

文章编号: 0258-7025(2009)01-0033-04

46 W 腔内光参量振荡高重复频率 2 μm 激光器

彭跃峰 谢刚 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 报道了采用 1064 nm 激光抽运 KTP 晶体内腔光参量振荡(OPO)技术实现高重复频率、高效率 2 μm 激光输出的实验结果。理论计算了 KTP OPO 双谐振抽运阈值,提出了内腔 KTP OPO 设计思路。激光器采用两块相同的 KTP 晶体光轴相向放置以补偿走离效应,KTP 晶体按 $\varphi = 0^\circ, \theta = 53^\circ$ 切割以获得近简并波长 2.128 μm 激光输出。在 808 nm 激光二极管抽运功率为 470 W,声光 Q 开关工作频率为 7.5 kHz 的条件下,获得平均功率 46.5 W,波长 2.128 μm 激光输出,光-光转换效率为 9.89%,斜率效率为 14.5%,光束质量 $M^2 < 2.8$ 。

关键词 激光器;2 μm 激光器;KTP 晶体;光参量振荡

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093601.0033

Intracavity Optical Parametric Oscillator High-Repetition-Rate 2 μm Laser with 46 W Output Power

Peng Yuefeng Xie Gang Wang Weimin Wu Deyong

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

Abstract The experimental results of high-repetition-rate and high-efficiency 2 μm laser is demonstrated on intracavity optical parametric oscillator (OPO) in KTP pumped by 1064 nm laser. The pumping threshold of KTP doubly resonant OPO is calculated, and the design method of intracavity KTP OPO is proposed. Walk-off compensation is realized by a pair of identical KTP crystals. When cut at $\varphi = 0^\circ, \theta = 53^\circ$, a KTP OPO could get output at near degeneration wavelength of 2.128 μm . The average output power of 46.5 W at 2.128 μm is obtained under the condition of 470 W laser diode pump power at 808 nm and the acoustic-optical Q-switching repetition rate of 7.5 kHz. The optical-optical efficiency is 9.89%, the slope efficiency is 14.5% and the M^2 of the output beam is less than 2.8.

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

1 引言

2 μm 波段激光在医学、光通信、遥感、雷达等方面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。采用固体激光技术实现 2 μm 激光输出的方法主要有两种,一种是由激光二极管直接抽运 Tm, Ho 晶体产生 2 μm 激光输出^[1~4];另一种是通过 1064 nm 激光抽运非线性晶体获得 2 μm 激光输出^[5~8]。稀土元素 Tm, Ho 属准三能级结构,抽运阈值高,要获得高效率激光输

出,需要采用低温工作方式,同时对抽运功率密度要求也较高,特别是目前受 2 μm 波段 Q 开关技术限制,在高功率情况下,要获得高重复频率(千赫兹)高效率激光输出比较困难,目前获得的百瓦级功率输出均为连续工作方式^[1~3],某种程度上限制了其应用。

本文理论计算了 KTP 光参量振荡(OPO)双谐振抽运阈值,提出了内腔 KTP(OPO)2 μm 激光器设计思路,采用 1064 nm 激光抽运 KTP 晶体内腔 OPO 技术,在频率 7.5 kHz 时,获得了功率超过 46 W,简并波长 2.128 μm 激光输出,从二极管激光 808 nm 转换为 2 μm 激光输出斜率效率为 14.5%,光-光转换效率为 9.89%,光束质量 $M^2 < 2.8$ 。

收稿日期:2008-03-11;收到修改稿日期:2008-06-11

作者简介:彭跃峰(1978-),男,助研,硕士,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术研究工作。

E-mail: qiaopyf@yahoo.com.cn

2 KTP OPO 双谐振阈值计算

实验中采用的两块 KTP 晶体参数为: $\theta = 53^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $d_{24} = 3.64 \text{ pm/V}$, $d_{15} = 1.91 \text{ pm/V}$ 。根据文献[7,8]中的 KTP OPO II 类匹配角度调谐曲线可知:当 $\theta = 52.36^\circ$ 时,信号光和闲频光波长刚好相等,均为 $2.128 \text{ }\mu\text{m}$,发生简并谐振,形成双谐振振荡。具有返回抽运光束的双谐振简并波长输出光学参量振荡器抽运阈值为

$$I_{\text{th}} = \frac{1 - \sqrt{R}}{2} \times \frac{1.12}{k g_s l_{\text{eff}}^2 (1 + \gamma)^2} \times \left(\frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2 \quad (1)$$

式中 k 为耦合常量,定义为 $k = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{\lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c}$, d_{eff} 为有效非线性系数。 γ 为后向与前向抽运强度比, g_s 为信号空间模耦合系数,定义为 $g_s = \frac{1}{1 + (\omega_s/\omega_p)^2}$, ω_p 为抽运光光斑尺寸, ω_s 为信号光光斑尺寸。 l_{eff} 为有效参量增益长度,定义为: $l_{\text{eff}} = (\pi^{1/2} \omega_p)/(2\rho)$, ρ 为双折射离散角。 α 为吸收系数, l 为晶体长度, L 为腔长, c 为光速, t_p 为抽运脉冲全宽, R 为输出镜反射率, P_n 为噪声功率, P_s 为阈值信号功率。

在简并波长匹配角度 $\theta = 52.36^\circ$ 时, ρ 约为 25 mrad ,当抽运光斑为 1.3 mm 时, l_{eff} 约为 46 mm ,超过了晶体的长度, l_{eff} 就取晶体长度 $l = 30 \text{ mm}$ 。(1)式中等式右边第一项表示的是信号光功率在从噪声水平 P_n 增大到阈值信号水平 P_s 所需的建立时间内造成的抽运光束损耗,取 $\ln(P_s/P_n) = 33$ 。本实验方案中, $R = 60\%$, $t_p = 100 \text{ ns}$, $\gamma \approx 1$, $g_s = 0.5$,有效非线性系数 $d_{\text{eff}} \approx (d_{24} - d_{15}) \sin 2\varphi \sin 2\theta - (d_{15} \sin^2 \varphi + d_{24} \cos^2 \varphi) \sin \theta = -2.8823 \text{ pm/V}$, $L = 50 \text{ mm}$, $\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$,将这些参量代入(1)式可得到阈值功率密度 $I_{\text{th}} = 2.576 \text{ MW/cm}^2$ 。

KTP OPO 抽运阈值理论计算结果、抽运模块增益系数以及转换效率与抽运功率密度的关系为内腔 OPO 激光器设计提供了参考依据,是获得高效率 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光器的关键技术环节。首先根据抽运模块增益系数,计算采用该抽运模块开展 1064 nm 激光实验的最佳输出镜反射率,即可知道 KTP OPO 谐振腔的转换效率设计值;其次,结合晶体膜层损伤阈值,OPO 抽运阈值计算公式以及转换效率与抽运功率的关系曲线合理设计谐振腔光斑大小,KTP 晶体长度, $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出镜反射率等,就可以获得高效率 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光器设计参数。目前 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 波段镀膜

技术不是很成熟,损伤阈值较低,为了避免高功率情况下晶体的损伤,可以考虑采用高反射率 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出镜,大模体积谐振腔结构等系统参数设计,降低抽运阈值,从而减小获得高转换效率的腔内功率密度。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验方案采用 1064 nm 激光抽运 KTP 晶体内腔 OPO 技术获得简并波长 $2.128 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出,其由激光二极管抽运的 Nd:YAG 抽运模块,声光(AO)Q开关, $\lambda/4$ 波片,补偿透镜,两块相向放置的 KTP 晶体和三块腔镜组成,如图 1 所示。 M_1, M_2, M_3 均为平面镜, M_1 对 1064 nm 反射率大于 99.5% , M_2 对 1064 nm 透过率大于 97% ,对 $2.12 \text{ }\mu\text{m}$ 反射率大于 99.5% , M_3 对 1064 nm 反射率大于 99.5% ,对 $2.12 \text{ }\mu\text{m}$ 反射率为 60% 。 M_2 和 M_3 腔镜构成 $2 \text{ }\mu\text{m}$ KTP OPO 谐振腔。系统采用两块相向放置的 KTP 晶体有效补偿了走离效应,KTP 采用 II 类匹配方式,切割角 θ 为 53° , φ 为 0° ,晶体尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,两个端面均镀 $2.12 \text{ }\mu\text{m}$ 和 1064 nm 激光增透膜。在总抽运功率一定的情况下,晶体棒参数设计,KTP 晶体质量和参数设计, 1064 nm 大模体积谐振腔参数设计和 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光谐振腔参数设计是获得高效率、高光束质量 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出的关键。Nd:YAG 抽运模块晶体棒直径设计为 4 mm ,声光 Q 开关器件工作在数千赫兹。经过计算,在简并波长输出时,KTP 晶体的走离长度比较小,约为 46 mm ,要获得高效率 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出需采用两块相同的短 KTP 晶体相对放置,补偿激光间的走离。采用多块短晶体相向放置补偿走离效应,有利于获得高效率 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出。因为采用 1064 nm 激光抽运 KTP 晶体内腔 OPO 技术获得简并 $2.128 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出允许接收角很小,所以实验方案设计为大模体积腔结构,提高了光束质量,减小了腔内光束的发散角,有利于提高 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光输出转换效率和光束质量。

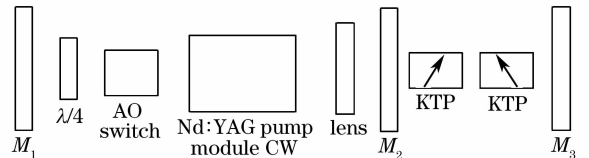


图 1 内腔 KTP OPO $2 \text{ }\mu\text{m}$ 激光器示意图

Fig. 1 Schematic of intracavity KTP OPO $2 \text{ }\mu\text{m}$ laser

3.2 实验结果与分析

根据图 1 设计的装置开展了实验研究,在激光二极管抽运功率约 470 W,频率 7.5 kHz 时,2 μm 激光输出功率 46.5 W,从 808 nm 到 2 μm 激光输出斜率效率为 14.5%,光-光转换效率为 9.89%,如图 2 所示。该实验装置的转换效率略低于文献[8]发表的输出功率 23.6 W 的 2 μm 激光器,主要原因是该激光器采用的抽运模块(自行研制的)中激光二极管抽运波长的一致性稍差,并且与 Nd:YAG 的中心吸收波长有稍许偏差,同时该抽运模块采用的二极管激光器更多,封装难度更大一些,造成耦合效率和吸收效率稍低,热效应比以前采用的抽运模块严重,系统优化设计难度加大。从图 2 可以看出,2 μm 激光输出没有出现饱和效应,相信随着腔镜和晶体膜层抗损伤阈值的提高,进一步提高抽运功率,可以获得更高功率的 2 μm 激光输出。在采用对 1064 nm 激光反射率为 70%的输出镜代替 2 μm 激光 OPO 谐振系统,并且腔内引入对 1064 nm 激光 3%单程损耗情况下,在激光二极管抽运功率约 470 W,工作频率 7.5 kHz 时,1064 nm 激光输出功率约为 61 W。因为 2 μm KTP OPO 谐振腔系统可以等效为 1064 nm 激光输出镜,所以通过比较 1064 nm 和 2 μm 激光输出功率,得出通过优化设计可以进一步提高 2 μm 激光转换效率。通过优化设计抽运模块参数(提高 808 nm 到 1064 nm 激光转换效率),腔模体积,2 μm 谐振腔输出镜反射率,采用多块短晶体相对放置等参数来提高转换效率,目前该系统正在优化,以进一步提高 2 μm 激光转换效率和输出功率。目前中红外镀膜技术不成熟,在某种程度上影响了系统优化设计和实验的有效开展。2 μm 激光输出光谱如图 3 所示,信号光和闲频光中心波长基本重合,可以通过进一步精细调节两块 KTP 晶体的角度使其完全重合,获得完全简并波长激光输出。由于所用光谱仪和采用测量方法测量精度的原因,并不能准

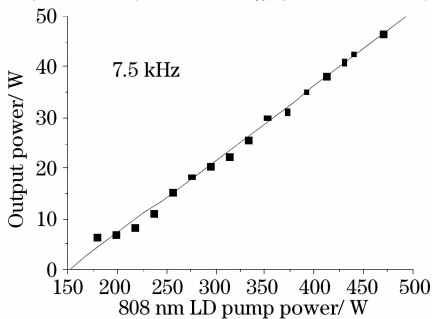


图 2 激光输出功率与抽运功率的关系曲线

Fig.2 Laser output power versus pump power

确测出 2 μm 激光谱线宽度,实际线宽比图 3 所示的要窄。

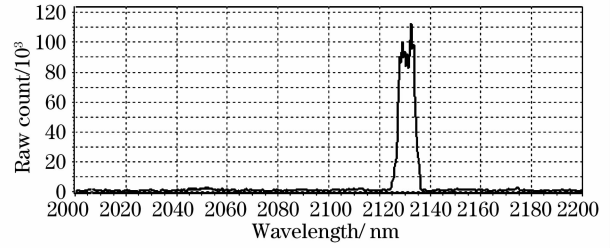


图 3 输出激光光谱

Fig.3 Laser output spectrum

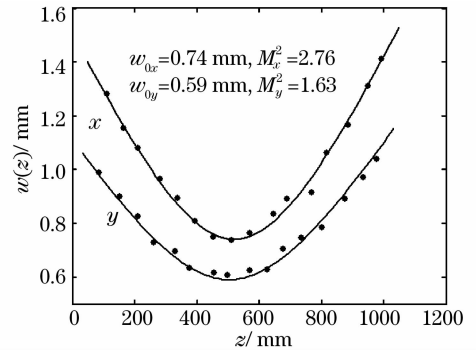


图 4 光斑半径非线性拟合曲线

Fig.4 Nonlinear fitting curve of spot radius

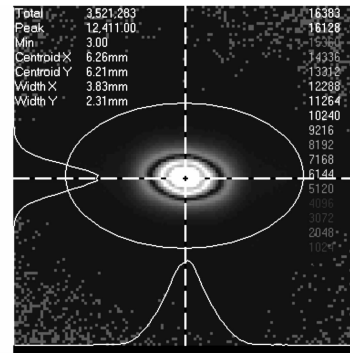


图 5 2 μm 激光光斑近场分布

Fig.5 Near-field intensity distribution of 2 μm laser beam

使 2 μm 激光光束通过焦距为 500 mm 的聚焦透镜,聚焦透镜离输出镜约 500 mm,通过测量不同位置的光斑大小,采用光束传输方程

$$w^2(z) = w_0^2 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi w_0}\right)^2 (z - z_0)^2 \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长, z₀ 为光波传输方向上束腰的位置, w₀ 为束腰大小; w(z) 为位置 z 处光斑大小。拟合得,两个方向的光束质量分别为 M_y² = 1.63 和 M_x² = 2.76,如图 4 所示。图 5 为距离激光器输出腔镜约 350 mm 处的近场光斑分布,输出光斑为椭圆型,分析其主要原因为 KTP OPO 允许接收立体角在水平面和垂直面(KTP 晶体光轴与激光器轴向

所在的面)上不一致造成的,在垂直方向相位匹配较水平方向严格,只有发散角小的低阶激光模式能实现相位匹配,光束质量较好;同时激光系统中其他元器件(例如 Nd:YAG 抽运模块)在两个方向的不对称也有一定的原因。

4 结 论

对 KTP OPO 进行了理论分析,提出了采用 1064 nm 激光抽运 KTP 晶体内腔 OPO 获得 2 μm 激光输出的设计思想。采用激光二极管抽运的 Nd:YAG 模块为抽运源,设计了一台 2 μm 激光器, KTP 晶体采用 II 类相位匹配,双晶体走离补偿内腔 OPO 结构,在重复频率 7.5 kHz 时,获得了功率 46.5 W 的 2 μm 激光输出。随着中红外波段镀膜技术的提高和系统优化设计,可以进一步提高输出功率和转换效率。下一步工作是改用偏振激光输出的晶体材料(例如 Nd:YVO₄)代替 YAG 晶体材料以获得 1064 nm 激光偏振输出,从而可以降低腔内功率密度,减小 2 μm 红外膜层损伤的可能性,为进一步优化设计提供更大空间。

参 考 文 献

- 1 K. S. Lai, P. B. Phua, R. F. Wu *et al.* . 120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser[J]. *Opt. Lett.* , 2000, **25**(21): 1591~1593
- 2 Jianfeng Wu, Zhidong Yao, Jie Zong *et al.* . Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser[J]. *Opt. Lett.* , 2007, **32**(6): 638~640
- 3 Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Steven B. Sutton *et al.* . 115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.* , 1997, **33**(9): 1592~1600
- 4 Stuart D. Jackson, Alex Sabella, Alex Hemming *et al.* . High-power 83 W holmium-doped silica fiber laser operating with high beam quality[J]. *Opt. Lett.* , 2007, **32**(3): 241~243
- 5 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
- 6 P. B. Phua, K. S. Lai, R. F. Wu. Coupled tandem optical parametric oscillator(OPO): an OPO within an OPO[J]. *Opt. Lett.* , 1998, **23**(16): 1262~1264
- 7 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
- 8 Xie Gang, Peng Yuefeng, Lu Yanhua *et al.* . High efficiency 23.6 W, 2 μm laser[J]. *Chinese J. Lasers* , 2007, **34**(11): 1488~1491
谢刚,彭跃峰,鲁燕华等. 23.6 W 高效率 2 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1488~1491