

Ar⁺ 激光器泵浦的连续光学参量振荡器的理论设计

邴丕彬¹, 丁春峰¹, 姚建铨^{1,2}, 郑义^{1,3}, 李忠洋¹, 王冠军¹

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052;

2. 天津大学激光与光电子研究所, 天津 300072; 3. 北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要:对 Ar⁺ 激光器产生的 514.5nm 的连续光泵浦 KTP 晶体的光学参量振荡器(CW - KTP - OPO)做了理论分析, 讨论了 KTP 晶体采用 II 类临界相位匹配(CPM)时的角度调谐曲线、有效非线性系数以及走离角, 并针对所设计的条件计算了 KTP 晶体的泵浦阈值。合理设计腔内各个器件的参数, 最终确定晶体切割角度为 $\theta = 67^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, 此时可以产生中心波长为 1.55 μm 的信号光。

关键词:连续波光参量振荡器(CW - OPO); KTP 晶体; Ar⁺ 激光器; 临界相位匹配

中图分类号: TN753.91; TN248.1 **文献标识码:** B

The Theoretical Design of Continue Wave Optical Parametric Oscillator Pumped by Ar⁺ Laser

BING Pi-bin¹, DING Chun-feng¹, YAO Jian-quan^{1,2}, ZHENG Yi^{1,3},

LI Zhong-yang¹, WANG Guan-jun¹

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electronic Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. Institute of Laser and Optoelectronics of Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A general theoretical of continue wave optical parametrical oscillator that KTP crystal pumped by an Ar⁺ laser at 514.5nm was analyzed. It was discussed that the angle-tuning curve, the effective nonlinear coefficient and walk-off angle when the KTP crystal pumped with the phase-matching of the type-II, the pumped threshold power was counted under this condition. The parameter of the apparatus was well designed, the cutting angle of KTP crystal was conformed $\theta = 67^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, a signal wave with 1.55 μm center wavelength was presented.

Key words: continuous-wave optical parametric oscillator (CW-OPO); KTP crystal; Ar⁺ laser; critically phase-matched

1 引言

光学参量振荡器(OPO)的理论最早是在1962年由 Korll 提出的^[1], 1965年美国的贝尔实验室的 J. A. Giordmaine 和 R. C. Miller 首先用 GaWO₃ND 激光器抽运 LiNbO₃ 晶体, 实现脉冲光学参量振荡^[2]。随着近年来一些新型而高效的非线性晶体的出现及

应用, OPO 以其结构简单, 调谐范围大, 工作可靠, 转换效率高, 可以实现小型化与全固化的优势, 广泛应用于 CARS(相干反斯托克斯拉曼散射)谱测量、

基金项目: 郑州大学校内培育基金资助项目。

作者简介: 邴丕彬(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性频率变换。E-mail: bing463233@163.com

收稿日期: 2007-08-27; 修订日期: 2007-10-15

激光分离同位素、人眼安全测距仪、军事上可应用于红外干扰、成像等领域^[3-4]。

目前脉冲参量振荡技术已经比较成熟,已经达到商品化。连续波光参量振荡器(CW-OPO)具有窄线宽和宽调谐的输出优势,但是由于受非线性晶体抽运率,以及抽运光源稳定性的限制,发展一直落后于脉冲 OPO。现在只有几家研究机构报道过关于连续波光参量振荡器的实验研究,效果都不太理想。

Ar⁺激光器稳定性非常好,产生的 514.5nm 的连续光具有很好的方向性和单色性,另外,它还是目前在可见光区域连续输出功率较高的激光器。用连续的 514.5nm 的光泵浦非线性晶体,理论上可以通过角度调谐,得到连续、稳定、可调谐的光参量光输出,可以提供激光彩色显示、光信息存储、光通信等领域的理想光源,为 OPO 的研究开拓新途径。本文从理论上分析了 KTP 晶体作为 CW-OPO 晶体的可行性,并以此为基础优化了腔型设计。

2 相位匹配

由于参量激光对工作物质材料特性的要求十分苛刻:要实现宽调谐必须有宽广的透过谱和可匹配范围;要有效地产生参量光,必须具有较高的有效非线性系数;要求高功率激发,晶体要有很高的光损伤阈值;为了实用化,材料要有优良的可加工性和抗潮、抗腐蚀等性能;最后,这些材料还得易于生长成高质量大体积的单晶。

磷酸氧钛钾 KTiOPO₄ (简称 KTP)属正双轴晶体,具有非线性系数大,破坏阈值高,温度带宽大,不易潮解,易加工,在 0.35~4.5μm 范围有优良的透光性能等优点,已成为目前频率变换技术中最广泛使用的非线性晶体之一。

本文对 Ar⁺激光器产生的 514.5nm 的连续光泵浦 KTP 晶体的光参量振荡器进行了理论分析,选择 KTP 晶体采用 II 类临界相位匹配(CPM),根据折射率椭球方程和 KTP 晶体的色散方程,令 φ=0°,编程可以得到 KTP 晶体在 x-z 面内的调谐曲线,如图 1 所示。

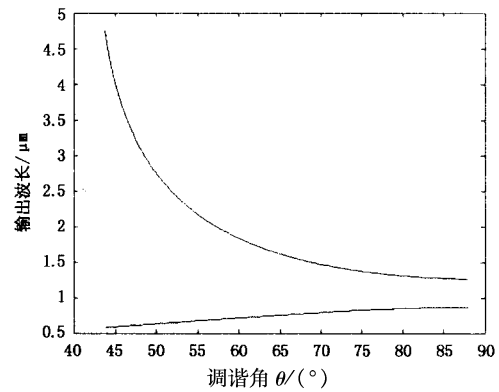


图1 KTP 晶体在 x-z 平面的调谐曲线

Fig.1 tuning curve of the KTP crystal in x-z plane

从图 1 中可以看出,在 x-z 平面内的调谐曲线简并点处有一空隙,通过分析可以知道,这与 φ 的取值有关,适当调节 φ 的取值可以消除空隙。因为这个空隙不影响使用,我们这里不做具体分析。

3 有效非线性系数

有效非线性系数是衡量晶体优良的标准之一,三波相互作用效率在很大程度上取决于有效非线性系数的大小。J. Seres 总结了前人的实验结果,给出的数据与实际比较接近^[5],即: $d_{31} = 2.15, d_{32} = 4.3, d_{33} = 16.2, d_{24} = 3.7, d_{15} = 1.8$ 。

根据 Robert C. 等人的文章中^[6]给出求有效非线性系数的简化公式:

$$d_{\text{eff}} = (d_{24} - d_{15}) \sin 2\theta \sin 2\varphi - (d_{15} \sin^2 \varphi + d_{24} \cos^2 \varphi) \sin \theta \quad (1)$$

采用 II 类临界相位匹配(CPM)时 φ=0°, d_{eff} 随 θ 角变化的调谐曲线如图 2 所示。

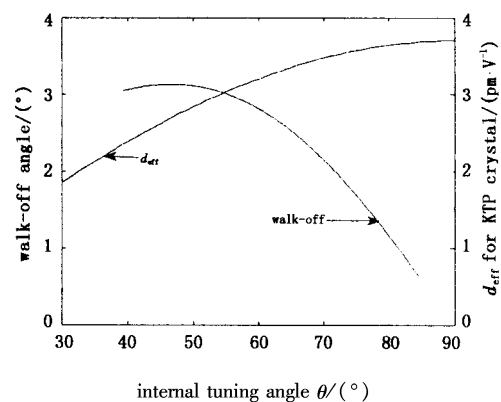


图2 KTP-OPO 的有效非线性系数和走离角

Fig.2 Walk-off angle and effective nonlinear coefficient

4 走离角

在进行非线性光学频率变换时,e 光光波的波矢方向与能流传播方向不同而存在一夹角即光波走

离角, 走离角的大小十分关键。若走离角过大, 将大大增加衍射和反射损耗, 从而降低耦合效率, 提高了泵浦阈值, 所以选取合适的相位匹配方向与方式必须使走离角尽量小。临界相位匹配(CPM)情况下, 走离角可由下式^[7]给出:

$$\rho = \arctan \left[\sqrt{\frac{n_{iz}^4 \sin^2 \theta}{(n_{ix}^2 - n_i^2)^2} + \frac{n_{ix}^4 \cos^2 \theta}{(n_{iz}^2 - n_i^2)^2}} \right]^{-1} \quad (2)$$

走离角随调谐角的变化如图2所示。很明显, 走离角随调谐角的增大而递减。在 θ 的取值趋向于 90° 时, 对应图1中简并处的空隙, 与匹配角的讨论吻合。

5 泵浦阈值

根据单谐振(SRO)时输出镜反射率与泵浦阈值功率的关系^[8]:

$$I_{3t}^s = \frac{4n_p(1-R_2)}{\mu_0 c \sigma_s \sigma_i l^2} = \frac{4n_p n_s n_i c(1-R_2)}{\omega_s \omega_i d_{\text{eff}}^2 \mu_0 l^2} = \frac{P_{\text{th}}}{\pi r^2} \quad (3)$$

其中, R_2 为输出镜的反射率; d_{eff} 为晶体的有效非线性系数; P_{th} 为泵浦阈值功率; l 为腔的长度; r 为泵浦光光束半径。

Ar^+ 激光器输出 514.5nm 的绿光, 光束半径为 $r_0 = 1\text{mm}$, 设计经过一个 100 倍的聚焦透镜后泵浦 KTP 晶体, 此时光束半径 $r = 10\mu\text{m}$, 腔长取 100mm, 晶体尺寸为 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 10\text{mm}$, $\theta = 67^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, 此时 $d_{\text{eff}} = 3.4$, 通过角度调谐可以产生中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光, 单谐振时数值模拟输出镜反射率与泵浦阈值功率的关系如图3所示。

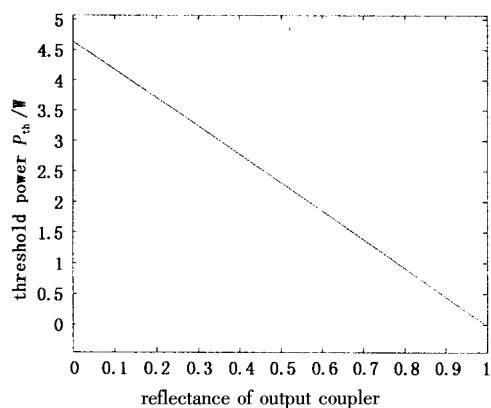


图3 SRO 中输出镜反射率与泵浦阈值的关系

Fig.3 the relationship between pumped threshold power and reflectance of output couple in SRO

通过图3可以看出, 当KTP晶体采用II类临界相位匹配(CPM), 在输出镜反射率 $R_2 = 90\%$ 条件下, 泵浦阈值功率 $P_{\text{th}} < 0.5\text{W}$, 而 Ar^+ 激光器输出 514.5nm 时的功率可以达到 6W 以上, 满足实验需求。

6 结束语

模拟计算了 Ar^+ 激光器产生的 514.5nm 的连续光泵浦 KTP 晶体的 OPO, KTP 晶体选择采用 II 类临界相位匹配, 取 $\theta = 67^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, 此时可以产生中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光, 处于通讯用人眼安全波段, 比较实用。

参考文献:

- [1] N M Kroll. Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tunable oscillators at optical frequencies [J]. Phys. Rev., 1962, 127(4): 1207-1211.
- [2] J A Giordmaine, R C Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO_3 at optical difference frequency [J]. Phys. Rev. Lett., 1965, 14(24): 973-976.
- [3] T H Allik, S Chandra, W W Hovis, et al. Advances in optical parametric oscillators with application to remote chemical sensing [J]. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 1998, 3383: 58-64.
- [4] A Fix, V Weiss, G Ehret. Injection-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapour DIAL [J]. Pure Appl. Opt., 1998, 7: 837-852.
- [5] Jean-Jacques Zondy, MohaMed Abed, Salah Khodja. Twin-crystal walk-off-compensated type-II second-harmonic generation; single-pass and cavity-enhanced experiments in KTiOPO_4 [J]. J. Opt. Soc. Am. B., 1994, 11(12): 2368-2370.
- [6] Robert C Eckardt. Absolute and relative nonlinear optical coefficients of KDP, $\text{KD} * \text{P}$, BaB_2O_4 , LiIO_3 , MgO : LiNbO_3 , and KTP measured by phase-matched second-harmonic generation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(5): 922-933.
- [7] YanTang, Cameron F, Christian Rahlff, et al. Low-threshold, high-efficiency, widely tunable infrared source from a KTP-based optical parametric oscillator [J]. J. Opt. Soc. Am. B., 1997, 12(14): 3442-3451.
- [8] 蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 300-302.