

文章编号: 0253-2239(2010)05-1447-04

高功率 MgO:PPLN 光参变振荡器

魏星斌^{1,2} 彭跃峰¹ 王卫民¹ 陈兴无¹ 刘 东¹ 李德明¹

(¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

(² 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了一台高功率中红外激光器。通过理论计算,得到了光参量振荡器输出波长随 MgO:PPLN 晶体温度变化的调谐曲线,分析了晶体热膨胀对输出波长的影响;通过声光调 Q,Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 激光作为抽运光,抽运掺氧化镁的周期性极化铌酸锂晶体(MgO:PPLN),利用光参量振荡(OPO)技术实现了 1.75 μm 和中红外 2.71 μm 激光输出。当重复频率为 7 kHz,抽运光功率为 104 W 时,总的平均输出功率为 53.2 W,转换效率为 51%。从转换曲线上看,并没有达到饱和区域,因此在晶体损伤阈值以下,增加抽运光功率,OPO 的输出功率将会有所提高。

关键词 非线性光学;中红外激光;光参变振荡器;PPLN 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1447

High-Power MgO:PPLN Optical Parametric Oscillator

Wei Xingbin^{1,2} Peng Yuefeng¹ Wang Weimin¹ Chen Xingwu¹ Liu Dong¹ Li Deming¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Graduate University of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A high-power mid-infrared laser is presented. The temperature-dependent tuning curve of the output wavelength of OPO is obtained through theoretical calculation, and the wavelength change with the effect of the crystal's heat expansion is analyzed. The MgO doped periodically poled lithium niobate (MgO:PPLN) is pumped by an acoustic-optical Q-switched Nd:YAG laser. Using the optical parametric oscillator (OPO) configuration, an average power of 53.2 W for both 1.75 μm and 2.71 μm laser is obtained when the pump power is 104 W, at the repetition rate of 7 kHz, the conversion efficiency is 51%. The conversion curve doesn't reach the saturated area, so the output power should increase with a higher pump power under the damage threshold of the crystal.

Key words nonlinear optics; mid-infrared laser; optical parametric oscillator (OPO); periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal

1 引 言

中红外激光光源在光通讯、环境监测、医疗诊断和红外对抗等领域有着广泛的应用前景。中红外激光在海平面上传输受到气体分子的吸收和悬浮物的散射小,对大气和烟雾等具有较强的穿透力,可用于激光雷达和激光测距。中红外激光器主要有:气体激光器、化学激光器、二极管激光器、稀土掺杂固体激光器和光参变振荡器(OPO)等。OPO 相对于其他类型

的中红外激光器具有调谐范围宽(1~12 μm)、全固化、结构紧凑和输出功率高等优点^[1,2]。

2005 年,Chen 等通过 Yb 掺杂的光纤激光器抽运 MgO:PPLN 晶体,采用单谐振的光参变振荡器结构,得到了波长 3 μm ,超过 10 W 的连续激光输出,光束质量 $M^2 = 2.8$ ^[3];2007 年,Schellhorn 等利用调 Q, Ho:YAG 激光器抽运 ZGP 晶体,输出波长调谐范围为 3~5 μm ,当重复频率为 10 kHz 时,输

收稿日期: 2009-05-26; 收到修改稿日期: 2009-07-03

作者简介: 魏星斌(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: wishingbeing@hotmail.com

导师简介: 陈兴无(1968—),男,研究员,硕士生导师,主要从事激光器技术方面的研究。E-mail: Chenxw@caep.com.net

输出功率为 10.6 W, 20 kHz 时, 输出功率为 8.5 W, 光光转换效率超过 8.8% (从激光二极管 792 nm 到中红外波段)^[4]; 2008 年, 彭跃峰等报道了通过声光调 Q, Nd:YAG 激光器抽运 MgO:PPLN 晶体, 重复频率为 8 kHz, 1064 nm 激光抽运功率为 94 W 时, 3.84 μm 中红外激光平均输出功率为 11.2 W^[5]。

本文理论上计算了光参量振荡器输出的中红外激光波长的温度调谐曲线, 分析了 MgO:PPLN 晶体热膨胀对输出波长的影响; 实验上以声光调 Q, Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 激光作为抽运源, 经耦合系统后, 抽运光斑与 MgO:PPLN 晶体截面相匹配, 采用单谐振 OPO 结构, 在重复频率 7 kHz 下, 抽运光功率为 104 W 时, 获得了信号光 1.75 μm 和闲频光 2.71 μm 总的平均输出功率为 53.2 W, 转换效率为 51%。

2 理论分析

通过准相位匹配实现光参变振荡, 可以避免空间走离效应, 利用晶体中最大的非线性极化系数, 提高转换效率。MgO:PPLN 是目前应用最广泛、技术最成熟的实现准相位匹配的非线性晶体。它的最大非线性系数 $d_{33}=27.4$ pm/V, 比其他常用非线性晶体高很多。PPLN-OPO 输出波长可以通过抽运光波长调谐、极化周期调谐、角度调谐和温度调谐。晶体在升温过程中, 除了折射率的变化外, 晶体的热膨胀将导致极化周期的变化, 也会对输出波长带来影响。尚未见研究过 MgO:PPLN 晶体热膨胀对输出波长影响的报道。

光参变振荡属于典型的非线性三波混频过程, 需要满足能量守恒和动量守恒(相位匹配)方程。

能量守恒方程:

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

共线相位匹配方程:

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

折射率方程^[6]:

$$n_c^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2, \quad (3)$$

式中

$$f = (t - 24.5)(t + 570.82), \quad (4)$$

式中 $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_s$ 分别为抽运光波长、闲频光波长和信号光

波长, t 为温度, n_p, n_i, n_s 分别为抽运光折射率、闲频光折射率和信号光折射率, Λ 为非线性晶体的极化周期, $a_1 = 5.756, a_2 = 0.0983, a_3 = 0.2020, a_4 = 189.32, a_5 = 12.52, a_6 = 1.32 \times 10^{-2}, b_1 = 2.860 \times 10^{-6}, b_2 = 4.700 \times 10^{-8}, b_3 = 6.113 \times 10^{-8}, b_4 = 1.516 \times 10^{-4}$ 。

考虑晶体的热膨胀, 若温度为 t_0 时, 极化周期为 $\Lambda(t_0)$, 则当温度为 t 时, 极化周期可以表示成^[7]

$$\Lambda(t) = \Lambda(t_0)[1 + c(t - t_0)], \quad (5)$$

式中 $c = 2.0 \times 10^{-6}/K$ 为晶体的热膨胀系数^[8]。由(1)~(4)式计算可得光参变振荡器输出波长的温度调谐曲线, 将(5)式代入(2)式中, 可以得到考虑 MgO:PPLN 晶体热膨胀时的温度调谐曲线。两条曲线如图 1 所示, 以室温下晶体极化周期为 31.9 μm, 抽运光波长 1064 nm 为例。图中右侧虚线是未考虑晶体热膨胀时输出波长随温度变化的曲线, 左侧实线是极化周期随温度变化的调谐曲线。当晶体温度变化范围为 20 °C~140 °C 时, 相应的闲频光波长调谐范围为 2.1~2.7 μm。当温度较低时, 两条曲线基本重合, 晶体热膨胀对输出波长的影响可以忽略。但是到了简并区域(闲频光和信号光波长相同, 均为 2.1 μm)的某一特定温度下, 晶体热膨胀引起的波长变化约为几十纳米。在一些温度更高, 调谐范围更大的应用中(100 °C~250 °C)^[9], 晶体热膨胀效应对输出波长将带来更大的影响。从图中可以看到, 极化周期为 31.9 μm, 抽运波长为 1064 nm 时, 室温下可获得中红外波段 2.71 μm 的激光输出。

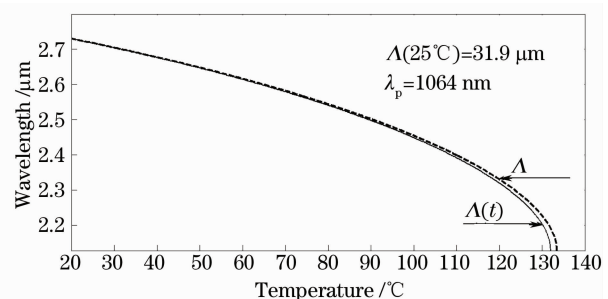


图 1 PPLN 晶体热膨胀对输出波长的影响曲线

Fig. 1 Curves of the output wavelength with the effect of the crystal's heat expansion

3 实验研究

3.1 实验装置

实验方案采用单谐振, 外腔光参变振荡结构。抽运源采用本单位自行研制封装的二极管抽运 Nd:YAG 模块, 1064 nm 激光输出采用平凹腔结构, 经耦合系统调整光斑大小和形状后, 抽运 MgO:PPLN 晶体。实验

装置如图 2 所示。M1, M3, M4 均为平面镜, M1 对 1064 nm 激光高反, M2 为凹面镜, 对 1064 nm 激光反射率为 50%, M3 对 1064 nm 激光高透, 对 1.75 μm 和 2.71 μm 激光高反, M4 对 1.75 μm 激光高透, 对 2.7 μm 激光部分反射。声光调 Q 开关重复频率调谐范围为 1~10 kHz。通过对不同重复频率下, 激光器输出特性的研究, 选择了输出功率高而稳定的 7 kHz 作为抽运光的重复频率。抽运激光采用双 Nd:YAG 棒结构, 中间放入石英旋转片进行退偏补偿。OPO 采用 $e \rightarrow e+e$ 相位匹配, 在抽运光腔内放置一偏振片(P), 输出的抽运光为线偏振光。M1-M2 构成抽运光谐振腔, 输出的抽运光经耦合系统整形后, 抽运 MgO:PPLN 晶体。抽

运光斑与晶体的横截面大小和形状相匹配, 有利于提高转换效率以及防止晶体端面的损伤。PPLN 晶体中 MgO 的摩尔掺杂浓度为 5%, 极化周期为 31.9 μm , 体积为 40 mm \times 4 mm \times 1 mm。晶体两端面镀有 1.064, 1.75 和 2.71 μm 激光高透膜。M3 和 M4 构成 OPO 谐振腔, 理论上腔长越短, 单位时间内抽运光和参量光通过晶体的次数越多, 输出功率和转换效率越高。因此, OPO 的腔长基本与 MgO:PPLN 晶体长度相当。但是考虑到晶体后端面更容易损伤, 故 M4 离后端面稍有距离。MgO:PPLN 晶体固定在铜制夹板上, 有利于保持晶体内部温度的均匀性, 且便于光路调节时晶体位置的调整, 整个晶体工作在室温条件下。

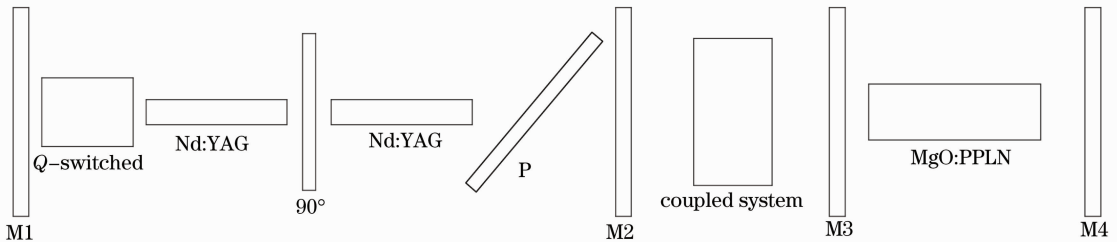


图 2 MgO:PPLN OPO 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the MgO:PPLN OPO

3.2 实验结果和分析

根据图 2 的实验装置图进行了实验研究。首先对抽运激光源开展了研究, 比较了不同重复频率、不同反射率的输出透镜、不同腔长对 1064 nm 激光输出特性的影响, 最终得到了高功率且比较稳定的 1064 nm 激光源, 在 110 W 时, 光束质量 $M^2 < 2$ 。OPO 总的平均输出功率与抽运光功率的关系曲线如图 3 所示。当抽运光功率为 104 W, 重复频率为 7 kHz 时, OPO 总的平均输出功率为 53.2 W, 转换效率为 51%。从图中转换曲线可以看到, 整个工作区域并未达到饱和, 因此随着抽运光功率的提高, OPO 的输出功率将会有所提高。但是, 考虑到晶体损伤阈值的限制, 没有再加大抽运光功率。

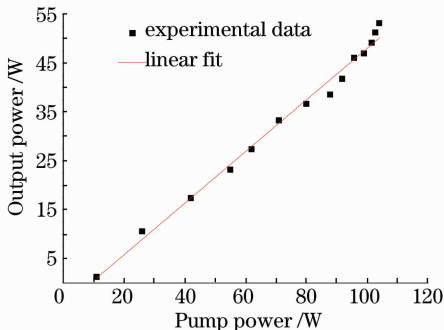


图 3 激光器输出功率与抽运光功率关系曲线图

Fig. 3 Laser output power versus pump power

在 M4 后加入分光镜, 测量 2.71 μm 激光功率。理论上, 2.71 μm 激光占整个输出功率的 39.2%, 但是实际测得的 2.71 μm 激光约占整个输出功率的 34%。2.71 μm 激光功率的减少可能来源于 MgO:PPLN 晶体在长波段存在更强的吸收损耗, 以及目前国内在中红外镀膜工艺上的不足。

输出的激光光谱如图 4 所示, 中心波长分别为 1.75 μm 和 2.71 μm , 与之前理论计算的温度调谐曲线结果相符。影响激光器输出波长和线宽的因素有很多。MgO:PPLN 晶体的折射率随温度变化敏感, 在实验过程中 MgO:PPLN 晶体温度的变化和晶体内部温度的不均匀性, 以及前面提到的晶体热膨胀, MgO:PPLN 晶体的极化周期的不均匀性等都会对输出波长和线宽带来影响。

4 结 论

理论上分析了 MgO:PPLN 晶体热膨胀对输出波长的影响, 在较高温度和简并输出附近, 晶体热膨胀对输出波长具有较大影响。实验上利用 Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 激光作为抽运源, 抽运 MgO:PPLN 晶体, 采用单谐振光参量振荡结构, 当抽运光功率为 104 W, 重复频率为 7 kHz 时, 光参量振荡器输出的 1.75 μm 激光和中红外 2.71 μm 激光

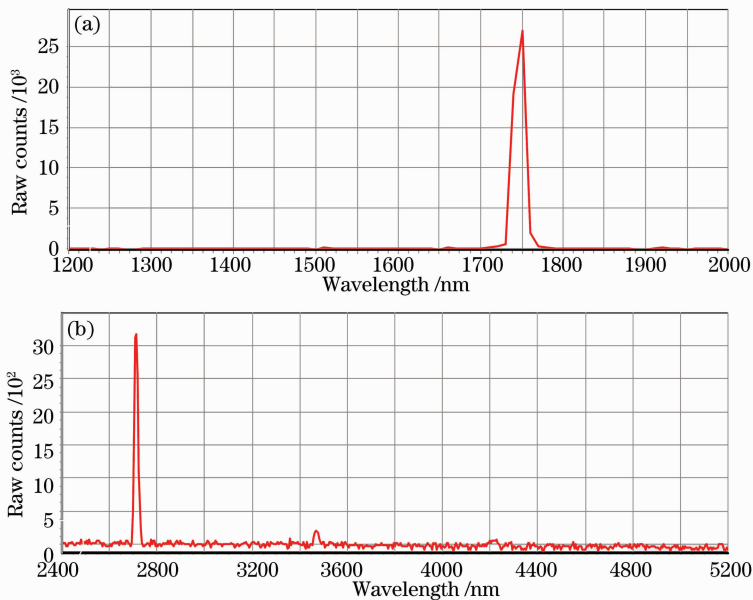


图4 输出的激光光谱图。(a) 中心波长为 $1.75 \mu\text{m}$; (b) 中心波长为 $2.71 \mu\text{m}$

Fig. 4 Laser output spectrum, central wavelength is: (a) $1.75 \mu\text{m}$; (b) $2.71 \mu\text{m}$

总的平均功率为 53.2 W , 转换效率为 51% 。

目前通过 OPO 机制产生中红外激光功率的提高, 主要受限于非线性晶体低的损伤阈值。大体积的非线性晶体可以承受更高功率的抽运光, 有利于获得更高功率的中红外激光输出。考虑到 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ 晶体损伤阈值的限制, 抽运光功率没有再向上提升。在非线性晶体低的损伤阈值未能得到解决的前提下, 可以通过光参量放大(OPA)和多光束合成技术获得高功率的中红外激光输出。

参 考 文 献

- 1 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3): 217~220
姚宝权, 王月珠, 王 骐. 中红外光参量振荡器发展状况分析 [J]. *激光技术*, 2002, **26**(3): 217~220
- 2 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator high-repetition-rate $2 \mu\text{m}$ laser with 46 W output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 33~36
彭跃峰, 谢 刚, 王卫民等. 46 W 腔内光参量振荡高重复频率 $2 \mu\text{m}$ 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 33~36
- 3 D. W. Chen, T. S. Rose. Low noise 10-W cw OPO generation near $3 \mu\text{m}$ with MgO doped PPLN [C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics*, 2005, 1-3: 1829~1831

- 4 M. Schellhorn, M. Eichhorn, C. Kieleck *et al.*. High repetition rate mid-infrared laser source [J]. *C. R. Physique*, 2007, **8**(10): 1151~1161
- 5 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang *et al.*. $3.8 \mu\text{m}$ mid-infrared laser with 11.2 W output power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(Supplement): 82~85
彭跃峰, 王卫民, 谢 刚等. 11.2 W 中红外 $3.8 \mu\text{m}$ 激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(增刊): 82~85
- 6 O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO -doped congruent and stoichiometric LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(3): 343~348
- 7 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 670~674
彭跃峰, 鲁燕华, 谢 刚等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 670~674
- 8 Zhang Kecong, Wang Ximin. *Science of the Nonlinear Optical Crystal Materials (Second Edition)* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 272
张克从, 王希敏. *非线性光学晶体材料科学 (第二版)* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 272
- 9 Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Low-threshold widely-tunable intracavity Q-switched $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{PPLN}$ optical parametric generator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1643~1647
纪 峰, 姚建铨, 张百钢等. 低阈值宽调谐的内腔调 Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{PPLN}$ 光学参量产生 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1643~1647