

光参量振荡器中的晶体温度引起的光束质量劣化

蔡小天, 李霄*, 赵国民

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 利用 COMSOL 软件建模对光参量振荡器(OPO)进行热分析,发现在大功率抽运下,晶体的中心轴线附近由于吸收参量光,出现较为明显的温度上升。MgO:PPLN 晶体的折射率对温度非常敏感,较小的温升会使参量光产生不可忽略的波前畸变,进而导致光束质量下降。晶体的温升是由参量光的吸收引起的,这样的温升不可避免,大功率 OPO/OPA(光参量放大器)的光束质量劣化是必然的。

关键词 非线性光学; 光参量振荡器; 热分析; 波前畸变; 光束质量劣化

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1219001

Beam Quality Deterioration Caused by Crystal Temperature in Optical Parametric Oscillator

Cai Xiaotian, Li Xiao, Zhao Guomin

*College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract By modeling with COMSOL software, we carry out the thermal analysis of optical parametric oscillator (OPO). We find that under high pump power, temperature near the central axis of crystal increases due to the absorption of parametric light. Because the refractive index of MgO:PPLN crystal is very sensitive to temperature, a small temperature rise will cause the non-negligible wavefront distortion of parametric light, which leads to the decrease of beam quality. The temperature rise of crystal is caused by the absorption of parametric light, and such temperature rise is unavoidable. The deterioration of beam quality in high power OPO/OPA (optical parametric amplifier) is inevitable.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; thermal analysis; wavefront distortion; beam quality deterioration

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 140.6810

1 引 言

3~5 μm 波段的中红外激光在大气环境监测、医学诊断和治疗、激光光谱学研究、自由空间光通信等领域有着很大的应用需求^[1-5]。光参量振荡器(OPO)可用于产生中红外激光,近年来被广泛研究,中红外激光的输出功率也不断提高。2013年, Hemming 等^[6]采用 Ho:YAG 脉冲激光抽运磷锗锌(ZnGeP₂, ZGP)晶体的光学参量振荡技术,实现了平均功率为 30.2 W 的中红外激光输出。2014年, Yao 等^[7]通过 Ho:YAG 脉冲激光抽运 ZGP 的光学参量振荡实验,获得了 41.2 W 的高功率中红外激光输出。2016年, Peng 等^[8]在 310 W 的大功率抽运下,基于 MgO:PPLN 晶体并利用主控振荡器的功率放大器(MOPA)结构对 2.68 μm 的闲频光进行放大,得到了最高 74.6 W 的功率输出。同年,该课题组通过优化光斑形状,在 343 W 的大功

收稿日期: 2017-05-24; **收到修改稿日期:** 2017-07-28

作者简介: 蔡小天(1994—),男,硕士研究生,主要从事中红外固体激光器方面的研究。

E-mail: caixiaotian1234@163.com

导师简介: 赵国民(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光破坏机理方面的研究。

E-mail: gmzhao@nudt.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: crazy.li@163.com

率抽运下利用 MOPA 结构放大 1678.2 nm 的信号光,得到了最高 110.8 W 的功率输出^[9];但在最高输出功率下,光束质量出现了明显的劣化,光束质量因子 $M^2 \approx 4$,这极大地限制了 MgO:PPLN 晶体在输出高功率中红外激光方面的发展。

光参量过程不存在量子亏损,且 MgO:PPLN 晶体对抽运光、信号光、闲频光的吸收非常弱,热效应一直被人们所忽略,但是光参量过程对光的折射率异常敏感,在大功率 OPO 中,晶体会由于吸收光能而产生较为明显的热量,这会使得光参量过程发生变化^[10],在这方面科学家们也进行了相关研究。1997 年, Zelmon 等^[11]计算了 21 °C 下中红外波段 MgO:PPLN 掺杂浓度(物质的量分数)为 5% 的 Sellmeier 方程,指出 MgO:PPLN 具有较强的色散。2007 年,Paul 等^[12]在 Sellmeier 方程中引入温度,光在晶体中的折射率不仅与波长有关,而且与温度有关,这也揭示了 MgO:PPLN 的温度调谐能力。2008 年,Gayer 等^[13]对 Sellmeier 方程进行了修正,使其在低温时的结果与实验结果较好地吻合。本文利用 COMSOL 软件仿真了大功率光纤抽运连续 OPO 中 MgO:PPLN 晶体的热积累,结合 Sellmeier 方程计算热导致的闲频光波前畸变,并根据菲涅耳衍射理论分析其光束质量的劣化。研究结果表明大功率连续 OPO 较高的输出功率和较好的光束质量不可兼得。

2 晶体的热分析

通过建立连续 OPO 理论工作模型,并利用 COMSOL 软件对晶体进行热分析。假定光参量过程中抽运光、信号光、闲频光都为基模,则可将晶体中的热源近似表示为^[14]

$$Q_j(x, y, z) = \frac{2\alpha_j P_j(z)}{\pi\omega_j(z)^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_j(z)^2}\right] \exp(-\alpha_j z), \quad (1)$$

式中 $Q_j(x, y, z)$ 、 α_j 、 $P_j(z)$ 和 $\omega_j(z)$ ($j = p, s, i$) 分别为抽运光、信号光和闲频光的热源分布、吸收系数、轴向功率分布和光斑半径。抽运光和信号光的吸收系数为 $3.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$, 闲频光的吸收系数为 0.034 cm^{-1} ^[10]。根据参量光转换的特点,可将抽运光功率分布 $P_p(z)$ 近似表示为二次函数^[15],即

$$P_p(z) = -[P_p(0) - P_{\text{pout}}] \frac{z^2}{L^2} + P_p(0), \quad (2)$$

式中 $P_p(0)$ 为初始抽运功率, P_{pout} 为输出的抽运光功率, L 为晶体长度。 $P_p(0)$ 和 P_{pout} 均可在实验中测得。信号光和闲频光的轴向功率分布分别为

$$P_s(z) = P_{\text{sout}} \frac{1-\eta}{\eta} + [P_p(0) - P_p(z)] \frac{\lambda_i}{\lambda_s + \lambda_i}, \quad (3)$$

$$P_i(z) = [P_p(0) - P_p(z)] \frac{\lambda_s}{\lambda_s + \lambda_i}, \quad (4)$$

式中 $\eta = 0.05$ 为耦合输出镜的输出率, P_{sout} 为输出的信号光功率。 $P_{\text{sout}}(1-\eta)/\eta$ 表示由耦合输出镜反射回腔内的信号光功率, $[P_p(0) - P_p(z)]\lambda_i/(\lambda_s + \lambda_i)$ 表示抽运光给信号光提供增益导致的功率增量,两者相加即为晶体轴向的信号光功率。闲频光则相对简单,只含抽运光给信号光提供增益导致的功率增量。

根据实验条件,抽运光经透镜聚焦到晶体中心,这样可将 3 个光波的束腰位置设置在晶体中心。计算得到抽运光和信号光的束腰半径分别为 $\omega_{p0} \approx 100 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\omega_{s0} \approx 70 \text{ }\mu\text{m}$, 闲频光的束腰半径 ω_{i0} 满足^[16]

$$\frac{1}{\omega_{i0}^2} = \frac{1}{\omega_{s0}^2} + \frac{1}{\omega_{p0}^2}. \quad (5)$$

模型中光波长和折射率的微小改变对热源分布的影响很小,为了简单起见,假定光波长和折射率均为定值。根据实验数据,抽运光波长 $\lambda_p = 1060 \text{ nm}$, 信号光波长 $\lambda_s = 1600 \text{ nm}$, 闲频光波长 $\lambda_i = 3148 \text{ nm}$, 三者满足波长转换关系。抽运光在晶体中的折射率 $n_p = 2.147$, 信号光在晶体中的折射率 $n_s = 2.128$, 闲频光在晶体中的折射率 $n_i = 2.083$ 。

模型中晶体底面和铜接触,其余面与空气接触,环境温度设定为 20 °C,抽运功率为 100 W 时,可以得到晶体三维温度分布图,如图 1(a)所示。晶体中心轴线区域吸收光能后温度上升,晶体后部的闲频光功率增大,导致出现较大的温升,且随着抽运功率的提高,温升逐渐增加,在抽运功率为 100 W 时,晶体中心前后端

温差约为 3.8 °C,如图 1(b)中所示,显然 OPO 中晶体的温度分布与传统激光器前高后低的温度分布不同。

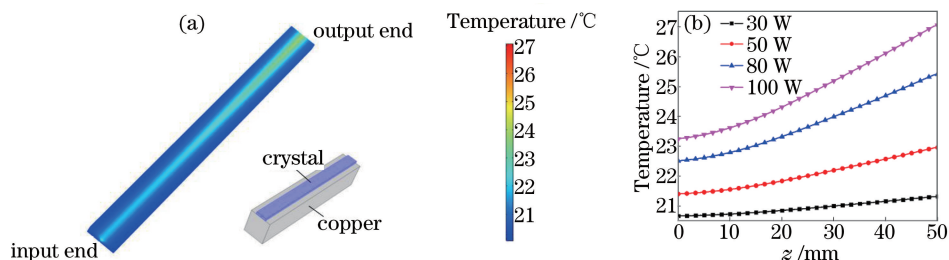


图 1 (a)抽运功率为 100 W 时晶体三维温度分布图;

(b)抽运功率分别为 30, 50, 80, 100 W 时晶体中心轴线上温度分布曲线

Fig. 1 (a) Crystal three-dimensional temperature distribution with pump power of 100 W;

(b) temperature distribution curves along crystal central axis with pump power of 30, 50, 80, 100 W

3 热导致的波前畸变

MgO:PPLN 晶体中积累的热会使得晶体的折射率发生变化,当基模高斯光束通过晶体时,会在等相位面上产生附加相位,进而产生波前畸变,导致光束质量劣化。在模型中令闲频光的波长为 3.14 μm ,利用 Sellmeier 方程计算出该温度分布下闲频光在晶体中的折射率分布,并将结果导入到 Matlab 中进行线性插值处理,得到如图 2 所示的光程差(OPD)。

由图 2(b)可以看出,OPD 图像并不是呈中心对称的图形,这是由晶体横截面温度分布不均匀导致的。晶体底面与铜接触,使得温度较低,折射率较小;晶体上半部分暴露在空气中,使得温度较高,折射率较大;晶体中心区域的温度最高。此外,由图可知,最大的 OPD 约为 4 μm ,与闲频光波长在同一量级,此时 OPD 会引起较为明显的波前畸变。

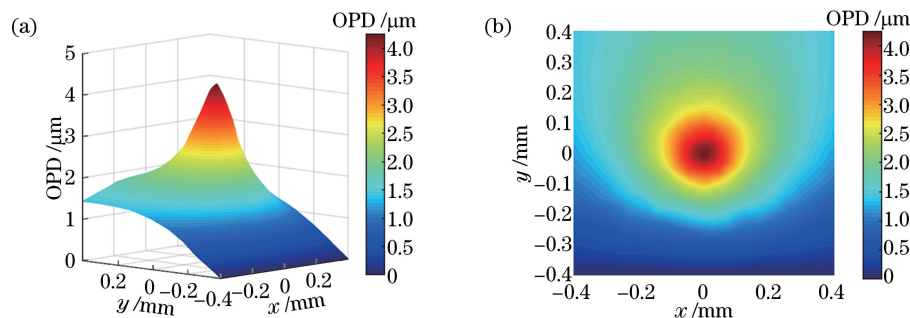


图 2 (a) OPD 三维图像;(b) OPD 二维图像

Fig. 2 (a) Three-dimensional image of OPD; (b) two-dimensional image of OPD

将 OPD 换算为附加相位,并将其叠加到基模高斯光束中,利用菲涅耳衍射理论观察其在近场和远场的分布,如图 3 所示。图 3(a)为基模高斯光束的近场菲涅耳衍射光斑,图 3(b)为基模高斯光束叠加了附加相位后的近场菲涅耳衍射光斑,图 3(c)中红色实线和蓝色实线分别为图 3(a)、(b)的中心截线。从图 2 中可以看出,该相位差产生的效果与凸透镜的作用类似,对光有会聚作用,所以叠加了附加相位后近场的衍射光斑会比基模高斯光束的要小,如图 3(b)、(c)所示。同时可以看出,随着抽运功率的提高,光斑逐渐缩小,峰值逐渐增加,其中在抽运功率为 100 W 时峰值功率密度相对 80 W 时有所降低的原因是附加相位的不规则性加强导致更严重的像散,同时模型的取样精度也会对其产生影响。

波前畸变导致光束质量劣化,使其在远场的衍射光斑会比高斯光束的衍射光斑大,而且光斑形状会出现畸变。图 4(a)、(b)分别为基模高斯光束和产生波前畸变后高斯光束的夫琅禾费衍射图样,图 4(c)中红色实线和蓝色实线分别为图 4(a)、(b)的中心截线。

随着抽运功率的提高,叠加附加相位后的衍射光斑逐渐变大,意味着光束质量逐渐下降。使用 M^2 因子对光束质量进行评估,当抽运功率为 100 W 时,光束质量因子 $M^2 \approx 4$,而且由于附加相位的中心不对称性,光斑形状也发生了明显的畸变。这说明在大功率抽运下,晶体中心轴线区域的温升导致较严重的光束质量

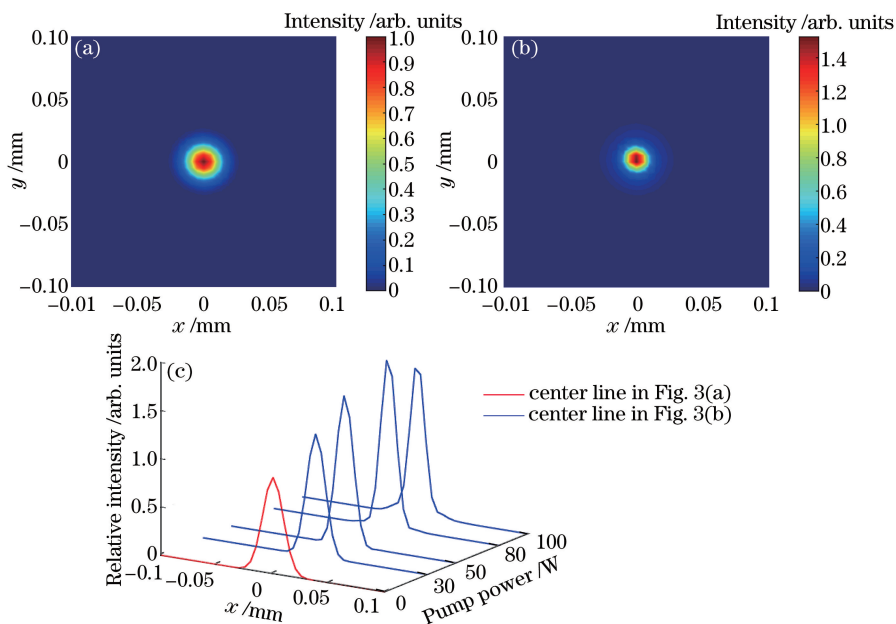


图 3 (a)基模高斯光束的近场菲涅耳衍射光斑;(b)叠加了附加相位后的近场菲涅耳衍射光斑;(c)中心截线

Fig. 3 (a) Near field Fresnel diffraction spot of fundamental Gaussian beam;
(b) near field Fresnel diffraction spot with additional phase; (c) center lines

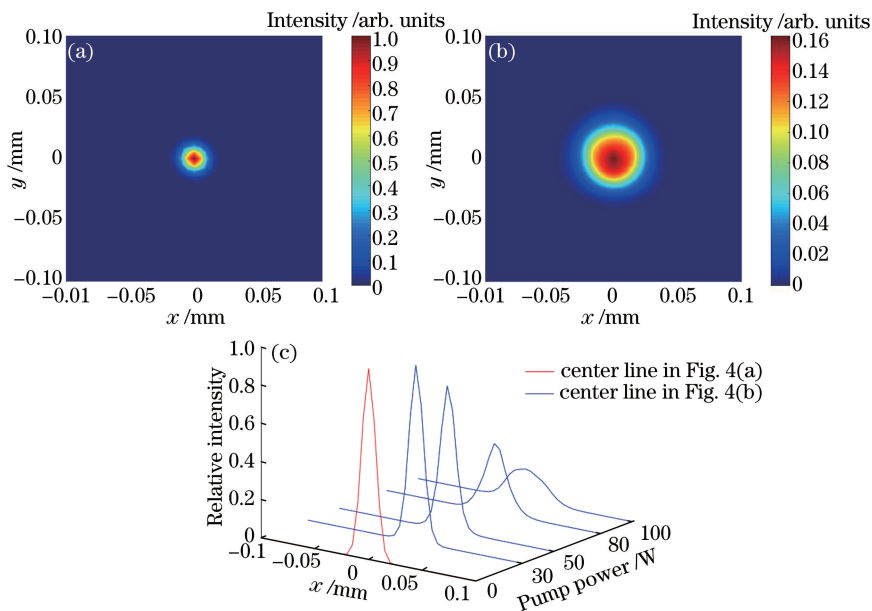


图 4 (a)基模高斯光束的夫琅禾费衍射光斑;(b)叠加了附加相位后的夫琅禾费衍射光斑;(c)中心截线

Fig. 4 (a) Fraunhofer diffraction spot of fundamental Gaussian beam;
(b) Fraunhofer diffraction spot with additional phase; (c) center lines

劣化。晶体中心轴线上的功率密度非常高,这使得中心轴线附近出现温升,且温升是由晶体对参量光的吸收导致的,这样的温升是不可避免的。MgO:PPLN 本身具有色散特性,较小的温升就会使参量光发生不可忽略的波前畸变,导致出现较为明显的光束质量劣化。该仿真结果和魏星斌^[9]等的实验结果相符。因此,可认为基于 MgO:PPLN 晶体的大功率 OPO/OPA 的光束质量劣化是不可避免的,通过在光路中加入相位补偿器件对光束质量进行优化是比较好的解决方案。

4 结 论

为了解光参量振荡技术中晶体热效应对光束质量的影响,通过数值仿真建立了 OPO 的热分析模型,同

时结合光波的衍射理论对光束的近场和远场光斑进行了分析,结论显示大功率 OPO 中晶体吸收光能产生的热能够导致较为严重的光束质量劣化,通过在光路中加入相位补偿器件来对波前进行矫正,可以对光束质量进行优化,为进一步开展高光束质量高输出功率的 OPO/OPA 实验提供了思路。

参 考 文 献

- [1] Godard A. Infrared (2-12 μm) solid-state laser sources: A review[J]. Comptes Rendus Physique, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [2] Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. Mid-infrared coherent sources and applications [M]. Berlin: Springer, 2008: 535-555.
- [3] Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(1): 1-6.
任国光, 黄裕年. 用激光红外干扰系统保护军用和民航机[J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 1-6.
- [4] Geiser P, Willer U, Schade W. Picosecond mid-infrared LIDAR system [C]. 2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2005, JThI2: 1986-1987.
- [5] Shang Yaping, Li Xiao, Wang Peng, *et al.* Polarized combination of mid-infrared optical parametric oscillator at 10 W levels[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1019001.
尚亚萍, 李霄, 王鹏, 等. 10 W 级中红外光学参量振荡器偏振合成技术[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1019001.
- [6] Hemming A, Richards J, Davidson A, *et al.* 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10062-10069.
- [7] Yao B Q, Shen Y J, Duan X M, *et al.* A 41-W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Ho : YAG laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6589-6592.
- [8] Peng Y F, Wei X B, Luo X W, *et al.* High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 49-51.
- [9] Wei X, Peng Y, Peng J, *et al.* 110 W 1678 nm laser based on high-efficiency optical parametric interactions pumped by high-power slab laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1608-1611.
- [10] Vainio M, Peltola J, Persijn S, *et al.* Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators [J]. Applied Physics B, 2009, 94(3): 411-427.
- [11] Zelmon D E, Small D L, Jundt D. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide - doped lithium niobate[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(12): 3319-3322.
- [12] Paul O, Quosig A, Bauer T, *et al.* Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% MgO doped congruent LiNbO₃ [J]. Applied Physics B, 2007, 86(1): 111-115.
- [13] Gayer O, Sacks Z, Galun E, *et al.* Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ [J]. Applied Physics B, 2008, 91(2): 343-348.
- [14] Wen Jiaojuan. Theoretical analysis on the thermal effects of laser medium[D]. Shanghai: Donghua University, 2008.
温姣娟. 激光介质热效应的理论分析[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [15] Liu Lei. Research of fiber laser pumped continuous-wave optical parametric oscillator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
刘磊. 光纤激光泵浦的连续波光参量振荡器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [16] Brosnan S, Byer R. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, 15(6): 415-431.