

文章编号:1001-5078(2007)11-1161-04

Ar⁺ 激光器泵浦的连续波 KTP 光学参量振荡器研究

刘 强¹, 丁春峰², 邵丕彬², 郑 义², 姚建铨^{2,3}

(1. 安徽工程科技学院生物化学工程系,安徽 芜湖 241000;2. 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;3. 天津大学激光与光电子研究所,天津 300072)

摘要:对 Ar⁺ 激光器泵浦的连续波 KTP 光参量振荡器(cwKTP - OPO)进行了理论研究。讨论了 KTP - OPO 的相位匹配,计算了 KTP 的有效非线性系数、走离角及允许角,数值模拟了 KTP - OPO 的转换效率和振荡阈值。同时,分析了相位失配、晶体长度以及输出镜耦合率对转换效率和阈值的影响。本文对连续波 KTP 光参量振荡器的初步设计和优化有一定的参考价值。

关键词:非线性光学;连续波光参量振荡器(cw - OPO);KTP 晶体;相位匹配;角度调谐

中图分类号:TN753.2 **文献标识码:**A

Theoretical Research of Continuous Wave KTP Optical Parametric Oscillator Pumped by Ar⁺ Laser

LIU Qiang¹, DING Chun-feng², BING Pi-bin², ZHENG Yi², YAO Jian-quan^{2,3}

(1. Department of Biochemical Engineering, Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China;2. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electronic Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;3. Optoelectronics Information Science and Technology Laboratory, Institute of Laser & Opto-electronics, Tianjin University, Tianjin 300072; China)

Abstract: A general theoretical research of continuous wave KTP optical parametric oscillator (cw-OPO) is taken. Based on conservation of energy and momentum respectively calculation of phase match, effective nonlinear coefficient, walk-off angle, acceptance angle, conversion efficiency, and threshold were set forth. At the same time, the impact of the phase-mismatch, the crystal length, and the output couple's reflectivity on the conversion efficiency and the threshold of a cw-OPO was analyzed. This paper is of some reference value to the design and optimization of continuous wave KTP optical parametric oscillator.

Key words: nonlinear optics; continuous wave optical parametric oscillator (cw-OPO); KTP crystal; phase-matching; angle-tuning

1 引言

光学参量振荡器(OPO)作为一种宽带可调谐、高相干的激光光源,以其独特的优良特性在许多领域已显示出越来越广泛的应用前景,一直吸引众多研究者的兴趣。连续波光参量振荡器(cw - OPO)由于受非线性晶体转换效率,以及抽运光源功率和稳定性的限制,发展一直比较缓慢。1968年,Smith 等人以倍频的 Nd : YAG 激光器作为泵浦源(532nm),利用 Ba₂NaNb₅O₁₅ 晶体首先实现了世界上

第一台连续波双共振光学参量振荡器^[1]。差不多同时,Byer 等人利用氩离子(514nm)激光器作为泵浦源,首先实现了基于 LiNbO₃ 晶体的可见光连续波双共振光学参量振荡器^[2]。1988 年,Piskarskas 等人实现了连续波锁模激光器同步泵浦的光学参量振荡器^[3](双共振结构),晶体为 Ba₂NaNb₅O₁₅,泵浦

作者简介:刘 强(1982-),男,硕士研究生,从事非线性光学与光电子技术方面的研究。E-mail:lqsh6@126.com
收稿日期:2007-05-08

源为倍频的主动锁模 Nd:YAG 激光器。1993 年, Yang 等人利用倍频的 Nd:YAG 激光器(532nm)首先实现了连续波 KTP 单共振光学参量振荡器^[4]。自 20 世纪 90 年代中期,伴随着周期极化晶体的出现,基于周期极化晶体和准相位匹配技术的光学参量振荡器成为研究的热点^[5]。但是受极化晶体的厚度、长度、质量和成本的限制,周期极化准相位匹配技术仅应用于低功率和低能量的光学参量振荡器^[6]。KTP 晶体具有优良的光学特性,并且其生长技术成熟、市场价格较低,所以对连续波 KTP-OPO 的研究具有较高的科研和商业价值。

2 相位匹配

参与三波相互作用的泵浦光,信号光和空闲光实现有效参量振荡,必须同时满足动量守恒条件和能量守恒条件,即:

$$k_i + k_s = k_p \quad (1)$$

$$\omega_i + \omega_s = \omega_p \quad (2)$$

式中, k_i, k_s, k_p 分别代表信号光、空闲光及泵浦光的波矢; $\omega_i, \omega_s, \omega_p$ 代表对应光波的圆频率。对于 KTP 晶体而言,其 I 类相位匹配的有效非线性系数比 II 类相位匹配的有效非线性系数小得多,因此一般采用 II 类相位匹配。双轴晶体的 II 类相位匹配条件为:

$$\omega_s / \sqrt{-B_s - \sqrt{B_s^2 - 4C_s}} + \omega_i / \sqrt{-B_i + \sqrt{B_i^2 - 4C_i}} = \omega_p / \sqrt{-B_p + \sqrt{B_p^2 - 4C_p}} \quad (3)$$

式中, $B = -\sin^2 \theta \cos^2 \varphi (b + c) - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi (a + c) - \cos^2 \theta (a + b)$

$$C = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi bc + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi ac + \cos^2 \theta ab$$

$$a = n_{jx}^{-2}, b = n_{jy}^{-2}, c = n_{jz}^{-2}$$

其中, θ, φ 为波矢 \mathbf{K} 在晶体中的传播方向; n_{jl} ($j = p, s, i; l = x, y, z$) 为光波在晶体主轴方向的折射率,其值可由 KTP 晶体的色散方程算出^[7]:

$$\begin{aligned} n_x^2 &= 3.0065 + \frac{0.03901}{\lambda^2 - 0.04251} - 0.01327 \lambda^2 \\ n_y^2 &= 3.0333 + \frac{0.04154}{\lambda^2 - 0.04547} - 0.01408 \lambda^2 \\ n_z^2 &= 3.3144 + \frac{0.05694}{\lambda^2 - 0.05658} - 0.01682 \lambda^2 \end{aligned} \quad (4)$$

联立式(2), (3), (4)可以得到 514.5nm 泵浦光 KTP-OPO 的相位匹配曲线以及在 $x-y$ 平面的调谐曲线,如图 1 和图 2 所示。

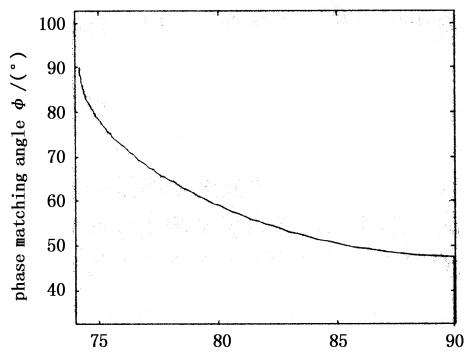


图 1 KTP 晶体的相位匹配曲线

$\lambda_p = 514.5\text{nm}, \lambda_s = \lambda_i = 1029\text{nm}$

Fig. 1 phase-match curve of the KTP crystal

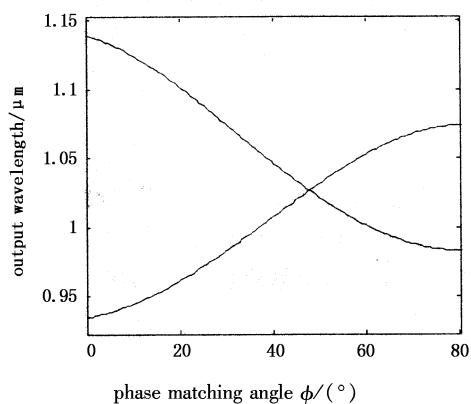


图 2 KTP 晶体在 $x-y$ 平面上的调谐曲线

Fig. 2 tuning curve of the KTP crystal in $x-y$ plane

由 KTP 晶体的相位匹配曲线可以看出,在简并点附近($\lambda_s = \lambda_i$) φ 角随 θ 角的增大而减小。在 $\theta = 90^\circ$ 处,即光波在 $x-y$ 平面内,其相位匹配角 $\varphi = 47.56^\circ$ 。由其在 $x-y$ 平面上的调谐曲线可以看出,相位匹配角 φ 在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 变化时可以得到 $0.947 \sim 1.127 \mu\text{m}$ 范围的参量光。

3 有效非线性系数

双轴晶体 KTP 属于 mm2 点群正双轴晶体,其非线性光学系数(单位为 10^{-12}m/V)为: $d_{31} = 6.5$, $d_{32} = 5.0$, $d_{33} = 13.7$, $d_{24} = 7.6$, $d_{15} = 6.1$ ^[8]。文献[9]中给出了双轴晶体的有效非线性系数的精确表达式。由 KTP 晶体的色散曲线(如图 3 所示)可以看出 x 方向和 y 方向的折射率非常近似(特别是在短波长范围内),并且相对 z 方向的折射率较小。所以有效非线性系数的表达式可以简化为:

$$d_{\text{eff}}(\text{I}) = \frac{1}{2}(d_{31} - d_{32}) \sin(2\theta) \cos(2\varphi) \quad (5)$$

$$d_{\text{eff}}(\text{II}) = [d_{31} \cdot (\sin\varphi)^2 + d_{32} \cdot (\cos\varphi)^2] \cdot \sin\theta \quad (6)$$

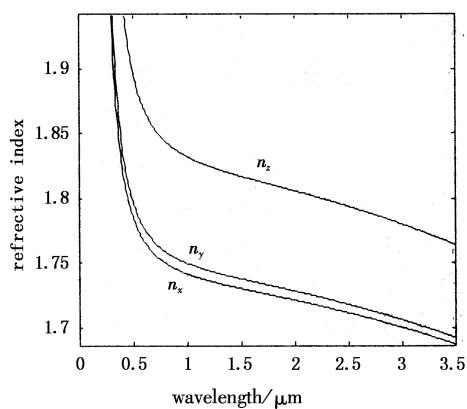


图3 KTP晶体的色散曲线

Fig. 3 the dispersion curve of KTP crystal

d_{eff} 随调谐角度的变化如图4所示。可以看出，Ⅱ类相位匹配的有效非线性系数远大于Ⅰ类相位匹配，且在整个调谐范围内都表现出较大的数值。

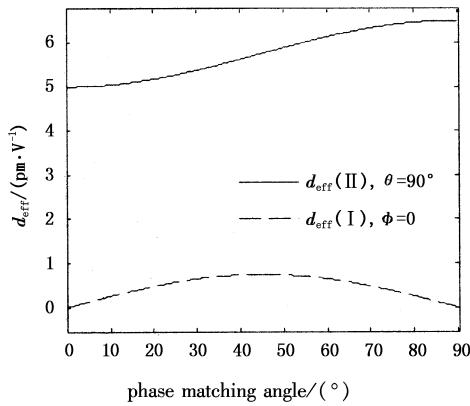


图4 KTP晶体的有效非线性系数

Fig. 4 the relationship between d_{eff} and phase matching angle

4 走离角和允许角

采用氩离子激光器0.5145 μm输出光泵浦的KTP-OPO，其走离角与相位匹配角的关系如图5所示。由图5可以看出，相对于yOz平面和xOz平面，光波在xOy主平面上的走离角最小。光波走离角在θ=45°附近达到最大值，在θ=90°和θ=0°时有最小值为0，即不存在走离效应。

在OPO的调谐过程中，只在完全满足相位匹配时，波矢失谐量ΔK才等于0，而实际参量作用过程中，只要波矢失谐量ΔK不大于π/l(l为晶体的长度)时，都会发生参量互作用，输出参量光。当调谐角为θ时完全满足相位匹配条件，调谐角为(θ+Δθ)时波矢失谐量ΔK=π/l，Δθ即为当调谐角为θ时晶体的允许角。当调谐角为φ时，同样可以求得Δφ。KTP晶体中，允许角与调谐角的关系如图6所示。可以看出，在调谐角为90°时允许角有最大值。

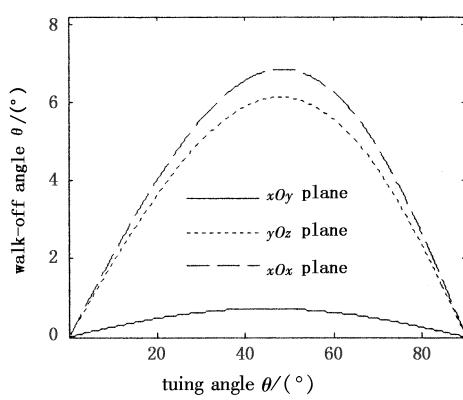


图5 KTP晶体中的走离角

Fig. 5 walk-off angle in KTP crystal

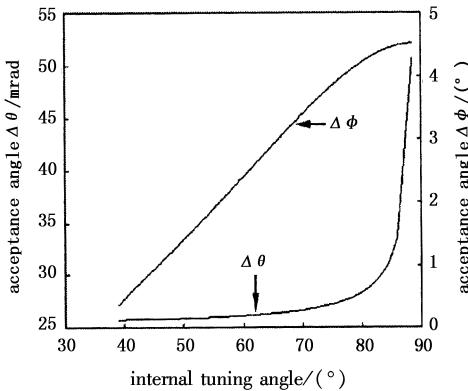


图6 KTP晶体的允许角

Fig. 6 acceptance angle for KTP crystal

5 转换效率和振荡阈值

5.1 转换效率

在角度调谐的光参量振荡过程中，波矢失谐量ΔK的存在直接影响到光参量振荡器抽运阈值的大小，而对稳态工作的OPO，其增益必须固定在阈值增益上，腔中的抽运场通过由参量转换引起的抽运损耗来进行调节。对单共振光参量振荡器(SRO-OPO)来说，耦合到信号光场的那部分抽运功率除了消耗在通过输出镜输出的信号光中，还有部分消耗在OPO腔中。ΔK的产生及大小直接影响这种调节与光场能量的转换，对OPO的转换效率产生影响：

$$\eta = \sin^2\left(\frac{l\Delta K}{2}\right)\left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (7)$$

其中， $N = \frac{I_p}{I_{\text{th}}}$ 为抽运光能量超过阈值的倍数。图7给出了当 $\frac{l\Delta K}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{6}$ 各值时的SRO效率曲线。从图中可以看出，在抽运光能量超过阈值的倍数相同的情况下， $\frac{l\Delta K}{2}$ 越靠近 $\frac{\pi}{2}$ 时，所得到的转换效率越高，但在抽运能量不断增加的过程中，SRO的

转换效率有饱和的趋势。所以针对相位失配的情况，在实际的光参量振荡器中有必要进行相位补偿，如调整抽运光的入射角度或晶体的温度，找到 ΔK 的最佳运转值，以期获得较高的参量光转换效率。

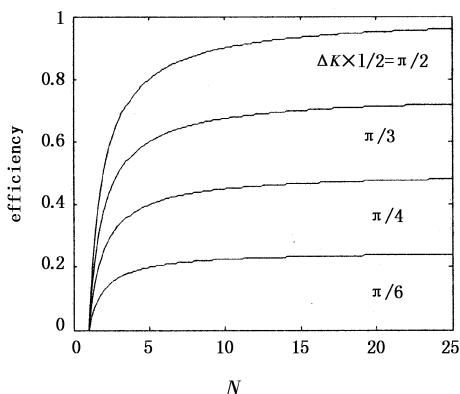


图7 单谐振 KTP-OPO 的转换效率

Fig. 7 the conversion efficiency of the SRO KTP-OPO

5.2 振荡阈值

S. Schiller 从三波互作用的稳态方程出发，对稳态工作的连续波光参量振荡器的运转特性进行了讨论，给出了连续波光参量振荡器的振荡阈值^[10]：

$$P_{\text{th}} = \frac{(T_s + V_s)}{E} \quad (8)$$

式中， T_s 表示输出耦合镜对信号光的透过率； V_s 是信号光在晶体中传播的损耗。非线性系数 E 的表达式为：

$$E = \frac{4\mu_0 d^2}{\pi c^2} \frac{\omega_s^2 \omega_i^2}{n_p^2 \omega_p} L h_{PA}$$

式中， h_{PA} 是量纲为一的调焦方程，对其的精细求解可得其最大值为 1.1。当相位失配量 ΔK 约为零时， h_{PA} 近似取最大值。

阈值功率与晶体长度的关系如图 8 所示。由图

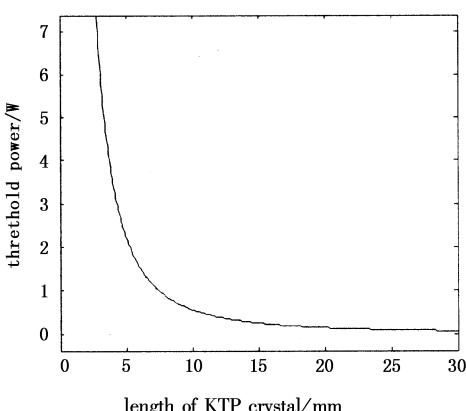


图8 阈值功率与晶体长度的关系

Fig. 8 the relationship between threshold and length of KTP crystal

可以看出随着晶体长度的变大，振荡阈值有显著的降低。但在此计算中没有考虑走离角的因素，所以在选取晶体长度的时候还要考虑走离角对三波互作用长度的影响。

6 结束语

本文对 KTP-OPO 的相位匹配、有效非线性系数、走离角、允许角以及单谐振时的转换效率和振荡阈值的理论分析和数值计算，为下一步实验打下坚实的理论基础。本文的计算对于 KTP-OPO 的初步设计和优化有一定的参考价值。

参考文献：

- [1] R G Smith, J E Geusic, H J Levinstein, et al. Continuous optical parametric oscillator in $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ [J]. Appl. Phys. Lett., 1968, 14(24): 973–976.
- [2] R L Byer, M K Oshman, J F Young, et al. Visible CW parametric oscillator [J]. Appl. Phys. Lett., 1968, 13(3): 109–111.
- [3] A Piskarskas, V Smil'gyavichyus, A Umbrasas. Continuous parametric generation of picosecond light pulses [J]. Sov. J. Quantum Electron., 1988, 18(2): 155–156.
- [4] S T Yang, R C Eckardt, R L Byer. Continuous wave singly resonant optical parametric oscillator pumped by a single-frequency resonantly doubled Nd: YAG laser [J]. Opt. Lett., 1993, 18(12): 971–973.
- [5] W R Bosenberg, A Drobshoff, J I Alexandre, et al. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO_3 [J]. Opt. Lett., 1996, 21(10): 713–715.
- [6] M H Dunn, M Ebrahinzadeh. Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses [J]. Science, 1999, 286: 1513–1517.
- [7] K Kato. Parametric oscillation at $3.2\mu\text{m}$ in KTP pumped at $1.064\mu\text{m}$ [J]. IEEE J. Quan. Elec., 1991, 27(5): 1137–1140.
- [8] F C Zumsteg, J D Bierlein, T E Gier. $\text{K}_x\text{Rb}_{1-x}\text{TiOPO}_4$: A new nonlinear optical material [J]. J. Appl. Phys., 1976, 47(11): 4980–4985.
- [9] J Q Yao, T S Fabien. Calculations of optimum phase match parameters for the biaxial crystal KTiOPO_4 [J]. J. Appl. Phys., 1984, 55(1): 65–68.
- [10] S Schiller, K Schneider, J Mlynek. Theory of an optical parametric oscillator with resonant pump and signal [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1999, 16(9): 1512–1524.