

1 064 nm 泵浦的角度调谐 PPLN 光学参量振荡器^{* *}

张 浩^{1,2,3 * *}, 姚建铨^{1,2,3,4}, 张百钢^{1,2}, 丁 欣^{1,2}, 徐德刚^{1,2},
王 鹏^{1,2}, 王瑞康^{1,2}, 郑 义⁴

(1. 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072; 2. 南开大学-天津大学联合研究院, 天津 300072; 3. 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 郑州大学河南省激光技术应用重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘要:用声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出的 1 064 nm 的激光做泵浦源, 用单周期的周期极化 LiNbO₃ (PPLN), 实现了角度调谐的准相位匹配 (QPM) 光参量输出。达到了内部角度 4.74° 的角度调谐 (对应于外部角度 10.30° 的旋转), 信号光调谐范围为 1 499.9 ~ 1 506.5 nm; 由于晶体温控炉尺寸的限制, 没有实现大角度调谐。

关键词:准相位匹配 (QPM); 周期极化 LiNbO₃ (PPLN); 角度调谐

中图分类号: O437.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2003)12-1250-04

Angle-tuned Optical Parametric Oscillators Based on PPLN Pumped by 1 064 nm Laser

ZHANG Hao^{1,2,3 * *}, YAO Jian-quan^{1,2,3,4}, ZHANG Bai-gang^{1,2}, DING Xin^{1,2},
XU De-gang^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, WANG Rui-kang^{1,2}, ZHENG Yi⁴

(1. Key Lab. of Optoelectronics Information Science and Technology, Institute of Lasers and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Nankai University-Tianjin University Joint Research Institute, Tianjin 300072, China; 3. State Key of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Henan Key Laboratory of Laser Technology and Application, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: An angle-tuned quasi-phase-matched (QPM) optical parametric oscillator, which uses periodically poled LiNbO₃ (PPLN) with a single grating period and pumped by a 1 064 nm acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ laser, was presented. The 4.74° internal angular tuning, which would correspond to ~10.30° external angular rotation, was achieved. The signal tuning range is from 1 499.9 nm to 1 506.5 nm. The tuning range is small for the limitation of the size of PPLN and its temperature controller.

Key words: quasi-phase-matching (QPM); periodically poled LiNbO₃ (PPLN); angle-tuned

1 引言

光参量过程必须满足相位匹配条件。双折射相位匹配 (BPM) 是利用单轴或双轴非线性晶体的双折射特性和色散特性, 通过选择光波的波矢方向和偏振方向来实现的。因此需要满足特殊方向切割或需要

特定的工作温度。准相位匹配 (QPM)^[1] 是通过周期改变非线性晶体的二阶非线性极化率方向, 来补偿光参量过程中由于折射率色散造成的泵浦光与参量光之间的相位失配。其优点是可以人为地根据晶体的折射率色散设计周期, 这样可以选晶体最大的非线性系数。

* 收稿日期: 2003-04-01

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60278001); 教育部博士点基金资助项目; 教育部南开大学、天津大学科技合作基金资助项目; 激光技术国家重点实验室 (华中科技大学) 开放基金资助项目 ([2001]0104); 天津大学优秀博士学位论文基金资助项目

* * E-mail: zhh77@you.com

常见的用于 QPM 的周期极化晶体有周期极化 LiNbO₃ (PPLN)、PPKTP、PPRTA 和 PPLT 等^[2~6]。目前基于非共线相位匹配的角度调谐已在许多晶体中实现^[7~10],但基于 PPLN 的非共线 QPM 的研究还不多,例如有:关于非共线 QPM 飞秒系统的研究^[11],Steven T. Yang 等人^[10]实现了基于 PPLN 非共线 QPM 空闲光角度调谐输出等。我们采用全固态调 Q Nd:YVO₄ 激光器的 1 064 nm 输出光泵浦 PPLN 晶体组成光学参量振荡器(OPO),通过旋转晶体的角度实现了 1 499.9~1 506.5 nm 信号光单谐振可调谐的 QPM PPLN-OPO。

2 原理及计算

QPM 过程中,相位失配量 k 满足^[12]

$$k = k_3 - k_1 - k_2 - k_m$$

式中 $k_m = 2\pi m/\Lambda$, Λ 为极化周期, $m = 1, 3, 5, \dots$ 为 QPM 阶数。我们取 $m = 1$,称之为 一阶 QPM。则 k 的波长表达式为

$$k = 2\pi \left(\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\Lambda} \right)$$

当 $k = 0$ 时,满足相位匹配条件。同时 3 波还要满足能量守恒关系

$$\frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1} \tag{1}$$

如图 1 所示:设在 PPLN 外,泵浦光与 PPLN 入射端面法线夹角为外部角度 θ_{out} ;在 PPLN 内,泵浦光与 PPLN 入射端面法线夹角为内部角度 θ_{in} 。

则 θ_{in} 与 θ_{out} 的关系为

$$\sin \theta_{out} = n_3 \sin \theta_{in} \tag{2}$$

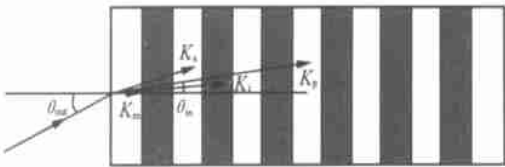


图 1 内部角度 θ_{in} 与外部角度 θ_{out} 的关系

Fig.1 Schematic of the relation between internal angular θ_{in} and external angular θ_{out}

当 PPLN 旋转角 θ_{out} ,如果近似认为在垂直泵浦光方向上 k 为零^[11],则可以只考虑在平行于泵浦光方向上的相位失配^[7],即

$$k = 2\pi \left(\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{\cos \theta_{in}}{\Lambda} \right) \tag{3}$$

利用 PPLN 与温度有关的色散方程^[13],联立 (1)、(2) 和 (3) 式可得 PPLN-OPO 的输出波长随

PPLN 旋转角度 θ_{out} 的变化曲线,如图 2 所示。

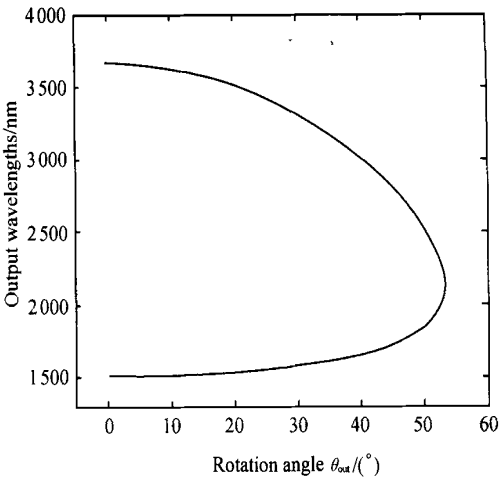


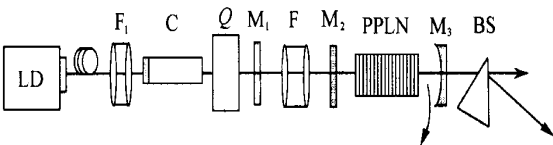
图 2 1 064 nm 泵浦的周期为 29 μm 的 PPLN-OPO 在 140 ° 时的理论角度调谐曲线

Fig.2 The calculated angle-tuning curve for 29 μm period PPLN-OPO pumped by 1 064 nm laser at 140 °

3 实验装置

实验所用 PPLN 的尺寸为 1 mm \times 5 mm \times 50 mm, Λ 为 29 μm 。晶体两端镀有对 1 064 nm、1 400~1 600 nm 波长光的增透膜。

实验装置如图 3 所示,泵浦源是 17 W 激光二极管泵浦的调 Q 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器。鉴于声光 Q 开关功率的限制,重复频率为 19 kHz。所用 Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm。1 064 nm 光经一透镜组聚焦后,光斑半径约为 100 μm 。OPO 腔由平面输入耦合镜 M₂ 和曲率半径为 100 mm 的平凹输出耦合镜 M₃ 组成。腔长约为 90 mm。输入耦合镜 M₂ 对 1 064 nm 波长的光 95 %高透,对信号光 >99 %高反。输出耦合镜 M₃ 对信号光 12 %透过,对泵浦光 80 %反射。它们对闲频光(3~4 μm)都是高吸收,这样 OPO 对信号光单谐振。



F₁, F₂: Focusing optics; C: Nd:YVO₄; Q: Q switch; M₁, M₂, M₃: Coupler mirrors; BS: Beam splitter

图 3 PPLN-OPO 实验装置

Fig.3 Experimental setup of PPLN-OPO

4 实验结果

4.1 调谐曲线

由于 PPLN 的光损伤阈值与温度有关,温度升高光损伤阈值也明显升高^[14]。所以,为避免晶体光折变损伤,我们把 PPLN 晶体装在温控炉里。实验过程中,炉子的温度始终保持在 140℃。温控炉固定在可以绕晶体 Z 轴水平旋转的高精度调整架上。调谐曲线如图 4 所示。可以看出,理论值与实验值吻合得较好。

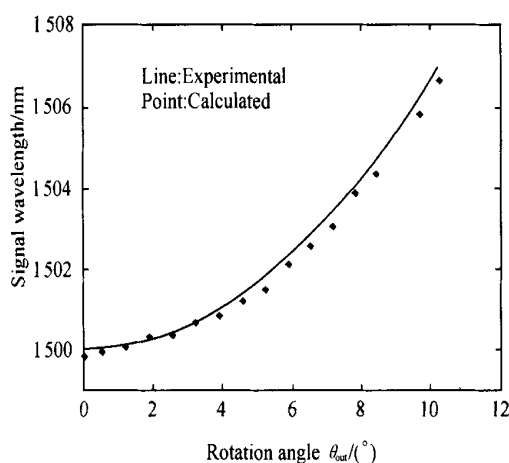


图 4 角度调谐曲线的计算值与实验值

Fig. 4 Experimental and calculated angle-tuning curves

4.2 输出信号光的光谱

在 140℃ 条件下,用 Agilent 的 86142B 型光纤光谱仪测得了在不同旋转角度(θ_{out})的情况下信号光的光谱。图 5 是旋转角度为零时信号光的光谱,图 6 是旋转角度为 10.3° 时信号光的光谱。

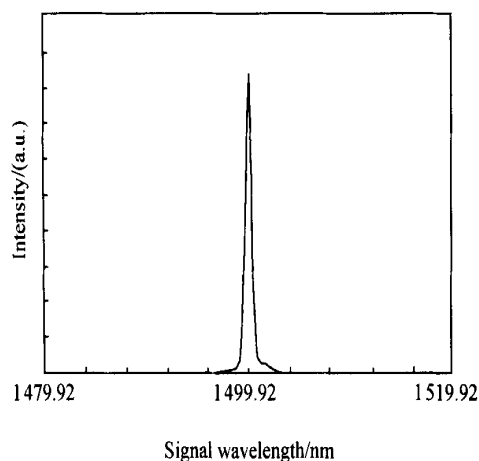


图 5 旋转角度为零度时信号光的光谱

Fig. 5 The spectrum of signal at $\theta_{out} = 0.0^\circ$

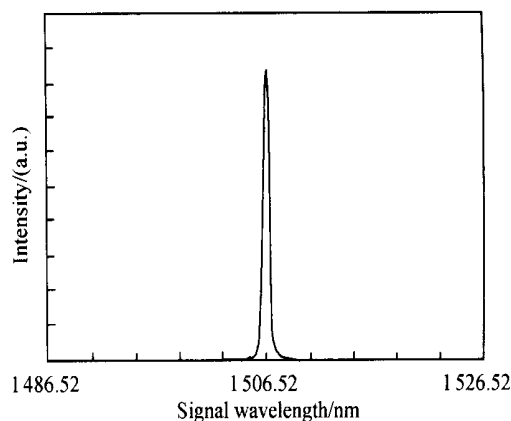


图 6 旋转角为 10.3° 时信号光的光谱

Fig. 6 The spectrum of signal at $\theta_{out} = 10.3^\circ$

5 结 论

实现了全固态 Nd:YVO₄ 激光器 1064 nm 泵浦的 PPLN-OPO 的角度调谐输出。由于温度控制装置尺寸的限制,只实现了小角度的调谐。证明了在小角度情况下理论调谐曲线与实验曲线吻合的较好,所以在温度调谐方式下,可以用小角度调谐作为一种辅助调谐方式,来实现更快速、更精确的波长调谐。旋转一定角度后,泵浦光是沿一定的角度入射 PPLN 晶体的,造成损耗增大。如果将 PPLN 晶体的入射面制成圆弧形或者将 PPLN 晶体做成圆盘形^[7],将减小损耗,还可实现大角度宽带调谐。

台湾 HCP 公司为该实验提供了 PPLN 晶体和温控炉,成都周九林老师为该实验镀制了大量镜片。在此一并致谢!

参 考 文 献:

- [1] M M Fejer, G A Magel, D H Jundt, et al. Quasi-phase-matched second harmonic generation[J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(11): 2631-2654.
- [2] L E Myer, R C Eckardt, M M Fejer, et al. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1995, 12(11): 2102-2116.
- [3] Yasuo Kitaoka, Kiminori Mizuuchi, Kazuhisa Yamamoto, et al. Intracavity second-harmonic generation with a periodically domain-inverted LiTaO₃ device[J]. Opt. Lett., 1996, 21(24): 1972-1974.
- [4] D T Reid, Z Penman, M Ebrahimzadeh, et al. Broadly tunable infrared femtosecond optical parametric oscillator based on periodically poled RbTiAsO₄[J]. Opt. Lett., 1997, 22: 1397-1399.

- [5] A Garashi, A Arie, A Skliar, et al. Continuous-wave optical parametric oscillator based on periodically poled KTiOPO_4 [J]. Opt. Lett., 1998, **23**(22): 1739-1741.
- [6] SANG Mei, XUE Ting, YU Jian, et al. Temperature dependence of the second harmonic generation in periodically poled LiNbO_3 crystal [J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2002, **13**(4): 343-348. (in Chinese)
- [7] J P Fève, O Pacaud, B Boulanger, et al. Widely and continuously tunable optical parametric oscillator based on a cylindrical periodically poled KTiOPO_4 crystal [J]. Opt. Lett., 2001, **26**(23): 1882-1884.
- [8] K Kato. Parametric oscillation at $3.2 \mu\text{m}$ in KTP pumped at $1.064 \mu\text{m}$ [J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, **27**(5): 1137-1140.
- [9] J P Fève, O Pacaud, B Boulanger, et al. Tunable phase-matched optical parametric oscillators based on a cylindrical crystal [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2002, **19**(2): 222-233.
- [10] S T Yang, S P Velsko. Frequency-agile kilohertz repetition-rate optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. Opt. Lett., 1999, **24**(3): 133-135.
- [11] Lin Fei, Qian Lie-jia. Noncollinear phase and group-velocity matching of femtosecond optical parametric amplification based on periodically poled lithium niobate [J]. Chinese J. Lasers, 2002, **29**(7): 586-590. (in Chinese)
- [12] ZHANG Bai-gang, YAO Jia-rquan, WANG Peng, et al. Studies on grating period acceptance of periodically poled crystal for SHG [J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2002, **13**(4): 405-408. (in Chinese)
- [13] D H Jundt. Temperature-dependent sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. Opt. Lett., 1997, **22**(20): 1553-1555.
- [14] M Taya, M C Bashaw, M M Fejer. Photorefractive effects in periodically poled ferroelectrics [J]. Opt. Lett., 1996, **21**(12): 857-859.

作者简介:

张 浩 (1978 -), 男, 硕士生, 从事半导体激光器泵浦的固体激光器及非线性光学频率变换的研究。