

# 周期极化晶体光参量过程的调谐特性分析

薛俊文 安玉磊 谢海军 苏秉华

北京理工大学珠海学院信息学院, 广东 珠海 519088

**摘要** 以周期极化晶体 MgO:sPPLT 为研究对象,根据该晶体的折射率随波长、温度变化的色散方程及极化周期随温度的热膨胀关系,并紧密结合频率变换过程中的能量守恒条件,给出详细算法,得到了 532 nm 抽运光的光参量过程近红外波段温度调谐特性。通过增加极化周期,进一步得到 1064 nm 抽运该晶体的光参量过程中红外波段温度不敏感特性。调整或忽略极化周期项,更换晶体的色散方程,该研究方法可推广到其他准相位匹配或相位匹配非线性晶体的参量变换调谐特性研究。

**关键词** 激光光学;周期极化晶体;光参量放大;光参量振荡;调谐

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.061410

## Tuning Characteristics of Periodically Poled Crystals in Optical Parameter Process

Xue Junwen An Yulei Xie Haijun Su Binghua

School of Information Technology, Zhuhai Campus, Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Guangdong 519088, China

**Abstract** The temperature-tuning characteristic of periodically poled crystal, taking MgO:sPPLT as an example, in the optical parameter process in the near infrared range with 532 nm pumping laser is studied by considering Sellmeier equation for the change of crystal refractive index with wavelength and temperature, the thermal expansion of poled period with temperature, and the energy conservation condition during frequency conversion process. By increasing the poled period, the non-temperature-sensitive characteristic at the mid-infrared range with 1064 nm pumping laser is also obtained. Just by adjusting or ignoring the poled period term, and replacing the crystal dispersion equation, the method can be easily extended to other quasi-phase matched or phase-matched nonlinear crystals.

**Key words** laser optics; periodically poled crystals; optical parameter amplification; optical parameter oscillation; tuning

**OCIS codes** 140.3600; 190.4410; 190.4970; 190.4975

## 1 引言

准相位匹配非线性材料因其具有较大的有效非线性系数,在连续脉冲激光的频率变换等方面,如参量过程和倍频,有着重要的应用。周期性极化铌酸锂(PPLN)在近红外和中红外光参量变换过程中获得了广泛的使用<sup>[1-9]</sup>,但在可见光抽运下由于吸收易引起光折变,因此应用受到一定的限制。而周期极化钽酸锂(PPLT)的透光波在 280 nm 到中红外区间,具有较高的有效非线性系数,尤其是特殊工艺提高了 MgO:sPPLT 的损伤阈值,因而它成为近红外和中红外光参量变换及倍频方面重要的非线性晶体材料<sup>[10-16]</sup>。

本文深入分析准相位匹配动量守恒条件与能量守恒条件的紧密结合关系,根据晶体的折射率随波长、温

**收稿日期:** 2016-01-13; **收到修改稿日期:** 2016-02-21; **网络出版日期:** 2015-05-31

**基金项目:** 广东省高等学校优秀青年教师培养计划(Yq2013208)、广东省高等学校优秀青年创新人才培养计划育苗工程(自然科学)(2013LYM\_0101)、广东省教育厅第八批“千百十工程”培养对象

**作者简介:** 薛俊文(1978—),男,博士,副教授,主要从事新型激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: xuejunwen001@126.com

度变化的色散方程以及极化周期随温度的热膨胀关系,调整或忽略动量守恒条件中的极化周期项,同时更换晶体的色散方程,给出参量过程中调谐特性的详细算法,分别得到了 532 nm 和 1064 nm 为抽运光的光参量过程中近红外波段和中红外波段的温度调谐特性。

## 2 光参量过程守恒条件

对于准相位匹配阶数为 1 的光参量过程,动量守恒与能量守恒条件为<sup>[17]</sup>

$$\frac{n(\lambda_{\text{pump}}, T)}{\lambda_{\text{pump}}} - \frac{n(\lambda_{\text{signal}}, T)}{\lambda_{\text{signal}}} - \frac{n(\lambda_{\text{idler}}, T)}{\lambda_{\text{idler}}} - \frac{1}{\Lambda(T)} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_{\text{pump}}} = \frac{1}{\lambda_{\text{signal}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{idler}}}, \quad (2)$$

式中  $\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{signal}}, \lambda_{\text{idler}}$  分别为抽运光、信号光、闲置光的波长;  $T$  为温度;  $n(\lambda_{\text{pump}}, T), n(\lambda_{\text{signal}}, T), n(\lambda_{\text{idler}}, T)$  分别为与抽运光、信号光、闲置光有关的折射率;  $\Lambda(T)$  为考虑到了热膨胀影响的极化周期。

从(1)式和(2)式可以看出,分析光参量过程的守恒条件可转化为分析与晶体的波长和温度相关的色散方程及与温度相关的极化周期。

## 3 周期极化晶体参数

由于 MgO:sPPLT 性能在众多的周期极化晶体中表现优异,这里以其为研究对象进行分析。准相位匹配一般是 e 光参与作用,该晶体的色散方程为<sup>[16]</sup>

$$n^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + \frac{G}{\lambda^2 - H^2} + D\lambda^2, \quad (3)$$

参数具体含义详见文献[14,16]。(3)式适用的波长范围为 0.39~4.1  $\mu\text{m}$ ,温度范围为 30~200  $^{\circ}\text{C}$ 。由于在整个温度范围内,折射率的变化在同一幅图中区别不明显,因此只绘出温度为 30  $^{\circ}\text{C}$  的曲线,如图 1 所示,可以看出折射率在短波段比在长波段变化显著。

考虑到晶体的热膨胀,极化周期为温度  $T$  的函数<sup>[16]</sup>:

$$\Lambda(T) = \Lambda(25^{\circ}\text{C})[1 + \alpha(T - 25^{\circ}\text{C}) + \beta(T - 25^{\circ}\text{C})^2], \quad (4)$$

式中  $\Lambda(25^{\circ}\text{C})$  为 25  $^{\circ}\text{C}$  时的极化周期,  $\alpha$  为  $1.6 \times 10^{-5}$ ,  $\beta$  为  $7 \times 10^{-9}$ 。

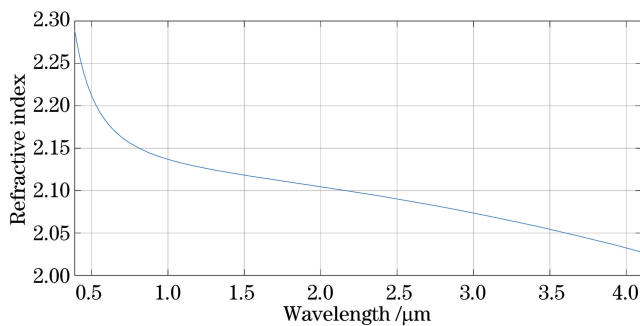


图 1 MgO:sPPLT 折射率与波长的关系曲线

Fig. 1 Relationship between refractive index and wavelength of MgO:sPPLT

## 4 温度调谐特性

要分析光参量过程中周期极化晶体的温度调谐特性,动量守恒条件即(1)式是核心,该式是自变量为波长和温度的关系函数。首先固定抽运光波长  $\lambda_{\text{pump}}$ ,给定温度  $T$  时,抽运光的折射率  $n(\lambda_{\text{pump}}, T)$  是确定的,(1)式第一项由此确定。然后给定 25  $^{\circ}\text{C}$  时的极化周期  $\Lambda(25^{\circ}\text{C})$ ,当给定温度  $T$  时,考虑到热膨胀的极化周期  $\Lambda(T)$  由(4)式确定,此时(1)式的第四项由此确定。剩下两个未知数,即信号光和闲置光的波长  $\lambda_{\text{signal}}$  和  $\lambda_{\text{idler}}$ 。如果给定信号光波长  $\lambda_{\text{signal}}$ ,则(1)式的第二项由此确定。在这个思路下(1)式就变为闲置光波长  $\lambda_{\text{idler}}$

的一元方程,通过求解此时的方程可得到闲置光波长。看似合理,但实际求解时几乎无解。原因是忽略了光参量过程的能量守恒条件即(2)式,而更深层的物理含义在下面的分析中给出。正确的思路应是:首先固定抽运光波长和极化周期,同时给定温度,(1)式的第一、四项由此确定。然后将(2)式代入(1)式,将(1)式化为信号光波长或闲置光波长的一元方程,求解该一元方程得出其中一个波长,再利用(2)式求解出另外一个波长。当温度改变时,就会求解出一系列的信号光和闲置光波长,温度调谐特性随之确定。实际求解时,如果该一元方程无解,则无信号光和闲置光产生。如果方程有一个解,则此时光参量过程为简并输出状态。如果有两个解,刚好这两个解对应着信号光和闲置光波长,如果称一个是信号光,则另外一个就是闲置光,不需要再利用(2)式。对能量守恒条件的利用是周期极化晶体的调谐特性分析与倍频特性分析的显著区别<sup>[14]</sup>。

下面分别使用 532 nm 和 1064 nm 激光抽运,来具体分析周期极化晶体 MgO:sPPLT 的温度调谐特性。

将抽运光波长为 532 nm、温度为 25 °C 时的极化周期 7.97  $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup> 及相关文献[14,16]数据代入(1)~(4)式,整理后得到关于波长的动量守恒一元方程,以温度  $T$  为参数,利用 Matlab 软件绘制该方程对应的一元函数曲线,如图 2 所示。图中蓝色虚线(对应温度 40 °C)与  $x$  轴没有交点,表明无信号光和闲置光产生。图中红色实线(对应温度 58.5 °C)与  $x$  轴相切,对应波长为 1.064  $\mu\text{m}$ ,表明此时光参量过程简并输出。图中绿色点画线(对应温度 100 °C)与  $x$  轴有两个交点,对应波长分别为 0.9529  $\mu\text{m}$  和 1.2044  $\mu\text{m}$ ,即此时光参量输出信号光和闲置光。

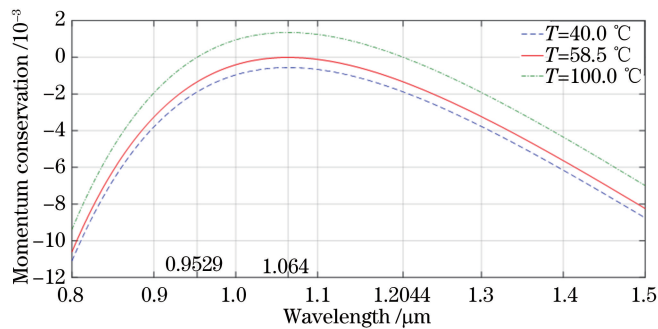


图 2 动量守恒与波长的关系曲线(532 nm 抽运)

Fig. 2 Momentum conservation as a function of wavelength (532 nm pumping)

通过扫描更多的温度点,求解波长的动量守恒一元方程,得到更多的信号光和闲置光,绘制出的调谐特性如图 3 所示,当温度在 58.5~200 °C 之间改变时,可以获得波长在 0.867 ~ 1.376  $\mu\text{m}$  之间的调谐,与文献[10]完全一致。

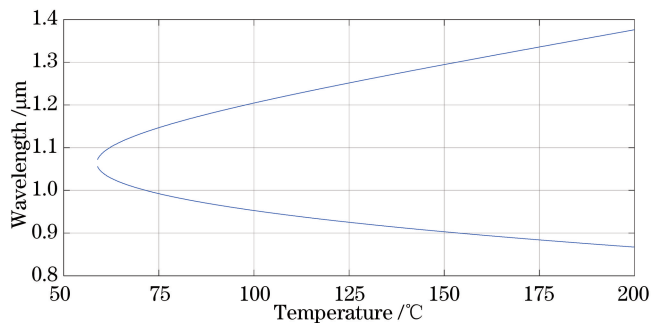


图 3 MgO:sPPLT 的温度调谐特性(532 nm 抽运)

Fig. 3 Temperature tunable characteristics of MgO:sPPLT (532 nm pumping)

从图 3 中可以清楚看出,仅使用(1)式,即在给定温度下通过设定信号光波长,来求解闲置光波长是不合理的,因为在给定的温度下设定的波长虽然在调谐范围内,但不满足该温度下的能量守恒条件,或者说设定的波长与给定的温度相矛盾,这就是上面所说的无解的物理原因。

接下来研究抽运光波长为 1064 nm 时 MgO:sPPLT 晶体的温度调谐特性。如果在上面的基础上,仅改变抽运波长,是得不到类似图 2 和图 3 结果的,原因是准相位匹配调节量极化周期需要调整以满足(1)式。

从色散方程(3)式和图1可以看出,长波长的折射率变小,因此要增大极化周期以使动量守恒得到满足,选取25℃时极化周期为27.1、29.0、31.7  $\mu\text{m}$ (<http://www.hcphotonics.com>),调谐曲线如图4所示。红色实线、绿色虚线、蓝色点画线分别对应上面三个极化周期。可以看出,使用1064 nm作为抽运光时,对于上面的三个极化周期,光参量过程不存在简并情况。如果约定短波长为信号光,长波长为闲置光,那么极化周期较小时,所得到的信号光波长较短,而闲置光波长较长,并且信号光和闲置光的调谐特性变得较为平坦,同时闲置光可以获得中红外波长,器件在较小极化周期下,输出中红外波长随温度变化不显著,这种特性在某些温度要求变化范围大,而波长要求变化小的场合有着重要的应用。

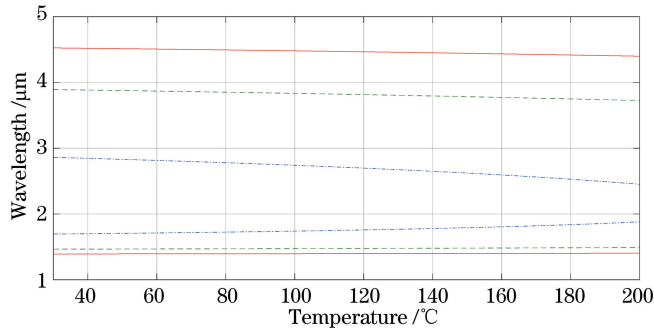


图4 MgO:sPPLT的温度调谐特性(1064 nm抽运,极化周期红色实线:27.1  $\mu\text{m}$ ,绿色虚线:29.0  $\mu\text{m}$ ,蓝色点画线:31.7  $\mu\text{m}$ )  
Fig. 4 Temperature tunable characteristics of MgO:sPPLT (1064 nm pumping, poled period for red solid line: 27.1  $\mu\text{m}$ , green dashed line: 29.0  $\mu\text{m}$ , blue dotted dashed line: 31.7  $\mu\text{m}$ )

1064 nm激光抽运情况下,改变极化周期所得到的调谐波长如图5所示。随着极化周期的增加,所获得的信号光波长增加,而闲置光波长减小,当极化周期增加到32.63  $\mu\text{m}$ 时,输出变为简并,再增加极化周期,无输出。而最小极化周期的确定受制于折射率的动量守恒条件调节能力和晶体的透光波段。

类似地,如果忽略动量守恒条件(1)式中的极化周期项,同时更换晶体的色散方程,光参量过程调谐特性的研究就推广到相位匹配情况,因此对于极化周期准相位匹配的研究更具有有一般性。

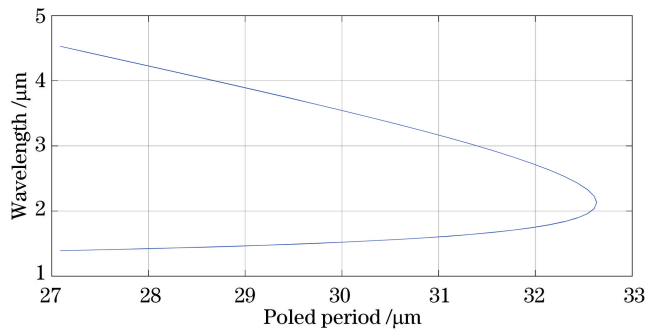


图5 调谐波长与极化周期的关系

Fig. 5 Relationship between tunable wavelength and poled period

## 5 结 论

通过深入分析频率变换过程中动量守恒条件和能量守恒条件,以周期极化准相位匹配晶体MgO:sPPLT为例,分析了532 nm和1064 nm为抽运光的光参量过程近红外波段及中红外波段的温度调谐特性。调整或忽略准相位匹配动量守恒条件中的极化周期项,同时更换晶体的色散方程,该研究方法可方便地推广到其他准相位匹配或相位匹配非线性晶体参量变换调谐特性研究当中,对于参量放大及振荡器设计有一定指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Sheng Q, Ding X, Shi C P, *et al.*. Continuous-wave mid-infrared intra-cavity singly resonant PPLN-OPO under 880 nm

- in-band pumping[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 8041-8045.
- 2 Kumar S C, Wei J X, Debray J, *et al.*. High-power, widely tunable, room-temperature picosecond optical parametric oscillator based on cylindrical 5% MgO:PPLN[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3897-3900.
- 3 Kemlin V, Jegouso D, Debray J, *et al.*. Dual-wavelength source from 5% MgO:PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28886-28891.
- 4 Guo J, He G, Zhang B, *et al.*. Compact efficient 2.1  $\mu\text{m}$  intracavity MgO:PPLN OPO with a VBG output coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(6): 573-576.
- 5 Jiao Z, Guo J, He G, *et al.*. Narrowband intracavity MgO:PPLN optical parametric oscillator near degeneracy with a volume Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 230-233.
- 6 Xu L, Feehan J, Shen L, *et al.*. Yb-fiber amplifier pumped idler-resonant PPLN optical parametric oscillator producing 90 femtosecond pulses with high beam quality[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(4): 987-993.
- 7 Lin Hongyi, Xu Yingchao, Meng Xianguo, *et al.*. Stability analysis of single-resonant optical parametric oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011402.  
林洪沂, 许英朝, 孟宪国, 等. 单谐振光参变振荡器稳定性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011402.
- 8 Lin Hongyi, Huang Xiaohua, Xu Yingchao, *et al.*. Mid-infrared tunable pulsed optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021402.  
林洪沂, 黄晓桦, 许英朝, 等. PPMgLN 中红外宽调谐脉冲光参变振荡器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021402.
- 9 Hao Liyun, Su Cen, Qi Yunfeng, *et al.*. Second harmonic generation characteristics of continuous wave all-fiber laser oscillator in PPMgO:LN[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602007.  
郝丽云, 苏 岑, 漆云凤, 等. 基于 PPMgO:LN 晶体的连续波全光纤激光器倍频特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602007.
- 10 Samanta G K, Fayaz G R, Sun Z, *et al.*. High-power, continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 400-402.
- 11 Fu Jie, Shen Zhaoguo, Tang Gangfeng, *et al.*. High repetition rate PPLT eye-safe laser with 1.06  $\mu\text{m}$  pumping[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 156-160.  
付 洁, 沈兆国, 唐刚锋, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  泵浦 PPLT 高重复频率人眼安全激光器[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 156-160.
- 12 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, *et al.*. Research on optical parametric oscillator based on periodically poled LiTaO<sub>3</sub> crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0614001.  
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 基于周期极化钽酸锂晶体的光参变振荡器技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0614001.
- 13 Kumar S C, Samanta G K, Kavita D, *et al.*. High-efficiency, multicrystal, single-pass, continuous-wave second harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11152-11169.
- 14 Xue Junwen, Deng Kaiyong, Fang Yujie, *et al.*. Analysis of frequency doubling characteristics of periodically poled crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071901.  
薛峻文, 邓培镛, 方宇杰, 等. 周期极化晶体倍频特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071901.
- 15 Du Jianxin, Lou Qihong, Xue Dong, *et al.*. Second harmonic generation in PPLT using a broad-band seeded ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 5-8.  
杜建新, 楼祺洪, 薛 冬, 等. PPLT 倍频宽线宽掺镱双包层光纤放大激光[J]. *光子学报*, 2006, 35(1): 5-8.
- 16 Bruner A, Eger D, Moshe B O, *et al.*. Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(3): 194-196.
- 17 Fejer M M, Magel G A, Jundt D H, *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: Tuning and tolerances [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(11): 2631-2654.