Key words lasers; 2 μm laser; KTP crystal; optical parametric oscillator

1 引 言

随着固体激光技术的进步, 2 μm 激光在医学、光通信、遥感、雷达等方面逐渐显示出重要的应用前景。在军事上, 由于 2 μm 激光对大气和烟雾的穿透能力强, 可用于激光雷达和激光测距, 更重要的是能为有迫切需求的 3~5 μm 波段激光器提供理想的抽运源。用固体激光技术实现 2 μm 激光输出的方法有两种, 一种是用激光二极管(LD)抽运 Tm, Ho:YLF 或 Tm:YAG 激光器直接产生^[1], 近来又有报道使用 Tm, Ho:GdVO₄ 做增益介质^[2]。另一种是采用声光调 Q 的 1.064 μm 激光抽运 KTP 光学参量振荡器(OPO)^[3]。前一种方法获得的 2 μm 激光光束质量较好, 但稀土元素 Tm, Ho 属准三能级, 阈值

高, 而且需要在低温下工作, 制冷工序复杂。根据我们的应用需求选择了第二种方法。本文首先计算了 II 类相位匹配下 KTP 光学参量振荡器的 θ 角调谐曲线, 然后综合两种抑制走离效应方法的优点, 设计了一套采取两块短晶体光轴方向相对串接的内腔式双谐振光参量振荡器(DROPO)装置, 在 7 kHz 声光调 Q 频率下获得了平均功率 23.6 W 的 2 μm 激光输出。

2 KTP 晶体的角度调谐

光学参量振荡器能够产生很宽的可调谐相干输出, 并能将现有的激光波长转换到传统激光器无法达到的波段。随着性能优良的抽运源和非线性晶体技术的发展, 光参量振荡器的应用也越来越广泛。

收稿日期: 2007-02-08; 收到修改稿日期: 2007-06-27

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 谢 刚(1982—), 男, 四川人, 研究实习员, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术研究。

E-mail: eyesopen@126.com

通过对几种非线性晶体的性质进行比较, 选择了 KTP 作为光参量振荡器的工作物质。KTP 是一种优良的非线性晶体, 其透明范围 0.35~4.5 μm, 非线性系数较高, 硬度高, 化学性能稳定, 抗激光损伤阈值高, 且容易抛光及镀膜, 被广泛应用于倍频、混频和参量振荡。

KTP 属正交晶系, $mm2$ 点群, 是光学双轴晶体, 其塞耳迈耶尔 (Sellmeier) 方程为^[4]

$$\begin{cases} n_x^2 = 3.0065 + \frac{0.03901}{\lambda^2 - 0.04251} - 0.01327\lambda^2 \\ n_y^2 = 3.0333 + \frac{0.04154}{\lambda^2 - 0.04547} - 0.01408\lambda^2, \\ n_z^2 = 3.3134 + \frac{0.05694}{\lambda^2 - 0.05658} - 0.01682\lambda^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 n 为三波折射率, λ 为波长 (单位 μm)。在 KTP 晶体中, I 类相互作用的非线性系数很低, 没有实际用途, 对于 KTP 中 xz 平面 ($\varphi = 0^\circ$) 上的传播, II 类相互作用对应着正单轴晶体的 II 类相位匹配 ($o \rightarrow o + e$)。结合塞耳迈耶尔方程、参量振荡的能量方程和动量方程, 可计算得出信号光、闲频光关于 KTP 晶体 θ 角的调谐曲线, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 在一个较小的切割角范围内 (大约 $50^\circ \sim 55^\circ$), 可以获得 1.8~2.3 μm 的调谐激光输出。当信号光波长在 2 μm 附近时, 闲频光波长也在 2 μm 附近, 且当 $\theta = 52.6^\circ$ 时信号光和闲频光波长相等, 为简并波长 2.128 μm。

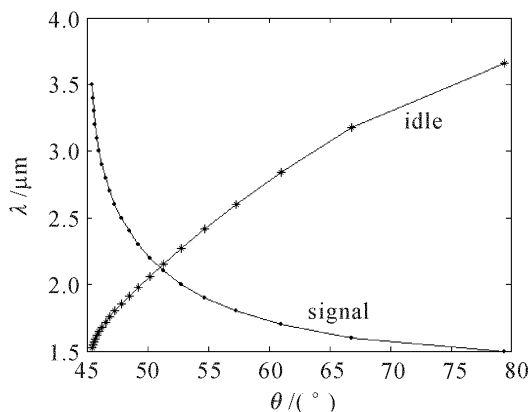


图 1 1.064 μm 激光抽运 II 类 KTP 光参量振荡器调谐曲线

Fig. 1 Tuning curves of type II KTP OPO pumped by 1.064 μm laser

3 双晶体走离补偿和内腔光参量振荡器

采用 KTP 光学参量振荡器必须注意晶体的走离效应。II 类匹配下, 当 KTP 晶体 θ 角在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 时, 产生 25 mrad 左右的离散角, 导致 o 光的抽运光

和信号光与 e 光的闲频光坡印廷矢量在空间上不能完全重合, 影响了光波间的互作用效率。为解决此问题, Eric Cheung 等^[5] 采用成对的性能一致的 6 块短晶体作为光参量振荡器的工作物质以对走离效应进行补偿从而实现高转换效率; 而 P. B. Phua 等^[6] 则把光参量振荡器放置在抽运源激光器的腔内以增加其振荡次数, 相当于增加了光参量振荡器有效作用长度, 获得了 6.5 W 的 2 μm 激光输出。在本实验中, 综合这两种方式的优点, 采用双晶体光轴方向相对串接的内腔光参量振荡器。双晶体一方面使走离效应得到补偿, 增加了晶体接收角, 允许发散角更大的激光参与抽运, 另一方面由于增益长度增加了近一倍, 有利于降低阈值和提高效率。同时由于采用内腔光参量振荡器, 极大地降低了起振阈值抽运功率, 可获得比外腔光参量振荡器更高的效率, 又避免了使用外腔光参量振荡器对抽运光能量和光束质量的苛刻要求。

由于目前国内 2 μm 波段镀膜能力的限制, 很难对波长相差不多的信号光和闲频光分别镀制高反膜和增透膜以实现单谐振光参量振荡 (SROPO), 另外由于单谐振光参量振荡的阈值很高^[7], 2 μm 膜层较低的抗激光损伤阈值也限制了单谐振光参量振荡的使用。于是选择了阈值比单谐振光参量振荡低得多的双谐振光参量振荡器。双谐振光参量振荡器的阈值可以表示为^[4]

$$|A_p|_{th}^2 = \frac{n_i n_s \omega_p^2 (1 - R_i^2) (1 - R_s^2)}{B_p^2 n_p^2 \omega_i \omega_s l^2 (R_i + R_s)^2} \times (\text{sinc}^2 \Delta k l / 2)^{-1}, \quad (2)$$

式中 A_p 为抽运光场振幅, $B_p = \frac{\omega_p}{2n_p c} \chi_{eff}$, $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别表示三波频率, n_p, n_s, n_i 分别表示三波折射率, c 为真空中光速, χ_{eff} 为有效非线性系数, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 为相位失配量, l 为有效晶体长度, R_s 和 R_i 分别为光参量振荡器输出镜对信号光和闲频光的反射率。当 $\Delta k = 0$ 时, 对于 $l = 30$ mm, 切割角 $\theta = 54^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $R_s = R_i = 60\%$ 的 KTP 光参量振荡器, 由 $I_{pth} = \frac{1}{2} n c \epsilon_0 |A_p|_{th}^2$ (ϵ_0 为真空介电常数) 计算其阈值抽运功率密度约为 3 MW/cm²。

对于内腔光参量振荡器, 其动态特性与抽运源紧密相关, 十分复杂, 没有解析解, 进行理论分析也比较困难。1996 年, T. Debuisschert 等^[8] 提出了内腔光参量振荡器的较简单模型, 仅适用于常用的单谐振光参量振荡器。

4 实验装置

2 μm 激光器实验装置如图 2 所示,其中,抽运源采用自行研制封装的激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 模块,输出波长 1.064 μm,激光棒尺寸为 φ3 mm×63 mm,最大可用激光二极管功率 240 W,激光二极管中心波长 808 nm。采用声光调 Q 重复频率为 4~10 kHz,输出 1.064 μm 激光的脉冲宽度约为几十纳秒。M₁~M₃ 都为平面镜,其中 M₁,M₃ 与 Nd:YAG 模块构成 1.064 μm 激光谐振腔,腔长约 32 cm,两镜均镀 1.064 μm 高反膜;而 M₂,M₃ 与 KTP 晶体又构成光参量振荡器。两块 KTP 晶体尺寸均为 8 mm×8 mm×15 mm,θ=54°,φ=0° 切割,通光面镀 1.064 μm 和 1.8~2.3 μm 增透膜,按图 2 中所示位置相对放置(小箭头为光轴方向),晶体使用铜夹具,夹具进行水冷。KTP 光参量振荡器长度约为 8 cm,两腔镜膜层参数为: M₂ 对 1.064 μm 激光高透,对 2.1 μm 激光全反; M₃ 对 1.064 μm 激光高反,对 2.12 μm 激光反射率为 60%。

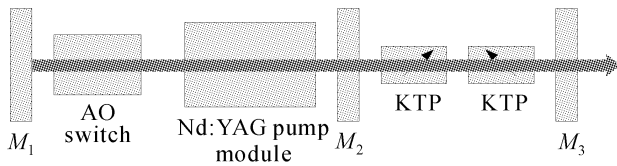


图 2 2 μm 激光器示意图
Fig. 2 Schematic of 2 μm laser

5 实验结果与分析

实验首先测量当激光二极管功率为 230 W,不加 KTP 光参量振荡器,输出镜 70% 反射时,系统输出 1.064 μm 激光 32 W,重复频率 7 kHz。然后加入 KTP 光参量振荡器进行调试。实验过程中遇到的主要问题是,腔内的高功率密度数次使系统膜层损伤,以及由于双谐振光参量振荡器固有的不稳定性造成谐振腔较灵敏而难于调试。经多次实验之后,在 7.0 kHz 重复频率下获得了平均功率 23.6 W 的较稳定的 2 μm 激光输出,其输出功率与 808 nm 激光二极管抽运功率关系曲线如图 3 所示。由图 3 可见,光参量振荡开始的激光二极管阈值功率约 102 W。2 μm 输出功率近似与激光二极管功率成线性关系,2 μm 功率的增长规律也符合对 1.064 μm 谐振腔的设计。通过拟合,得到 808 nm~2 μm 的斜率效率为 19.6%。在最大输出功率 23.6 W 时,808 nm~2 μm 的光-光转换效率达到 10.1%,此时输入电功率约 560 W,电光效率为 4.2%。

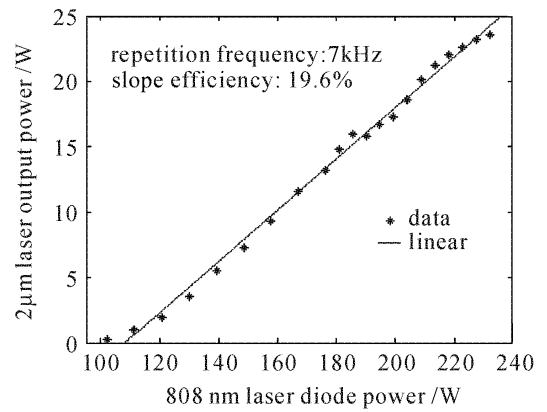


图 3 2 μm 激光输出功率曲线图
Fig. 3 Output power of 2 μm laser

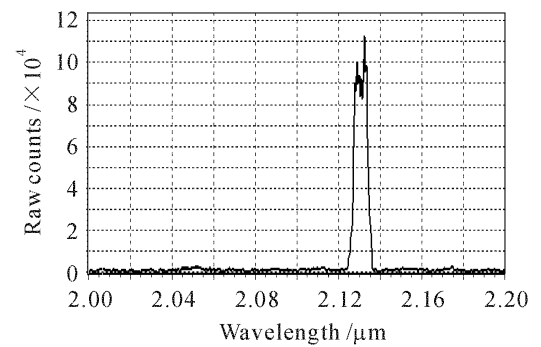


图 4 2 μm 激光光谱
Fig. 4 Spectrum of 2 μm laser

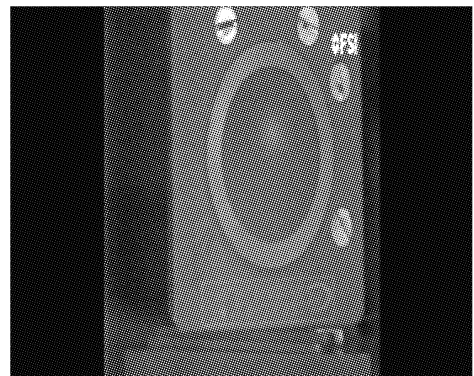


图 5 红外相机拍摄的 2 μm 激光强度分布图
Fig. 5 Schematic of 2 μm laser intensity distribution caught by IR CCD

测量输出功率 15 W 时的 2 μm 激光光斑直径为 2.1 mm,水平和垂直方向的光束质量因子分别为: M_x² = 5, M_y² = 9。对光谱进行了测量,如图 4 所示。可以看出,信号光和闲频光均在简并波长 2.128 μm 附近,符合 KTP 的角度调谐原理。信号光和闲频光光谱边缘有重叠,光谱宽度为几个纳米。

图 5 是用红外(IR)相机拍摄的 2 μm 强度分布图,用 Matlab 提取其灰度得到三维分布如图 6 所示。由图 6 与高斯分布比较可见,输出的 2 μm 光强分布仅在中心处有一峰较强,推测原因可能是激光

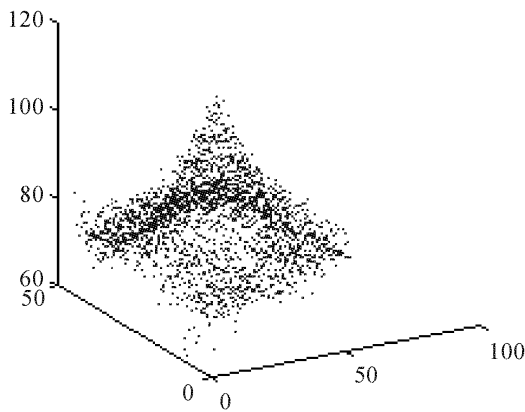


图 6 Matlab 提取灰度三维分布

Fig. 6 Three-dimensional distribution distilled by Matlab

棒端面有一小点膜层损伤,光斑总体分布较好。

6 结 论

以自行研制封装的激光二极管抽运 Nd:YAG 模块为抽运源,设计了一台 2 μm 激光器。采用 KTP 晶体 II 类相位匹配,双晶体走离补偿内腔光参量振荡器,在 7 kHz 的声光调 Q 频率下,获得了平均功率 23.6 W 的 2 μm 激光输出。在以后的工作中,将对系统进行改进,以便获得 1.064 μm 基模抽运光,进一步提高效率及系统的稳定性并使系统更加紧凑。

参 考 文 献

- 1 Yufeng Li, Baoquan Yao, Zhenguo Wang *et al.*. Tunable CW Tm, Ho:YLF laser at 2 μm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8): 470~471
- 2 Yao Baoquan, Zhang Xingbao, Wang Yuezhu *et al.*. Fiber-coupled diode end-pumped double Tm, Ho:GdVO₄ laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):964~967
姚宝权,张兴宝,王月珠等. 光纤耦合二极管端泵 2 μm CW 双掺 Tm, Ho:GdVO₄ 激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7):964~967
- 3 Wang Keqiang, Han Long, Wang Jianjun *et al.*. LD pumped intracavity OPO high repetition frequency 2 μm laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(Suppl.):185~188
王克强,韩 隆,王建军等. 二极管泵浦腔内 OPO 高重复频率 2 μm 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):185~188
- 4 Lu Yanhua, Wang Weimin, Peng Yuefeng *et al.*. Intracavity KTP doubly resonant optical parametric oscillator pumped by Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):189~191
鲁燕华,王卫民,彭跃峰等. 内腔式 Nd:YAG 激光抽运 KTP 双谐振光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):189~191
- 5 Eric Cheung, Stephen Palese, Hagop Injeyan *et al.*. High power optical parametric oscillator source [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**:55~59
- 6 Poh Boon Phua, Kin Seng Lai, Ruifen Wu. Multiwatt high-repetition-rate 2- μm output from an intracavity KTiOPO₄ optical parametric oscillator [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9):1435~1439
- 7 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6):415~431
- 8 T. Debuisschert, J. Raffy, J.-P. Pochelle *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7):1569~1587