

文章编号: 1007-6654(2003)02-0079-05

## 双共振准相位匹配光学参量振荡器的调谐特性

吴迎瑞, 李永民, 张宽收

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

**摘要:** 利用全固化单频 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦双共振准相位匹配铌酸锂连续光学参量振荡器, 实验研究了该光学参量振荡器下转换光的调谐特性。通过改变 PPLN 晶体的温度及 OPO 的腔长, 下转换光的调谐范围分别为 189 nm 和 175 nm, 通过改变泵浦光频率, 信号光频率连续调谐 375 MHz。实验结果与理论计算值基本吻合。

**关键词:** 准相位匹配; 双共振光学参量振荡器; 调谐

**中图分类号:** TN 248.1      **文献标识码:** A

### 0 引言

连续光学参量振荡器一直以其宽的调谐性能受到人们的关注<sup>[1,2]</sup>。近年来, 随着高质量激光光源的发展、高质量高效率非线性晶体的研制成功以及电子控制系统方面技术的成熟, 稳定、高效、宽调谐的连续光学参量振荡器逐步走向实用化, 这些优点使得它在高分辨率激光光谱学、遥感等方面有不可替代的应用价值<sup>[3]</sup>。

准相位匹配晶体是近些年出现的一种新型非线性晶体<sup>[4]</sup>, 同常规的双折射匹配晶体相比, 它可以利用非线性晶体最大的有效非线性系数进行频率变换, 而且在晶体的整个透明区域内, 不满足严格相位匹配的光束也可以通过改变温度在晶体内进行有效的参量相互作用, 从而扩展了频率变换的范围。因此, 利用准相位匹配材料构建的连续光学参量振荡器已经成为一个有效的能产生相干的、波长可调谐的近红外和中红外的光源。特别是利用 1.06 μm 激光泵浦由准相位匹配铌酸锂 (PPLN) 晶体构建的连

续光学参量振荡器产生的 2 μm 激光, 在微量化学气体的检测、环境保护与监测<sup>[5]</sup>等领域有着广泛的应用前景, 而且是一种在军事上有着非常重要应用的 3 μm~5 μm 的激光的有效泵浦源<sup>[6]</sup>。

本文中我们利用自制的全固化单频 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器的 1.06 μm 激光, 泵浦由 PPLN 晶体构建的双共振连续光学参量振荡器, 直接产生 2 μm 下转换激光, 并通过改变泵浦光的频率、PPLN 晶体的温度以及 OPO 的腔长等参数, 分别研究了 OPO 下转换光调谐特性。实验结果基本与理论计算值相吻合。

### 1 OPO 调谐特性的理论分析

#### 1.1 温度调谐

对于一阶极化准相位匹配来说, 相位失配波矢为<sup>[4]</sup>:

$$\Delta k_Q = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

其中,  $k_p$ ,  $k_s$ ,  $k_i$  分别为泵浦光、信号光和闲置光的

收稿日期: 2003-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69938010); 山西省青年科学基金和回国留学人员基金项目

作者简介: 吴迎瑞(1979-), 女, 山西运城人, 山西大学光电研究所硕士研究生, 研究方向: 激光技术与量子光学。

波矢,  $\Delta$  为准相位匹配晶体的极化反转周期。

要实现最佳参量变换作用, 必须满足两个条件<sup>[7]</sup>:

1) 能量守恒:

$$h\nu_p = h\nu_s + h\nu_i \quad (2)$$

2) 相位匹配:

$$\frac{n_p(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n_i(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Delta} = 0 \quad (3)$$

其中,  $\nu_j (j = p, s, i, \text{下同})$  为泵浦光、信号光和闲置光的频率,  $\lambda_j$  为泵浦光、信号光和闲置光在真空中的波长,  $n_j(\lambda_j, T)$  为泵浦光、信号光和闲置光在晶体中的折射率。对于一定的泵浦波长  $\lambda_p$  和极化周期  $\Delta$ , (2) 式和 (3) 式给出了不同温度下信号光和闲置光的波长值, 即信号光和闲置光随温度变化的调谐特性。

### 1.2 腔长调谐

对于双共振连续光学参量振荡器(DRO)来说, 谐振条件除了要满足能量守恒关系式(2)外, 还应该同时满足信号光和闲置光的共振条件<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_s}{c} [L_a + n_0(\omega_s, T)L_c] &= 2\pi N_s + \phi_s \\ \frac{\omega_i}{c} [L_a + n_0(\omega_i, T)L_c] &= 2\pi N_i + \phi_i \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $N_j (j = s, i)$  为腔内谐振的信号光和闲置光的纵模数,  $\phi_j (j = s, i)$  是由于镜面反射而引起的附加相移, 晶体长度为  $L_c/2$ , 总的腔长为  $(L_a + L_c)/2$ , 晶体的折射率为  $n_0$ ,  $T$  为晶体温度。我们忽略空气色散, 在晶体温度和泵浦光频率固定不变的情况下, 腔长变化与腔内共振的信号光和闲置光的频率变化之间的关系可由方程(4)得到:

$$\begin{aligned} L_a \delta\omega_s + \omega_s \delta L_a + \delta\omega_s n_0(\omega_s, T)L_c \\ + \omega_s L_c \frac{\delta n_0(\omega_s, T)}{\delta\omega_s} \delta\omega_s &= 2\pi c \delta N_s \\ L_a \delta\omega_i + \omega_i \delta L_a + \delta\omega_i n_0(\omega_i, T)L_c \\ + \omega_i L_c \frac{\delta n_0(\omega_i, T)}{\delta\omega_i} \delta\omega_i &= 2\pi c \delta N_i \end{aligned} \quad (5)$$

由于泵浦光频率保持不变, 并且要满足信号光和闲

置光在腔内同时共振, 因此有:

$$\delta\omega_s = -\delta\omega_i, \quad \delta N_s = -\delta N_i \quad (6)$$

联立(5)和(6)式, 我们可以得:

$$\begin{aligned} \omega_p \delta L_a + L_c \delta\omega_s \left[ n_0(\omega_s, T) - n_0(\omega_i, T) \right. \\ \left. + \omega_s \left( \frac{\delta n_0(\omega_s, T)}{\delta\omega_s} + \frac{\delta n_0(\omega_i, T)}{\delta\omega_i} \right) \right. \\ \left. - \omega_p \frac{\delta n_0(\omega_i, T)}{\delta\omega_i} \right] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

利用方程(7)我们可以得出腔长改变量  $\delta L_a$  与下转换光频率改变量  $\delta\omega_s$  之间的关系。利用 DRO 的这个特性, 就可以通过改变 DRO 腔长对下转换光进行频率调谐。

### 1.3 泵浦光频率调谐

双共振光学参量振荡器可以通过改变非线性晶体的温度和 OPO 的腔长来获得较大范围的调谐, 问题是这两种方法都无法使下转换光的频率连续调谐<sup>[9]</sup>。但是通过连续改变泵浦光的频率可以对下转换光的频率进行连续调谐。由于是频率连续调谐, 不会发生跳模现象, 所以  $\delta N_s = 0$ ,  $\delta N_i = 0$ 。假定方程(4)中泵浦频率有一个微小的改变量  $\delta\omega_p$ , 由于能量守恒, 信号光和闲置光的频率必然会发生相应改变:  $\delta\omega_s + \delta\omega_i = \delta\omega_p$ 。对于运转在近简并点的 OPO, 信号光和闲置光的频率调谐量近似相等, 都近似等于泵浦光频率调谐量的一半:  $\delta\omega_s \approx \delta\omega_i \approx \delta\omega_p/2$ 。同时为了满足双共振条件, OPO 的腔长也要发生相应的改变。信号光、泵浦光的频率调谐量和相应的 OPO 腔长改变量之间的定量关系, 可由方程(5)得出:

$$\delta\omega_s = - \frac{\omega_s}{L_a + L_c \left[ n_0(\omega_s, T) + \omega_s \frac{\delta n_0(\omega_s, T)}{\delta\omega_s} \right]} \delta L_a \quad (8)$$

$$\delta L_a = - \frac{L_a + L_c \left[ n_0(\omega_p/2, T) + \omega_p \frac{\delta n_0(\omega_p/2, T)}{\delta\omega_p} \right]}{\omega_p} \delta\omega_p \quad (9)$$

因此, 在连续改变泵浦光频率的同时, 相应的改

变 OPO 的腔长,就可以获得下转换光频率的连续调谐。

## 2 实验过程和结果

实验装置如图 1 所示,我们利用全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为泵浦源,激光器的最大输出功率 600 mW,功率稳定性优于  $\pm 1\%$  (5h),可以通过调谐激光器腔长的方法将激光器输出激光的频率连续调谐 800 MHz。利用了一个 40 dB 光学隔离器抑制 OPO 的反射泵浦光对激光器的干扰。使用两个焦距分别为 300 mm 和 60 mm 的透镜将泵浦光的模式与 OPO 的腔模相匹配,空间模式匹配效率达 95%。用一个  $\lambda/2$  波片控制泵浦光的偏振方向,使参量相互作用光在 PPLN 晶体内满足相位匹配。光学参量振荡腔由一个平面输入耦合镜和一个曲面输出耦合镜构成,输入耦合镜 M1 对泵浦光的反射率为 10%,对下转换光是高反,输出耦合镜 M2 的曲率半径为 30 mm,对泵浦光为高反,对下转换光的反射率为 99.2%。晶体两端镀以对 1.06  $\mu\text{m}$ 、1.8  $\mu\text{m}$  ~ 2.5  $\mu\text{m}$  减反膜,剩余反射率均小于 0.6%。所用的 PPLN 晶体尺寸为 0.5 mm  $\times$  10 mm  $\times$  20 mm, PPLN 晶体采用 I 类相位匹配 ( $e - e + e$ ),极化周期为 31  $\mu\text{m}$ 。利用一个控温精度为 0.01  $^{\circ}\text{C}$  的控温炉精确控制 PPLN 晶体的温度。在实验中,我们通过改变 PPLN 晶体的温度、OPO 的腔长以及泵浦光的频率等参数,研究了 OPO 下转换光调谐特性。信号光和闲置光的波长用一个分辨率为 0.4 nm 的单色仪测量,频率用共焦 F-P 干涉仪测量。

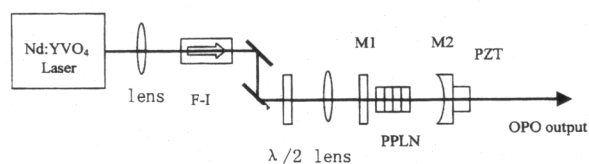
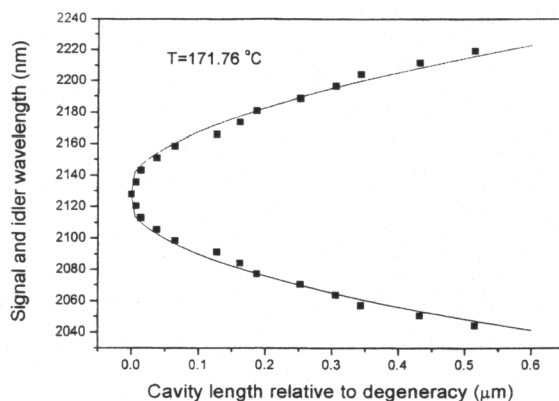


图 1 双共振 PPLN OPO 实验装置图

通过精确控制 PPLN 晶体的温度和 OPO 的腔长,使信号光和闲置光在腔内达到双共振。OPO 的阈值泵浦功率为 130 mW,由于实验的目的是研究 OPO 的调谐特性,没有对 OPO 的输出耦合镜进行优化,所以在实验中没有研究 OPO 的下转换光的输出功率特性。

当晶体的温度为 171.76  $^{\circ}\text{C}$ ,下转换光随着 OPO 腔长变化的波长调谐曲线如图 2 所示。其中实心方块是实验数据,实线是由(7)式计算的理论预测曲线。当腔长从简并点连续改变 0.514  $\mu\text{m}$  时,下转换光的调谐范围从 2044 nm 到 2219 nm。从图中可以看到实验数据与理论预测基本吻合。

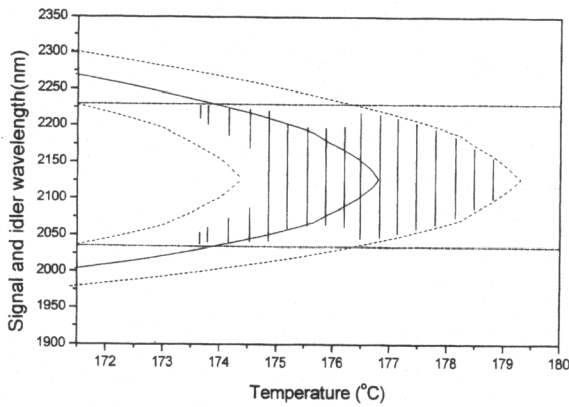


(实心方块为实验结果; 实线为理论值)

图 2 OPO 输出光波长随腔长调谐曲线

图 3 是通过改变晶体温度来调谐信号光和闲置光的波长。对每一个固定的温度,竖线反映了在此温度下,扫描腔时的 OPO 输出波长的调谐。当晶体的温度由 173.6  $^{\circ}\text{C}$  改变到 178.8  $^{\circ}\text{C}$  时,信号光和闲置光的最大调谐范围从 2038 nm 到 2227 nm,更大的调谐范围受到腔镜镀膜带宽的限制。图 3 中的实线是当位相完全匹配时由(3)式理论计算的下转换光随温度的调谐曲线。当泵浦功率大于 OPO 的阈值泵浦功率时,由于 OPO 有一定的增益带宽,即使位相有一定的失配,OPO 仍然可以稳定运转。图 3 中的虚线是在允许的最大相位失配条件下,理论计算的下转换光随温度的调谐曲线。图 3 中的点划线表示腔镜的镀膜带宽。由实验结果可以看

出,实验得到的信号光和闲置光随晶体温度的调谐范围基本上位于给定的理论预测值的范围之内。



(竖直线:实验结果;  
 实曲线:对应完全相位匹配的理论值;  
 点 线:对应于有一定相位失配的理论值;  
 点划线:腔镜镀膜带宽)

图3 OPO输出波长随PPLN晶体温度调谐曲线

在实验中,我们通过控制激光器腔长的方法来连续调谐泵浦激光的频率,进而实现对OPO下转换光的连续调谐。当泵浦激光的频率连续调谐750 MHz时,信号光频率的连续调谐范围约为 $750/2 = 375$  MHz。在进行频率连续调谐时,为使OPO满足双共振条件,OPO腔长相应改变 $0.286 \mu\text{m}$ 。图4是泵浦光频率改变量与OPO腔长改变量之间的关系曲线,实心方块为实验结果,实线为由(9)式计算得到的理论值。由于泵浦激光频率的最大连续调谐范围受激光器自由光谱范围的限制(800 MHz),所以限制了下转换光的连续调谐范围。

参考文献:

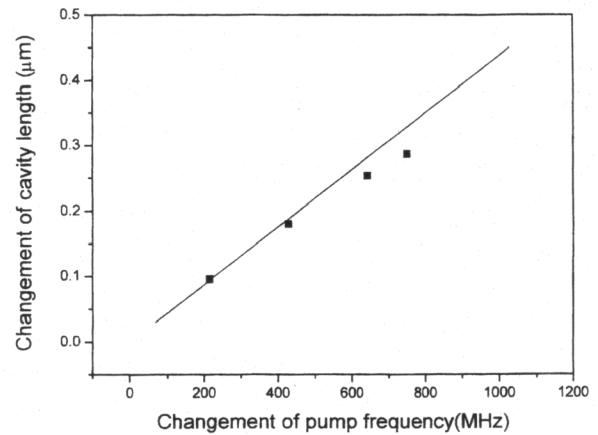
[1] SMITH R G, GEUSIC J E, LEVINSTEIN H J, *et al.* Continuous optical parametric oscillation in  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1968, 12(9): 308 - 310.

[2] RABIN H, TANG C L. *Nonlinear Optics (Part B)* [M]. New York: Academic Press, 1975, 1: 587.

[3] LEE D, WONG N C. Tuning characteristics of a cw dual-cavity KTP optical parametric oscillator [J]. *Appl Phys B*, 1998, 66: 133 - 143.

[4] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.* Quasi phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, 12(11): 2102 - 2116.

[5] MIHALCE R M, BAER D S, *et al.* Diode-laser absorption measurements of  $\text{CO}_2$  near  $2.0 \mu\text{m}$  at elevated temperatures [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(36): 8341 - 8347.



(实心方块:实验结果; 实线:理论值)

图4 OPO共振腔长随泵浦频率的变化曲线

3 结论

我们利用全固化单频  $\text{Nd:YVO}_4$  激光器泵浦由PPLN晶体构建的双共振连续光学参量振荡器,通过改变泵浦光的频率、PPLN晶体的温度以及OPO的腔长等参数,实验研究了PPLN OPO在近简并点的调谐特性,并对这三种调谐特性进行了理论分析。当PPLN晶体的温度变化 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,OPO下转换光的调谐范围为189 nm,更大的调谐范围受到腔镜镀膜带宽的限制;在一定的晶体温度( $171.76 \text{ }^\circ\text{C}$ )下,当OPO的腔长从简并点连续改变 $0.514 \mu\text{m}$ 时,下转换光的调谐范围为175 nm;当泵浦光频率连续改变750 MHz时,信号光频率连续调谐375 MHz。实验结果与理论值基本吻合。产生 $2 \mu\text{m}$ 可调谐激光的实验装置全固化、小型化,在军事、检测、医疗等领域有着广泛的应用前景。

- [6] ARISHOLM G, LIPPERT E, RUSTAD G, *et al.* Efficient conversion from 1 to 2 $\mu$ m by a KTP - based ring optical parametrical oscillator [J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(15): 1336 - 1338.
- [7] JUNDT D H. Temperature - dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate [J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(20): 1553 - 1555.
- [8] TAHTAMOUNI R A, BENCHEIKH K, STORZ R, *et al.* Long - term stable operation and absolute frequency stabilization of a doubly resonant parametric oscillator[J]. *Appl Phys B*, 1998, **66**: 733 - 739.
- [9] HENDERSON J, PADGETT M J, COLVILLE F G, *et al.* Doubly resonant optical parametric oscillators: tuning behaviour and stability requirements [J]. *Opt Comm*, 1995, **119**: 256 - 264.

## Experimental Study of Tuning Characteristics of Doubly Resonant Quasi - Phase - Matched Optical Parametric Oscillator

WU Ying - rui, LI Yong - min, ZHANG Kuan - shou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto - Electronics Shanxi University, Taiyuan 030006 China)

**Abstract:** A doubly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled Lithium Niobate (PPLN OPO) was pumped by an all - solid - state single frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser. The tuning characteristics of the down conversion output of OPO were experimental studied by changing the parameters such as the temperature of crystal, cavity length and the frequency of pump laser. When the temperature of PPLN crystal and the cavity length of OPO were changed the wavelength of OPO output can be tuned 189nm and 175nm, respectively. When the frequency of the pump laser was changed the frequency of signal output can be tuned continuously 375MHz. The experimental results are good agreement with the theoretical predictions.

**Key words:** quasi - phase - matched; doubly resonant optical parametric oscillator; tuning