

文章编号: 0258-7025(2010)02-0358-04

角度调谐双信号光运转准相位匹配光学参量的产生

纪 峰^{1,2} 卢荣胜¹ 李保生¹ 张百钢² 姚建铨²

(¹ 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)
(² 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 利用声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出的 1064 nm 激光抽运周期极化掺氧化镁 LiNbO₃ (PPMgLN) 晶体, 实现了角度调谐的双信号光运转准相位匹配 (QPM) 光参量输出。PPMgLN 晶体长 50 mm, 具有周期相位反转结构, 极化周期 29.6 μm, 相位反转周期 6.808 mm, 利用外加电场极化法制作, 极化沿晶体的 z 向进行。在晶体外部旋转角度为 0°~8° 范围内, 实现了双信号光波在 1474.8~1479 nm 和 1489.5~1495.2 nm 波段的快速调谐输出。对角度调谐准相位匹配进行了相应的理论分析, 理论结果与实验值较为一致。

关键词 非线性光学; 光学参量产生; 准相位匹配; 双信号光运转; 角度调谐

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0358

Angle-Tuned Dual-Signal Quasi-Phase Matching Optical Parametric Generator

Ji Feng^{1,2} Lu Rongsheng¹ Li Baosheng¹ Zhang Baigang² Yao Jianquan²

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

² College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Angle-tuned dual signal quasi-phase-matched (QPM) optical parametric generator (OPG) based on periodically poled MgO-doped lithium niobate (PPMgLN) pumped by an acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ laser is reported. The PPMgLN crystal is 50 mm long and has a periodical phase reversed grating structure. The grating period is 29.6 μm and the phase reversed period is 6.808 mm. The crystal is periodically poled along the z-axis by using the external electric poling technique. While the crystal is rotated over the range of 0°~8°, the dual signal wavelengths can be rapidly tuned from 1474.8 to 1479 nm and 1489.5 to 1495.2 nm. The theoretical analysis for angle-tuned dual signal OPG is also presented. The calculated results show good agreement with the experimental data.

Key words nonlinear optics; optical parametric generator; quasi-phase matching; dual signal-wave; angle-tuned

1 引 言

准相位匹配 (QPM) 光参量技术是获得高功率可调谐红外相干光源的有效手段^[1~5]。QPM 器件的突出优点是不依赖于晶体的内在特性, 周期结构可以人为地根据晶体的折射率色散和需要的频率变换过程加以设计。这样, 除了可以利用晶体最大的有效非线性系数以及在介质的整个透明波段上实现

匹配以外, 还可以设计出各种特殊的周期结构, 在一块晶体上同时实现两个或者两个以上的二阶非线性频率变换过程。关于这方面的报道有南京大学 Zhu Shining 等^[6] 利用 Fibonacci 结构的准周期极化晶体, 成功地实现了基频光波的直接三倍频; 中国科学院物理研究所顾本源等^[7] 提出利用模拟退火算法优化非周期极化晶体的设计方法以实现多波长倍频;

收稿日期: 2009-02-09; 收到修改稿日期: 2009-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (50875074)、教育部基金项目 (108073)、合肥工业大学博士专项基金 (GDBJ2008-026) 和合肥工业大学创新团队项目资助课题。

作者简介: 纪 峰 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非线性光学频率变换方面的研究。E-mail: jifengtju@163.com

在光参量方面,利用具有级联结构或者周期相位反转结构的周期极化晶体,可以实现双信号光波的同时振荡输出^[8,9]。我们也曾报道过这方面的工作,利用周期相位反转的周期极化掺氧化镁 LiNbO₃ (ppr-PPMgLN)晶体,实现了双信号光运转的光学参量直接产生(OPG)^[10]。在实验中,通过改变晶体温度实现了双信号光波长在大范围内的连续调谐输出,但温度调谐存在着调谐速度慢的缺点。为了获得双信号光波长的快速、精确调谐输出,本文采用直接旋转晶体角度,实现了双信号光运转光学参量产生的角度调谐输出,同时进行了相应的理论分析。

2 理论分析

对于单周期极化晶体,其一阶共线准相位匹配的相位失配量可表示为

$$\Delta k_Q = 2\pi \left(\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda_1} \right), \quad (1)$$

式中 λ_p, λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光波长, n_p, n_s 和 n_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的折射率, Λ_1 为极化周期。

如果以 Λ_2 为周期,对单周期极化晶体的二阶非线性系数进行再调制,可以得到比单周期极化晶体更多的倒格矢来满足相位匹配,这样就可以利用一块晶体同时实现多个频率变换过程, Λ_2 称为相位反转周期。

利用具有相位反转结构的周期极化晶体可以实现光参量过程中双信号光波的输出,对于两组抽运光、信号光和闲频光,其相位失配量可表示为

$$\begin{aligned} \Delta k_{Q1} &= \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s1}}{\lambda_{s1}} - \frac{n_{i1}}{\lambda_{i1}} - \frac{1}{\Lambda_1} - \frac{1}{\Lambda_2}, \\ \Delta k_{Q2} &= \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s2}}{\lambda_{s2}} - \frac{n_{i2}}{\lambda_{i2}} - \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

当 $\Delta k_{Q1} = \Delta k_{Q2} = 0$ 时,满足相位匹配条件。同时双信号光波还满足能量守恒关系

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_{s1}} + \frac{1}{\lambda_{i1}} = \frac{1}{\lambda_{s2}} + \frac{1}{\lambda_{i2}}. \quad (3)$$

根据(2),(3)式,选择 $\Lambda_1 = 29.6 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 6.808 \text{ mm}$,晶体材料为掺氧化镁 LiNbO₃,这样可以实现1064 nm抽运的在1500 nm附近间隔十几纳米的双信号光输出。

对于角度调谐的光参量过程,图1给出了相互作用三波波矢间关系的示意图。在 PPMgLN 晶体外,抽运光与 PPMgLN 入射端面法线夹角为外部角度 θ_{out} ,在 PPMgLN 晶体内,抽运光与 PPMgLN

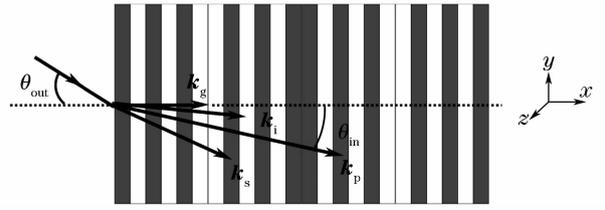


图1 角度调谐准相位匹配各波矢间的关系示意图
Fig.1 Schematic diagram of the relations among the wave vectors in angle-tuned QPM

入射端面法线夹角为内部角度 θ_{in} 。则 θ_{out} 与 θ_{in} 之间的关系为

$$\sin \theta_{\text{out}} = n \sin \theta_{\text{in}}, \quad (4)$$

式中 n 为抽运光在晶体中的折射率。

由于三波波矢不共线,又不存在谐振腔对信号光和闲频光进行限制,无法确切知道信号光和闲频光的传播方向,因此无法对信号光和闲频光的输出波长进行精确求解。当 PPMgLN 晶体旋转 θ_{out} 时,如果近似认为抽运光、信号光和闲频光的传播方向相同,则在抽运光方向上极化周期和相位反转周期可分别用 $\Lambda_{1\text{eff}} = \Lambda_1 / \cos \theta_{\text{in}}$ 和 $\Lambda_{2\text{eff}} = \Lambda_2 / \cos \theta_{\text{in}}$ 来表示,并代替(2)和(3)式中的 Λ_1 和 Λ_2 ,这样就可以得到双信号光波在晶体不同旋转角度下的相位失配量的表达式

$$\begin{aligned} \Delta k_{Q1} &= \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s1}}{\lambda_{s1}} - \frac{n_{i1}}{\lambda_{i1}} - \frac{\cos \theta_{\text{in}}}{\Lambda_1} - \frac{\cos \theta_{\text{in}}}{\Lambda_2}, \\ \Delta k_{Q2} &= \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_{s2}}{\lambda_{s2}} - \frac{n_{i2}}{\lambda_{i2}} - \frac{\cos \theta_{\text{in}}}{\Lambda_1} + \frac{\cos \theta_{\text{in}}}{\Lambda_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

利用 PPMgLN 晶体的色散方程,联立(3)~(5)式,就可以得到 PPMgLN-OPG 的双信号光输出波长随 PPMgLN 晶体旋转角度 θ_{out} 的变化曲线,如图2所示。

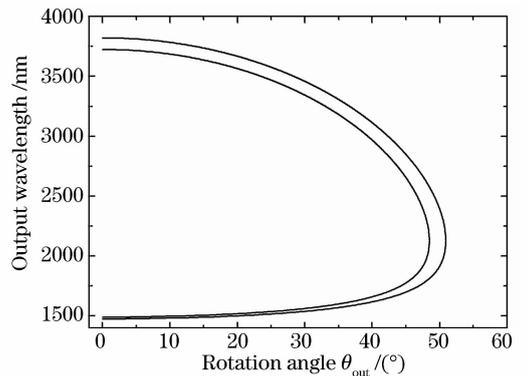


图2 1064 nm 抽运的 ppr-PPMgLN OPG 在室温下(25 °C)的理论角度调谐曲线

Fig.2 Calculated angle-tuning curve for ppr-PPMgLN OPG pumped at 1064 nm at room temperature (25 °C)

3 实验装置

实验所用晶体尺寸为 $1\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 利用外加电场极化法制作, 极化沿晶体的 z 向进行, 晶体极化长度为 47.656 mm , 在两端各有 1.172 mm 的未极化区域, 晶体两端镀有抽运光、信号光和闲频光三波段的增透膜。

实验装置如图 3 所示, 抽运源是德国 Bavarian Photonics 公司生产的 1064 nm Nd:YVO₄ 全固态激光器 (Aion Industrial-V, 型号 DSPPL-1064-8-V), 工作在准连续状态, 重复频率 $1 \sim 100\text{ kHz}$ 可调, 实验中重复频率设定在 25 kHz 。抽运激光输出光束模式为 TEM₀₀ 模, 光束质量因子 $M^2 < 1.3$, 经 100 mm 的聚焦镜聚焦在晶体中心部位, 光斑半径约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。实验中采用一阶准相位匹配, 抽运光、信号光和闲频光均沿晶体 z 向。晶体置于温控炉中, 工作温度从室温到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 可调, 温控精度为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。放置在晶体后的分束镜仅对信号光波段高透。

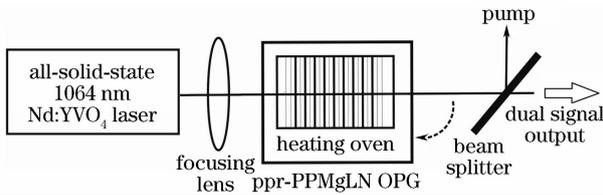


图 3 角度调谐 ppr-PPMgLN OPG 的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of the angle-tuned ppr-PPMgLN OPG

4 实验结果与讨论

4.1 调谐曲线

PPMgLN 晶体能够克服光折变效应而工作在室温下, 但由于实验室恒温系统性能不佳, 为防止室温变化对输出波长造成扰动, 将晶体温度控制在 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 。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。在实验中, 通过在 $0^\circ \sim 8^\circ$ 范围内旋转晶体角度, 实现了双信号光波在 $1474.8 \sim 1479\text{ nm}$ 和 $1489.5 \sim 1495.2\text{ nm}$ 波段的快速调谐输出, 调谐曲线如图 4 所示。可以看出, 理论与实验值吻合得较好。这说明本文所做的理论分析在晶体旋转角度不大的情况下是一种良好的近似。

4.2 输出光谱

利用 Agilent 的 86142 型光纤光谱仪测得在不同旋转角度的情况下双信号光的光谱。图 5 是旋转角度为零时双信号光光谱, 图 6 是旋转角度为 8° 时的双信号光光谱。从图中可以看出, 当增大晶体旋

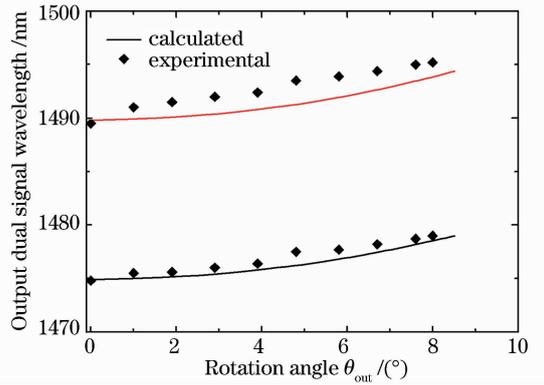


图 4 角度调谐 OPG 理论与实验值的比较

Fig. 4 Comparison between the experimental and calculated values for the angle-tuned OPG

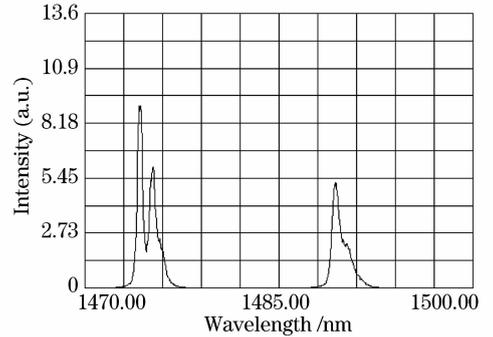


图 5 旋转角度为零时双信号光的光谱

Fig. 5 Spectrum of dual signal at $\theta_{\text{out}} = 0^\circ$

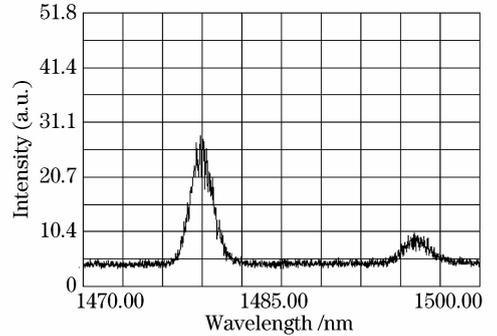


图 6 旋转角度为 8° 时双信号光的光谱

Fig. 6 Spectrum of dual signal at $\theta_{\text{out}} = 8^\circ$

转角度时, 由于长波长信号光经历的走离更为严重, 在总的输出功率所占的比重逐步下降。

4.3 阈值与输出功率

随着晶体旋转角度的增加, OPG 的阈值也逐渐增加。在晶体外部旋转角从 0° 增加到 8° 的过程中, OPG 的阈值由 1.44 W 增加到 2.5 W 。在 3 W 的抽运功率下, 在 0° 和 8° 的转角下获得的双信号光输出功率分别为 205 mW 及 5.7 mW , 信号光到抽运光的转换效率分别为 6.8% 和 0.19% , 这说明角度调谐带来的走离效应对输出功率的影响是比较大的。

5 结 论

实现了全固态 Nd:YVO₄ 激光器 1064 nm 抽运的 PPMgLN-OPG 双信号光角度调谐输出。由于温度控制装置尺寸的限制,只实现了小角度的调谐。在温度调谐的方式下,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。这种间隔十几纳米可调谐输出的双波长在环境监测、光谱学研究以及非线性光学差频产生太赫兹波等许多重要领域都有着潜在的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low threshold and wide tunable PPLN optical parametrical oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):10~13
梁晓燕,侯 玮,吕军华等. 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡 [J]. 中国激光, 2002, **A29**(1):10~13
- 2 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. Continuously tunable optical parametric oscillator based on multi-grating periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):897~902
张百钢,姚建铨,丁 欣等. 连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):897~902
- 3 Tieli Zhang, Baigang Zhang, Haifeng Li *et al.*. A tunable optical parametric generator by using a quasi-phase-matched crystal with different wedge angles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):234~236
- 4 Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Low-threshold widely-tunable intracavity Q-switched Nd:YVO₄/PPLN optical parametric generator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1643~1647
纪 峰,姚建铨,张百钢等. 低阈值宽调谐的内腔调 Q Nd:YVO₄/PPLN 光学参量产生 [J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1643~1647
- 5 Ji Feng, Zhang Baigang, Li Enbang *et al.*. A low-pump-threshold high-repetition-rate intracavity optical parametric generator in periodically poled lithium niobate [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8):2113~2116
- 6 Shining Zhu, Yongyuan Zhu, Naiben Ming. Quasi-phase-matched third-harmonic generation in a quasi-periodic optical superlattice [J]. *Science*, 1997, **278**:843~846
- 7 Benyuan Gu, Bizhen Dong, Yan Zhang *et al.*. Enhanced harmonic generation in aperiodic optical superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(15):2175~2177
- 8 Kodo Kawase, Takaaki Hatanaka, Hidenori Takahashi *et al.*. Tunable terahertz-wave generation from DAST crystal by dual signal-wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(23):1714~1716
- 9 Yuzo Sasaki, Avetisyan Yuri, Kodo Kawase *et al.*. Terahertz-wave surface-emitted difference frequency generation in slant-stripe-type periodically poled LiNbO₃ crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(18):3323~3325
- 10 Ji Feng, Li Xifu, Zhu Shining *et al.*. Efficient nanosecond dual-signal optical parametric generator with a periodically phase reversed PPMgLN [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(11):3157~3159