

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0861-03

波长可调谐准相位匹配光学参量振荡器

耿优福¹, 姚建铨², 谭晓玲¹, 刁述研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)

摘要:利用掺氧化镁周期性极化铌酸锂晶体,对信号光单谐振的准相位匹配光学参量振荡器的温度调谐特性和输出功率特性进行了理论与实验研究。以 LD 泵浦的声光调 Q 准连续 Nd:YAG 激光器作为泵浦源,获得了 1561 ~ 1672nm 的可调谐输出,信号光在 1064nm 泵浦光平均功率为 1.728W 时,最大信号光输出为 297mW。

关键词:准相位匹配; PPMgLN; 光学参量振荡器; 温度调谐

中图分类号: TN753.91 **文献标识码:** A

Wavelength Tunable Quasi-phase Matched Optical Parametric Oscillator

GENG You-fu¹, YAO Jian-quan², TAN Xiao-ling¹, DIAO Shu-yan¹

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. Institute of Laser & Opto-electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on periodically poled LNbO₃ doped with MgO, the theoretical and experimental study on temperature-tuned signal-resonated quasi-phase-matched optical parametric oscillator (QPM-OPO) is described. A LD pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser is used as a pump source and the OPO generates signal wavelengths tunable in the range of 1561 ~ 1672nm, the maximum signal output power is 297mW at an average incident pump power of 1.728W.

Key words: quasi-phase-matched; PPMgLN; optical parametric oscillator; temperature-tuned

1 引言

准相位匹配技术 (QPM) 并不是一个新概念,早在 1962 年,诺贝尔奖的获得者 N. Bloembergen^[1] 在研究非线性介质中光波之间相互作用时,发现用非线性极化率的周期跃变可以实现非线性光学频率变换效率的增强,但是由于当时加工制作工艺的落后,无法制造出准相位匹配所需的晶体,致使其仅仅停留在理论阶段,直到 20 世纪 90 年代,随着周期极化晶体制作工艺的成熟,特别是外加电场极化法的成熟^[2], QPM 迅速走上了光学平台,进入了各种应用领域。1994 年 Bortz 等人^[3] 在用质子交换法制备的 LNbO₃ 准相位匹配光波导介质中,首次实现了准相位匹配光泵参量振荡器 (QPM-OPO),此后,各式各样的 QPM-OPO 迅速发展,各种材料的周期性极化晶体先后制备成功,晶体的尺寸不断加大。

本文主要利用掺氧化镁周期性极化铌酸锂 (PPMgLN) 实现了准相位匹配光学参量振荡, PPMgLN 晶体的损伤阈值大于 100mW/cm²,为不掺杂的 PPLN 光损伤阈值的 10 倍还多^[4],可以在室温下稳定运转,我们采用温度调谐方式,当晶体的温度从 30 变化到 180,获得了 1561 ~ 1672nm 范围内的信号光输出。

2 温度调谐的基本原理

在光学参量过程中,根据能量转化关系 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, 频率为 ω_p 的泵浦光在非线性介质传播的过程中,产生了频率为 ω_s 的信号光和频率为 ω_i 的闲频光,假设周期极化晶体在 z 轴方向极化,相互作用

作者简介:耿优福 (1981 -),男,郑州大学光学专业在读硕士研究生,主要从事非线性光学与光电子技术等方面的研究。

收稿日期: 2006-02-15; 修订日期: 2006-05-29

三波的偏振方向也均沿晶体的 z 轴方向。准相位失配量 k_Q 为^[5]:

$$k_Q = k_p - k_s - k_i - k_m$$

其中, k_p 、 k_s 和 k_i 分别是泵浦光、信号光和空闲光波矢; k_m 是 QPM 周期波矢。对共线 QPM 来说, $k_m = 2\pi / \Lambda$ 。其中, Λ 为极化周期, m 为准相位匹配阶数。

准相位失配量的大小可表示成为:

$$k_Q = 2\pi \left[\frac{n(p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda} \right]$$

式中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 分别是泵浦光、信号光和空闲光的波长; $n_e(p, T)$ 、 $n_e(s, T)$ 和 $n_e(i, T)$ 分别是温度为 T 时泵浦光、信号光和空闲光的 e 光折射率。这样, 共线 QPM-OPO 所应满足的能量守恒和动量守恒条件为^[6]:

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 & (1) \\ k_Q = 2\pi \left[\frac{n(p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda} \right] = 0 & (2) \end{cases}$$

由式 (1)、(2) 可见, QPM-OPO 的输出波长由以下几个因素决定: 晶体的种类 (决定了色散方程和热膨胀方程)、泵浦波长、晶体的极化周期 (室温下) 和晶体的工作温度。对某一种晶体来说, 如果知道了其在室温下的极化周期, 则 QPM-OPO 的输出波长由泵浦波长的大小和晶体温度的高低决定。因此, 在泵浦波长不变的情况下, 改变周期极化晶体的温度, 可以实现 QPM-OPO 的可调谐输出。

温度调谐是 QPM-OPO 的一种最常见的调谐方式, 其优点是可以在较大的波长范围内连续调谐, 但其缺点是调谐的速度较慢^[7]。

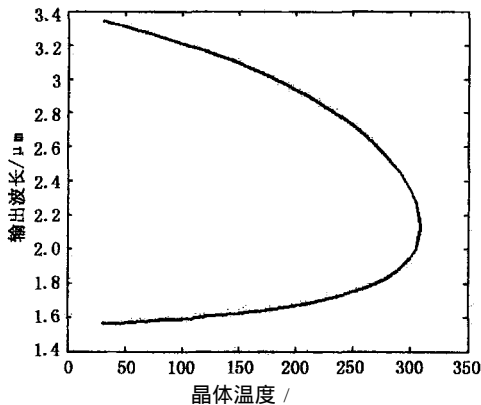


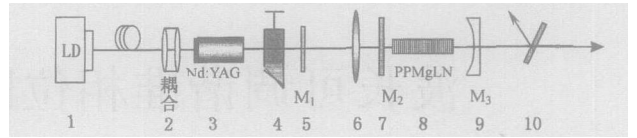
图 1 PPMgLN-OPO 输出信号光波长随温度变化的理论调谐曲线 ($\lambda_p = 1064\text{nm}$)

Fig 1 the theoretical tuning behavior of the 1064nm Nd YAG pumped PPMgLN-OPO

图 1 是 1064nm Nd YAG 光泵浦下, PPMgLN-

OPO 输出信号光波长随温度变化的理论调谐曲线。

3 实验装置



(1) 808nm 光纤耦合的半导体激光器; (2) 808nm 耦合系统; (3) Nd YAG 晶体; (4) 声光 Q 开关; (5) 1064nm 输出镜; (6) 1064nm 耦合镜 M_1 ; (7) 输入镜 M_2 ; (8) PPMgLN 晶体及温控炉; (9) 输出镜 M_3 ; (10) 滤光片

(1) 808nm-fiber-couple LD; (2) 808nm coupling system; (3) Nd YAG crystal; (4) Q switch; (5) 1064nm output mirror M_1 ; (6) 1064nm coupling system M_1 ; (7) input mirror M_2 ; (8) PPMgLN and its heating oven; (9) output mirror M_3 ; (10) filter

图 2 PPMgLN-OPO 实验结构图

Fig 2 schematic diagram of the PPMgLN-OPO

实验装置如图 2 所示, PPMgLN-OPO 的泵浦源采用 808nm LD 泵浦的声光调 Q Nd YAG 全固态激光器。Nd YAG 的掺杂浓度为 1%, 尺寸为 $4 \times 9\text{mm}$, 输入端镀 808nm 高透膜, 1064nm 高反膜。为提高 1064nm 输出光的光束质量, 我们采用平平腔结构, 腔长为 76mm, 1064nm 激光输出镜的透过率为 15%。声光 Q 的重复频率设定在 11.7kHz, 准连续输出 1064nm 功率与半导体激光器泵浦功率的关系如图 3 所示, 在 LD 泵浦功率为 9.85W 时, 输出 1064nm 平均功率为 1.728W, 此时的脉宽约为 135ns。

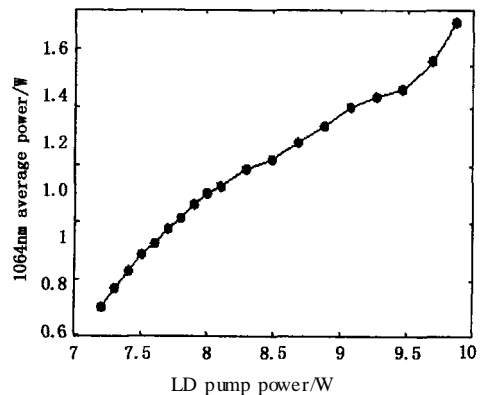


图 3 1064nm 输出功率随 LD 泵浦功率的变化

Fig 3 dependence of the generated 1064nm average power on the LD power

1064nm 的耦合镜采用焦距为 50mm 的单透镜, 距 1064nm 输出镜 122mm、PPMgLN 晶体的前端面 38mm 放置, 对 1064nm 光的透过率为 97%, 将 1064nm 输出光的光斑直径压缩为 $250\mu\text{m}$ 左右, 以提高单位面积的光功率密度。PPMgLN-OPO 采用信号光单谐振, M_1 为输入镜, 采用平平镜, 对 1064nm

透过率为 96.8%，1550 ~ 1700nm 的反射率为 99.89%； M_2 为输出镜，曲率半径为 100mm，1064nm 透过率 92.7%，1550 ~ 1700nm 的透过率为 14%，偏差为 $\pm 3\%$ ，OPO 腔长为 90mm。PPMgLN 晶体的周期为 $30.7\mu\text{m}$ ，周期偏差最坏为 $\pm 0.05\mu\text{m}$ ，在 z 轴方向极化，尺寸为 $50\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。实验中采用一阶准相位匹配，三波共线，波矢均沿 x 轴，把 PPMgLN 晶体置于一台我们自己特制的加热装置中，温度范围为 $30 \sim 180^\circ\text{C}$ ，加热到 180°C 平均需要 15min，采用 Pt100 作为温度传感器，温度控制精度高于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

4 输出信号光温度调谐特性

图 4 是 1064nm 光泵浦的 PPMgLN-OPO 输出信号光波长的温度调谐的实验结果曲线，图中的实线为理论计算曲线，上三角为信号光波长随晶体温度变化的实验值，方框为闲频光波长，是根据信号光的波长相应的计算得出，实验中获得的 PPMgLN-OPO 信号光的波长调谐范围为 $1.561 \sim 1.672\mu\text{m}$ ，相应的晶体温度为 $30 \sim 180^\circ\text{C}$ 。由于 PPMgLN 的热膨胀方程至今还没有报道，我们在理论计算的过程中采用了 PPLN 的热膨胀方程做近似计算，因此有一定的误差。

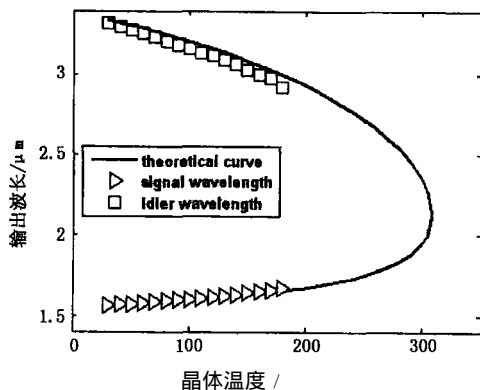


图 4 PPMgLN-OPO 信号光波长温度调谐的实验结果曲线

Fig 4 the wavelengths of the generated signal light as functions of temperature of the PPMgLN crystal ($\lambda_p = 1064\text{nm}$, $\Lambda = 30.7\mu\text{m}$)

5 输出功率特性

当 1064nm 泵浦光的重复频率为 11.7kHz，测得 180°C 下 PPMgLN-OPO 的阈值为 699mW，单脉冲能量为 $60.17\mu\text{J}$ 。图 5 是不同泵浦水平下，1672nm 信号光输出平均功率随 1064nm 泵浦平均功率的变化曲线，在 1064nm 泵浦光平均功率为 1.728W 时，1672nm 信号光获得 297mW 输出，相对应的信号光转换效率为 17.2%。

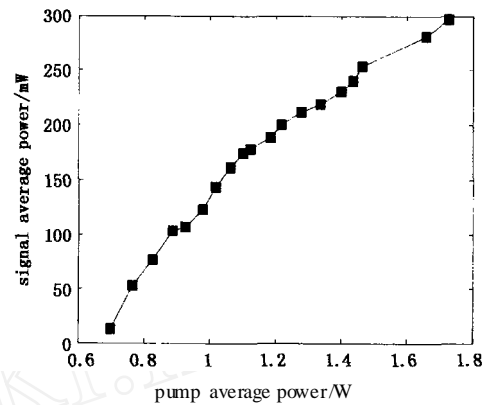


图 5 信号光输出平均功率随 1064nm 泵浦光平均功率的变化曲线 (PPMgLN 晶体的温度 180°C)

Fig 5 the output signal average power versus 1064nm average power at the temperature of 180°C

图 6 为 1672nm 信号光的转化效率随 1064nm 泵浦平均功率的变化图，从图上可以看出，如果定义光光转化效率为：输出信号光平均功率 / 泵浦光输入平均功率，则随着泵浦功率的变化，其光光转化效率是逐渐增大的，并趋近于最大值 18%。

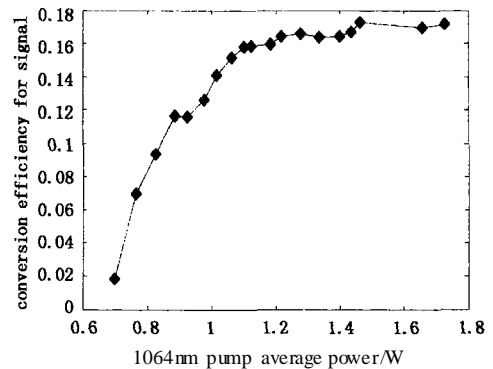


图 6 信号光转化效率随 1064nm 泵浦平均功率的变化曲线

Fig 6 the conversion efficiency of signal light as a function of 1064nm pump average power

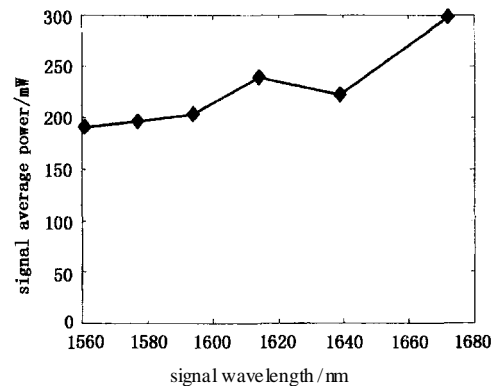


图 7 PPMgLN-OPO 信号光输出功率随信号光波长的变化曲线 (PPMgLN 晶体的温度 $30 \sim 180^\circ\text{C}$ ，1064nm 的重复频率 11.7kHz)

Fig 7 the output power of signal light versus the wavelength of signal light

(下转第 867 页)

选取这四个要素中的相关要素决定函数。 x 和 y 是成像型探测器的每个像素点的水平和垂直坐标; R 是目标与探测器之间的距离; $\tau(\lambda)$ 是针对不同波长的大气透过率。

$$f(\lambda) = 1 \left[\begin{array}{cccc} x_1, y_1 & x_2, y_1 & \cdots & x_m, y_1 \\ x_1, y_2 & x_2, y_2 & \cdots & x_m, y_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_1, y_n & x_2, y_n & \cdots & x_m, y_n \end{array} \right] \quad (4)$$

式中, m 和 n 为探测器在 x 和 y 轴上的像素数值; $\tau_{x,y}$ 为各项素点的大气透过率修正值。

在定波长条件下,各像素点之间大气透过率修正值的不同主要是由探测距离的差值引起的。包括目标与背景的距离差和同目标不同区域的距离差。

因为不同波长的红外辐射在相同大气传输距离内,大气透过率是不相同的,所以在波长范围 $\lambda_1 - \lambda_n$ 内, $\tau_{x,y}$ 可依据 τ 值的不同分为:

$$\tau_{x,y} = [\tau(x,y)_1 \quad \tau(x,y)_2 \quad \cdots \quad \tau(x,y)_n] \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)可以得出:

$$f(\lambda) = 1 \left\{ \begin{array}{l} [\tau(x_1, y_1)_1 \cdots \tau(x_1, y_1)_n] \cdots [\tau(x_m, y_1)_1 \cdots \tau(x_m, y_1)_n] \\ \cdots \cdots \cdots \\ [\tau(x_1, y_n)_1 \cdots \tau(x_1, y_n)_n] \cdots [\tau(x_m, y_n)_1 \cdots \tau(x_m, y_n)_n] \end{array} \right\} \quad (6)$$

而大气透过率 τ 的一般计算公式为:

$$\tau = \exp[-(\mu + K)R] = \exp[-(\mu + K(\lambda))R] \quad (7)$$

式中, μ 为消光系数; $\mu(\lambda)$ 为吸收系数; $K(\lambda)$ 为散射系数; R 为红外辐射源到探测器之间的测量距离。

由公式(7)可知, τ 的值可由两种方法获得:1)可通过经验公式计算得出 $\mu(\lambda)$ 和 $K(\lambda)$ 的值,从而得到 τ 的值;2)也可通过实际测量直接得到 τ 的值,从而得到 τ 的值。

将在公式(7)中计算得出的 τ 值代入公式(6),就可以获得大气透过率修正函数 $f(\lambda)$ 。

4 结论

本修正函数可针对成像型探测器每个像素点进行红外大气透过率修正,也可通过 m 、 n 及 τ 等参数的设定用于其它类型红外探测器的大气修正。

参考文献:

- [1] 上海市红外物理与技术译丛编辑组. 红外大气传输的研究[M]. 上海:上海科学技术情报研究所, 1975.
- [2] 克利克苏诺夫. 红外技术原理手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1986.
- [3] 梅遂生,等. 光电子技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.

(上接第 863 页)

在 1064nm 泵浦平均光功率为 1.728W 时,我们还测量了 OPO 的输出功率随输出波长的变化如图 7 所示,在长信号光波长时,信号光输出的功率较大一些。

6 结论

本文利用具有高损伤阈值的掺氧化镁周期性极化铌酸锂晶体,采用 LD 泵浦的声光调 Q Nd:YAG 激光器作为泵浦源,信号光单谐振可调谐输出范围为 1561~1672nm,相应的温度的调谐范围为 30~180℃,在输出 1672nm 信号光时,获得了最大的功率输出 297mW,实验的结果与理论分析是基本吻合的。

参考文献:

- [1] F A Armstrong, N B Bøenbergen, J Ducuing, et al Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric [J]. Phys Rev, 1962, 127: 1918 - 1939.
- [2] M Yamada, N Nada, M Saitoh, et al First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue, second-har-

monic generation [J]. Appl Phys Lett, 1993, 62 (5): 435 - 436.

- [3] M L Bortz, M A Arbore, M M Fejer Quasi-phase-matched optical parametric amplification and oscillation in periodically poled LiNbO₃ waveguides [J]. Opt Lett, 1995, Vol 20, p. 49 - 51.
- [4] Yasukazu Nigei, Akinori Harada, et al Bulk periodically poled MgO:LiNbO₃ with high optical damage resistance [A]. Conference on Lasers and Electro-Optics 2000. 5: 632 - 632.
- [5] Yiyi Guan, Joseph, W Haus, et al Broadband and off-axis optical parametric generation in periodically poled LiNbO₃ [J]. J. Opt Soc Am. B, 2004, 21 (6): 1225 - 1233.
- [6] L E Myers, Walter R, Bosenberg Periodically Poled Lithium Niobate and Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillators [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33 (10): 1663 - 1672.
- [7] Yao Jianquan, Zhang Baigang, Lu Yang, et al Wavelength Tunable Optical Oscillator Based on Periodically Poled Lithium Niobate [J]. Journal of Synthetic Crystal, 2004, 33 (4): 465 - 470.