

文章编号: 1001-5078 (2006) 05-0354-04

# 非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器的研究

张凤娟, 王加贤, 庄鑫巍

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 利用 1.06 $\mu\text{m}$  激光脉冲泵浦非临界相位匹配 (NCPM) KTP 光学参量振荡器, 获得中心波长 1566nm 的信号光输出。当泵浦光能量为 100mJ 时, 输出信号光能量约为 31.9mJ, 相应的转换效率为 30.9%, 信号光脉冲宽度 (10ns) 比泵浦光脉冲宽度 (30ns) 小得多。当相位匹配角 (内角) 从 90 到 80 变化时, 信号光调谐范围为 1566 ~ 1596nm。

**关键词:** 光学参量振荡器; KTP 晶体; 非临界相位匹配; 角度调谐

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A

## The Study of Noncritical Phase Matching KTP Optical Parametric Oscillator

ZHANG Feng-juan, WANG Jia-xian, ZHUANG Xin-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** A signal pulse with the 1566nm central wavelength is presented by use of a noncritically phase-matched KTP-OPO pumped by 1.06 $\mu\text{m}$  laser. When the pump energy is 100mJ, the output energy is 31.9mJ and the relevant conversion efficiency is 30.9%. The signal pulse width (10ns) is narrower than the pump pulse width (30ns). When the internal angle is changed from 90° to 80°, the signal tuning range is from 1566 ~ 1596nm.

**Key words:** optical parametric oscillator; KTOPO<sub>4</sub> crystal; noncritically phase-matched; internal angular tuning

### 1 引言

在激光测距、目标指示、环境检测、激光雷达等应用, 要求激光源对人眼是安全的, 而 1.5 ~ 1.7 $\mu\text{m}$  是对人眼安全的激光波段。利用光学参量振荡器 (OPO) 是产生人眼安全激光的一种简单易行方法。近年来, 随着优质泵浦源和高质量非线性晶体的出现, 光学参量振荡器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科学领域已显示出越来越广泛的应用前景, 一直吸引着众多研究者的兴趣<sup>[1,2]</sup>。首先取得技术上的重大突破是, 1991 年美国光纤公司的 Mashall 等人采用非临界相位匹配 KTP 光参量振荡器, 获得最大能量转换效率达 47% 的人眼安全的 1.61 $\mu\text{m}$  与 1.54 $\mu\text{m}$  激光<sup>[3]</sup>。

我国亦有很多科学家对此进行了理论和实验研究<sup>[4,5]</sup>。而本文报道采用 1.06 $\mu\text{m}$  激光脉冲泵浦非临界相位匹配 KTP-OPO, 得到的信号光的脉宽只有泵浦光脉冲宽度的三分之一, 信号光的调谐范围为 1566 ~ 1596nm。

### 2 理论分析

#### 2.1 KTP 晶体的相位匹配

KTP 晶体属于正交晶系、mm2 点群、正双轴晶体, 具有较高的非线性系数, 较宽的光学透射谱

基金项目: 福建省自然科学基金 (A0310022); 国务院侨办科研基金资助项目。

作者简介: 张凤娟 (1979 - ), 硕士研究生, 主要从事固体激光技术与器件方面的研究。E-mail: zhangfengjuan@163.com

收稿日期: 2005-09-20

(0.35~4.5μm),大于 400MW/cm<sup>2</sup> 的损伤阈值,且物化性能稳定,易于切割、抛光及镀膜。KTP晶体已被广泛地应用于激光倍频、混频及光学参量振荡等频率变换过程。

KTP晶体三个主轴折射率的 Sellmeier方程为:

$$n^2 = A + \frac{B}{2 - C} - D^2 \quad (1)$$

由于晶体生长方式和折射率测试等的差别,不同文献报道的方程系数也有一定的差异。本文使用的方程系数是由山东大学晶体研究所提供的。

双轴晶体相位匹配曲线计算非常复杂,但我们选择的 KTP晶体是 X-Z平面切割,类相位匹配。对于类相位匹配(o+e),泵浦光波(波长 p)、信号光波(波长 s)、闲频光波(波长 i)在非线性晶体内的相互作用满足动量守恒方程,由此可得:

$$\frac{n_p}{p} = \frac{n_s}{s} + \frac{n_i}{i} \quad (2)$$

三波相互作用还应满足能量守恒,所以有:

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{s} + \frac{1}{i} \quad (3)$$

在 X-Z平面内菲涅耳方程简化为:

$$\frac{\sin^2}{n^2} + \frac{\cos^2}{n_x^2} = 0 \quad (4)$$

其中,为泵浦光波波矢方向与晶体 z轴的夹角;n<sub>x</sub>与 n<sub>z</sub>(都为的函数)为 KTP晶体的主轴折射率(由一式计算得出);根据(1)、(2)、(3)和(4)式,编制计算机数值计算程序,得到了相位匹配理论计算曲线,如图 1所示。

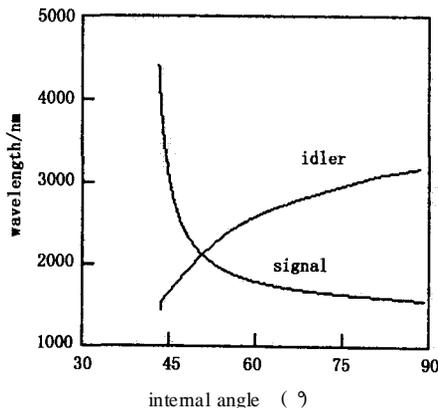


图 1 KTP晶体的相位匹配曲线的理论值与实验值

可以看出,当相位匹配角减小时,信号光的波长增加;但是当相位匹配角从 90°~70°变化时,信号光的波长变化并不是很明显。所以,KTP晶体的类相位匹配允许有较大的接受角以及较大的泵浦光束的发散角。

## 2.2 相位失配对 OPO 转换效率的影响

在角度调谐的光参量振荡过程中,通过改变光波波矢方向与晶体 z轴的夹角来满足不同波长信号光的相位匹配条件,即三波的波矢关系为:

$$K_1 + K_2 = K_3$$

实际上,不可避免地存在相位失配,即  $k = K_3 - K_1 - K_2$  不为零的情况。由三波耦合的理论可知, k 的存在直接影响到光参量振荡器泵浦阈值的大小,而对稳态工作的 OPO,其增益必须固定在阈值增益上,腔中的泵浦场通过由参量转换引起的泵浦损耗来进行自调节。对单共振光参量振荡器(SRO-OPO)来说,耦合到信号光场中的那部分泵浦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。k 的产生及大小均直接影响这种自调节与光场能量间的转换,对 OPO的转换效率产生影响。由信号光转换效率与 k 及 N(泵浦光能量超过阈值的倍数)的关系<sup>[6]</sup>:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{Lk}{2}\right) \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (5)$$

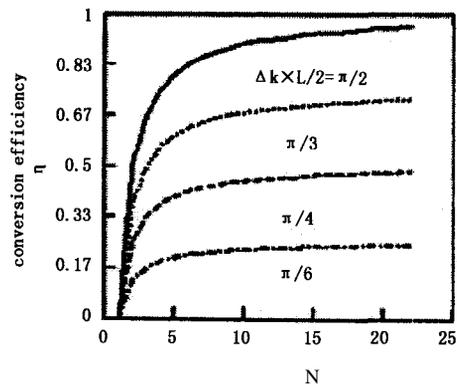


图 2 相位失配对单谐振 OPO 转换效率的影响

根据上式做出了当  $\frac{Lk}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{6}$  各值时的 SRO效率曲线如图 2所示。从图 2中可以看出:在泵浦光能量超过阈值的倍数相同的情况下,当  $\frac{Lk}{2}$  越靠近  $\frac{\pi}{2}$  时,所得到的转换效率越高,但在泵浦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,如调整泵浦光的入射角度或晶体的温度,找到 k 的最佳运转值,以期获得较高的参量光转换效率。

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

图 3 为 1.06μm激光泵浦的 KTP-OPO 的实验

方案原理图。其中  $M_1$ 、 $M_2$  构成  $1.06\mu\text{m}$  激光谐振腔；A 为调 Q 晶体；P 为  $1.06\mu\text{m}$  的偏振片； $M_3$ 、 $M_4$  构成 OPO 激光谐振腔，采用平-平腔结构，腔长  $70\text{mm}$ 。 $M_3$  是  $1.06\mu\text{m}$  高透 ( $T > 98\%$ )、 $1.5 \sim 1.7\mu\text{m}$  全反射膜片；输出镜  $M_4$  是  $1.06\mu\text{m}$  高透、 $1.5 \sim 1.7\mu\text{m}$  透过率为  $15\%$  的膜片； $1.06\mu\text{m}$  线偏振光经过焦距为  $80\text{cm}$  的透镜聚焦，焦点在 KTP 晶体后约  $10\text{cm}$  处，对 KTP 晶体进行泵浦。KTP 晶体的尺寸为  $8 \times 8 \times 20\text{mm}^3$ ，X 方向切割，非临界相位匹配。 $M_5$  为  $1.06\mu\text{m}$  高透、 $1.57\mu\text{m}$  高反膜片， $M_6$  为  $1.06\mu\text{m}$  全反镜，除去参量光中残余的泵浦光。输出的信号光由 InGaAs PN 光电二极管构成的探测器接收，并输入到 TDS3032B 型数字示波器上观察脉冲波形。

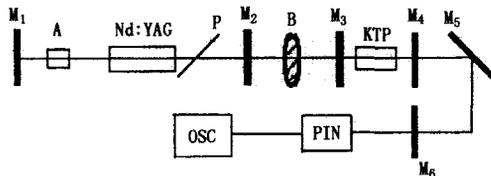


图 3 实验装置

### 3.2 实验结果与结果分析

#### 3.2.1 输出的信号光特性

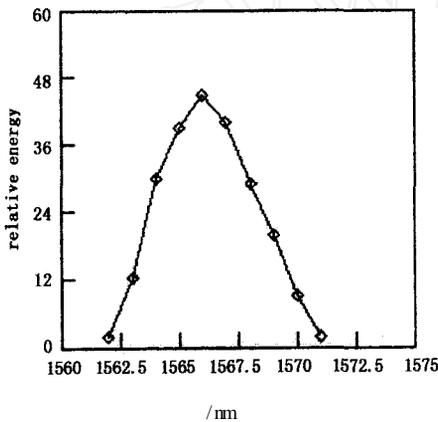
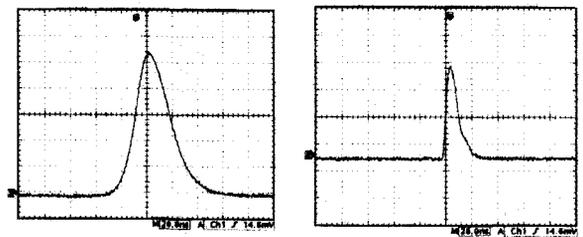


图 4  $\theta = 90^\circ$  时信号光的光谱曲线

在本实验中，图 4 是用 WGD - 300A 型光栅单色仪和 Moletron Detector 公司提供的微能量计测得的在泵浦光正入射 ( $\theta = 90^\circ$ ) 时，OPO 输出的信号光的光谱曲线，可看出，信号光的中心波长约为  $1566\text{nm}$ ，线宽约为  $6\text{nm}$ 。作者认为信号光线宽比泵浦光线宽较大，是由于泵浦光有一定线宽和发散角、及相位失配等因素造成的。

TDS3032B 型示波器显示的泵浦光与输出信号光脉冲的波形如图 5 所示。可以看出，泵浦光的脉宽是  $30\text{ns}$ ，信号光的脉宽是  $10\text{ns}$ ，信号光脉冲宽度比泵浦光脉冲宽度小得多。这一点可以这样理解：

对于长脉冲 (纳秒量级) 泵浦的 OPO，一般参量光从初始噪声建立以后，能与泵浦光脉冲产生的多次非线性相互作用，而且光参量振荡具有明显的阈值特性。在泵浦光脉冲的前后沿，功率密度较低，没有达到光参量振荡阈值，不会产生信号光；信号光只会在泵浦光脉冲峰值附近的时间内产生，所以信号光脉冲要比泵浦光脉冲窄。实验中还发现泵浦光脉宽越宽，泵浦功率上升越慢，信号光建立的时间越长，输出的信号光与泵浦光的脉宽差距就越大。



(a) 泵浦光脉冲波形 (b) 输出信号光脉冲波形

图 5 泵浦光与输出信号光脉冲的波形图

从图 5 中还可以发现，信号光脉冲和泵浦光脉冲形状差别不大，都是前沿比后沿陡。泵浦脉冲前沿较陡，泵浦功率上升较快，保证有足够高的泵浦功率，使信号光快速从参量噪声中建立形成自持脉冲，泵浦脉冲的后沿也是可利用的，与参振光进行有效地耦合放大，就形成了缓后沿的信号光脉冲输出。

#### 3.2.2 信号光的能量和转换效率

在光学参量振荡器的腔长  $L = 7\text{cm}$  不变的情况下，信号光的输出能量、转换效率与泵浦光能量的关系曲线如图 6、7 所示。

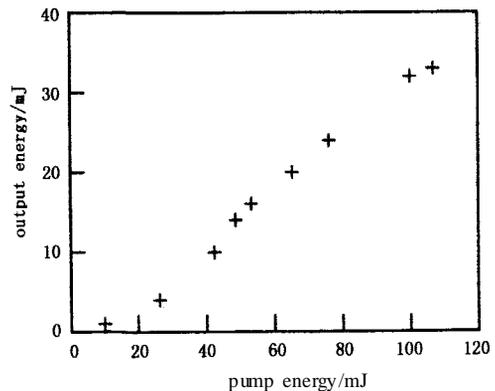


图 6 输出能量与泵浦能量的关系曲线

图 6、7 中的 “+” 和 “x” 分别对应输出能量和转换效率的实验数据点。图 7 中的曲线为多项式拟合曲线。从图中可以看出，输出信号光的能量随着泵浦光能量增大而增大，而转换效率随着泵浦光能量增大有趋于饱和的趋势。与 2.2 中的理论计算结果基本是吻合的。为了提高信号光的转换效率，除了

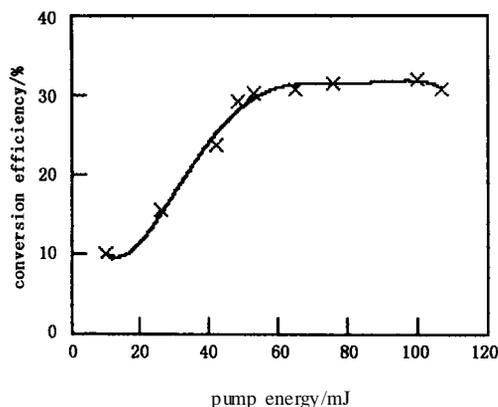


图 7 转换效率与泵浦能量的关系曲线

精确调整相位匹配角外,还可以从以下二个方面考虑:

(1) 阈值能量密度与 OPO 腔长的关系为<sup>[7]</sup>:

$$J_{th} = \frac{2 \cdot 25}{k_g L_{eff}^2} \left[ \frac{15L}{c} + 2dl + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right]^2$$

由上式可知,腔长 L 较大时,阈值能量也较大,所以输出能量较小,转换效率较低。在本实验装置中,为了调整方便,腔长不小于 7cm,可见较大,如果适当减小腔长,转换效率就会得到相应的提高。

(2) 由于镜片在镀膜时对闲频光波段的反射率未加以控制,因此可能仍有一部分闲频光在腔内振荡,造成参量光向泵浦光转化,使得转换效率随着泵浦光能量增强有饱和的趋势。所以为了提高转换效率,对镜片镀膜尽量让闲频波段的光高透。

### 3.2.3 光参量振荡器的调谐特性

本实验中,当晶体的内转角从 90 到 80 变化时,测到了输出信号光的调谐特性(由于晶体尺寸的限制,内转角不能再继续减小)。波长调谐过程是通过改变晶体透光轴与泵浦光之间的夹角来实现的。用 WGD-300A 型光栅单色仪测量不同的内转角所对应的输出波长。

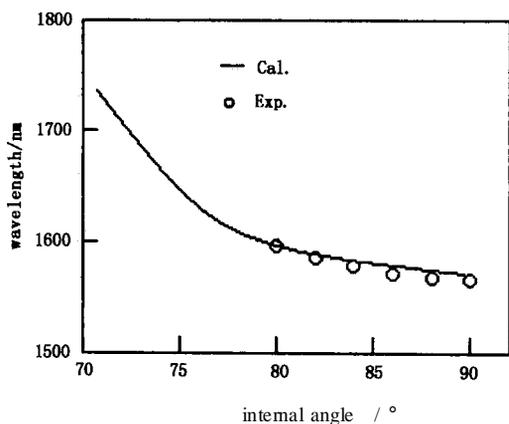


图 8 KTP OPO 的角度调谐曲线

图 8 中的曲线是理论计算值, o 是晶体内转角不同时所输出波长的实验点数据。可以看出实验所得信号光的调谐范围为 1566 ~ 1596nm,当泵浦光正入射 ( =90 °) 时,信号光的中心波长为 1566nm,理论值与实验值基本吻合。如果增加晶体的尺寸,调谐范围有可能再增加。

### 4 结论

我们利用 Nd:YAG 激光器 1.06μm 激光泵浦非临界相位匹配 KTP ( =90 °; =90 °) 光参量振荡器,获得了中心波长为 1566nm、脉宽 10ns、转换效率 30.9% 的光脉冲输出;从理论上分析相位失配对 KTP-OPO 转换效率的影响;实验上所得到的信号光的脉宽比泵浦光脉宽小得多,并分析了之所以产生这种现象的原因;当晶体的内转角从 90 到 80 变化时,信号光的调谐宽度为 30nm;但是信号光的输出能量和转换效率不太高,如果再增加晶体的长度、缩短 OPO 腔长及镀膜时严格控制闲频光振荡等,都会提高转换效率。这部分实验有待于进一步进行。

### 参考文献:

- [1] Stephen E Harris Tunable optical parametric oscillators [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1969, 57 (12): 2096 - 2112
- [2] C L Tang, W R Boscnberg, T Ukachi, et al Optical parametric oscillators[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80 (3): 365 - 367.
- [3] Marshall L R, Kasinski J, Bumham R L. Diode-pumped eye-safe laser source exceeding 1% efficiency[J]. Opt Lett, 1991, 16 (21): 1680 - 1682
- [4] 许祖彦. 光参量振荡器 - 可调谐技术的发展 [J]. 中国激光, 1994, A21 (5): 329 - 333.
- [5] 金锋, 等. 1.57μm 内腔光参量振荡器的研究 [J]. 中国激光, 2002, 21 (1): 48 - 51.
- [6] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995, 177 - 181.
- [7] R C Bapna, K Dasgupta, L G Nair Optimum pump-pulse duration for optical parametric oscillators[J]. Optics & Laser Technology, 1997, 26 (6): 349 - 351.

### 更正

1. 本刊 2006, 36 (4): 305. 右下方收稿日期应为 2005-08-10

2. 本刊 2006, 36 (4): 234. 摘要第一行中“……主动被动调 Q 技术……”应为“……主流被动调 Q 技术……”。