

可调谐中红外 OPO 激光器研究

包照日格图, 张大勇, 冯宇彤, 张利明
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要: 研究了一种中红外可调谐 OPO 激光器, 泵浦源为输出能量 200 mJ 能量的 1.06 μm Nd:YAG 激光器, OPO 采用 XZ 平面内二类匹配的 KTP-OPO, 实现了信号光 1.5 ~ 2.0 μm 、闲频光 2.3 ~ 3.6 μm 的波长调谐, 光光转换效率 10% 以上。

关键词: 中红外激光; 可调谐 OPO; KTP 晶体

中图分类号: TN244 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.005

Research on tunable mid-infrared OPO laser

BAO Zhao-ri-ge-tu, ZHANG Da-yong, FENG Yu-tong, ZHANG Li-ming
(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: Presented in this paper is the study of a mid-infrared tunable OPO laser with a pump source of 200 mJ, 1.064 μm Nd:YAG laser. The OPO uses type two matching KP-OPO in XZ plane. Signal-frequency of 1.5 ~ 2.0 μm and idler frequency of 2.3 ~ 3.6 μm are obtained. The wavelength is continuously tunable. The light to light conversion efficiency is better than 10%.

Key words: mid-infrared laser; tunable OPO; KTP crystal

1 引言

光参变振荡器(OPO)提供了从可见到红外的可调谐相干辐射,已广泛应用于激光同位素分离、燃烧诊断、大气污染的遥测、光雷达等方面^[1-2]。在军事应用领域连续可调谐中波红外激光辐射源可作为干扰源使用,国外已经开始研发并有一些产品问世。可调谐激光器的种类很多,主要分终端声子固体激光器、色心激光器、染料激光器及光参量振荡器。由于光参量振荡器方法可以实现较宽范围的调谐激光输出,因此它成为现今的研究热点,如德国 GWU 公司研发的 spitscan 200/IR,英国 M Squared laser 公司的 firefly IR-OPO。国内四川大学^[3]也进行该方面的理论研究。我们采用了高峰值功率 1064 nm 激光泵浦的角度调谐 KTP-OPO,实现了信号光 1.5 ~ 2.0 μm 、闲频光 2.3 ~ 3.6 μm 的连续波长调谐,转换效率 20%,脉宽 18 ns,为相关领域的研究奠定了基础。

2 理论设计

2.1 低振荡阈值 OPO 设计

对于宽调谐 OPO 激光器来讲要实现它的高效运转,其泵浦功率密度至少为阈值的 4 倍以上^[4]。所以在有限的泵浦强度下尽量降低 OPO 阈值是关键所在。

对于单程泵浦方式,OPO 的阈值可以描述为:

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

$$k = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{\lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c} \quad (2)$$

$$l_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\pi \omega_p}}{2\rho} \quad (3)$$

作者简介:包照日格图(1974-),男,硕士,副研究员,主要从事全固态激光器技术和光参量振荡器技术研究。E-mail:baokun2008@sina.com

收稿日期:2011-10-27;修订日期:2012-04-12

其中, k 为耦合常量; g_s 为模式耦合系数(阈值附近约 0.85); l_{eff} 为有效增益长度; L 为光学腔长; t_p 为基频光的脉冲宽度; R 为 OPO 的输出耦合率。理论计算表明对阈值影响最大的因素就是有效的参量增益长度 l_{eff} 的平方和晶体的非线性系数 d_{eff} 的平方。晶体的非线性系数 d_{eff} 越大 OPO 的阈值就会越低越容易起振, 晶体的双折射走离角越小, 有效的增益长度就越长, 越有利于降低 OPO 阈值, 进而提高 OPO 转换效率。表 1 是适合调谐 OPO 的三种晶体的性能差别。

表 1 几种适用于中红外可调谐 OPO 激光的非线性晶体

	LN	KTP	KTA
有效非线性系数/($\text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$)	3.5	2.5	2.5
走离角/mrad	50	35	40
损伤阈值/($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	100	500	500

非线性系数最大的晶体是 LN 晶体但该晶体的损伤阈值较低不利于高峰值功率激光的泵浦的应用, 走离角最小的晶体是 KTP 晶体有利于增加有效增益长度并且非线性系数也不低, 最终选用了 KTP 晶体作为 o 工作物质。图 1 是利用振荡阈值的表达式(1) 计算得到的 OPO 阈值与晶体长度之间的关系曲线, 可以看到随着晶体长度的增加 OPO 阈值明显下降, 最终选定的晶体长度是 50 mm。

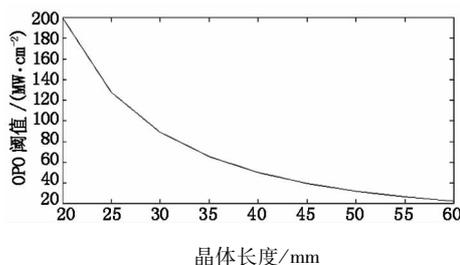


图 1 晶体长度与 OPO 阈值的关系

Fig. 1 the value of the crystal length and OPO threshold

2.2 角度调谐 KTP-OPO 设计

目前实现宽波段调谐的方法主要有温度调谐和角度调谐, 其中温度调谐简单方便但精度不够、调谐速度慢、可适用的晶体很少(如 LN), 考虑到 LN 晶体的抗激光损伤能力较低的原因, 本项目中未采用。角度调谐是我们采用的技术路线, 难点是要尽量减少插入损耗同时在尽量小的调谐角度范围内实现宽波段调谐。

晶体中传播的三个光波达到相位匹配时应满足

动量守恒 ($\Delta k = 0$), 即:

$$\frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i} = \frac{n_p}{\lambda_p} \quad (4)$$

其中, $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_p$ 分别代表信频光、闲频光、基频光; n_s, n_i, n_p 代表信频光、闲频光、基频光的折射率。图 2 是根据 KTP 晶体的色散方程结合相位匹配条件(公式(4)) 仿真计算出来的 XZ 平面内调谐曲线, 可以看出调谐曲线的简并点在 52° 左右, 从 $45^\circ \sim 48^\circ$ 及 $56^\circ \sim 77^\circ$ 都可以实现 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的调谐。 $56^\circ \sim 77^\circ$ 角度范围内调谐因为调谐角度范围过大(约 20°) 将会导致插入损耗的增加不适合实现稳定的宽调谐激光输出。 $45^\circ \sim 48^\circ$ 调谐虽然非线性稍微小了一些(约 2.5 PM/V) 但调谐角度范围较窄、插入损耗较小, 是最终的方案选择。

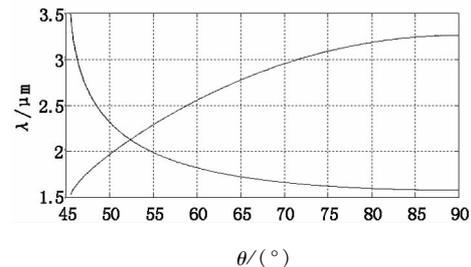


图 2 KTP 晶体的相位匹配曲线

Fig. 2 phase-matching curve of KTP

3 实验装置

根据上面理论分析进行了相关的方案设计, 具体的光路图如图 3 所示。

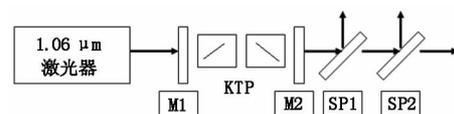


图 3 可调谐 OPO 的实验结构图

Fig. 3 experimental setup of tunable OPO

其中, 基频光为输出能量约 200 mJ、脉冲宽度 8 ns、光束发散角 1 mrad 的 Nd:YAG 激光器; OPO 由两块走离补偿的 KTP 晶体、M1 镜片、M2 镜片组成, M1 镜片对基频光高透过、对信频光($1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$) 高反射、对闲频光($2.3 \sim 3.6 \mu\text{m}$) 高反射; M2 镜片对信频光($1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$) 部分反射、对闲频光($2.3 \sim 3.6 \mu\text{m}$) 高透过、对基频光高透过; SP1 对基频光高反射、信频光($1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$) 高透过、闲频光($2.3 \sim 3.6 \mu\text{m}$) 高透过; SP2 对信频光($1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$) 高透过、对闲频光($2.3 \sim 3.6 \mu\text{m}$) 高反射。OPO 的工作介质为 XZ 平面内二类匹配的 KTP 晶体, 两块 KTP 晶体的晶轴互为反向, 以形成走离补偿, 切割角为

$\theta = 48^\circ$ 。由图3,最终实现了宽调谐激光输出。

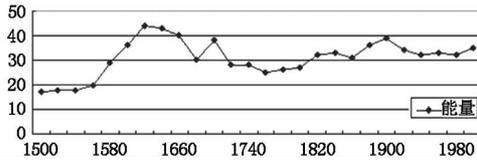


图4 信频光的激光能量

Fig. 4 signal wave of energy

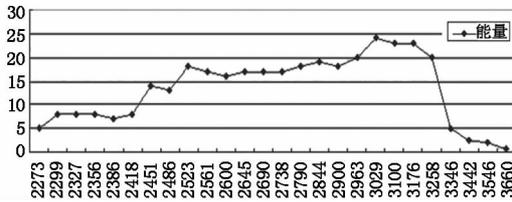


图5 闲频光的激光能量

Fig. 5 Idler wave of energy

从图4、图5可以看到,在很长一个波长范围内信频光30 mJ左右、闲频光15 mJ左右。信频光波段的平均转换效率约15%,闲频光的转换效率约10%。其中闲频光在3.3 μm 以后激光能量迅速减弱,可解释为该波段KTP晶体的吸收增大导致能量减弱,与之对应的信频光波段(1.5 ~ 1.57 μm)的能量也相应减弱。

4 结 论

中红外可调谐激光器在光谱学及军事领域(如中波红外激光干扰)都有重要的应用价值和前景。本文通过角度调谐KTP-OPO的方法首次在实验台上实现了1.5 ~ 3.6 μm 范围内连续波长调谐,OPO转换效率在信频光波段15%、闲频光波段10%,脉冲宽度约18 ns,为以后的基础研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] T C hasenberg, et al. "Demonstration of 3.5 μm GaInSb/InAs supperlattice laser diode" [J]. Electron. Lett., 1995, 31(2): 275 - 276.
- [2] A M Baranov, et al. 2.7 ~ 3.5 μm InAsSb(P)/InAsSbP low threshold diode laser[J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 64(5): 2480 - 2482.
- [3] Peng Ling, Ren Gang, Huang Wei, et al. Numerical analyses of the allowed parametrical errors in tunable OPO[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(6): 823 - 826.
- [4] W Kish Nile. Solid state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2001.