

连续波光参量振荡器最优转换效率的实验研究

姜洪波 沈利沣 赵志刚 刘斌 项震 刘东 刘崇

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 对连续波光参量振荡器(OPO)的最优转换效率进行了实验研究。选用氧化镁掺杂的周期性极化铌酸锂晶体作为光参量振荡器的非线性晶体,通过匹配抽运光功率和输出镜反射率控制腔内的信号光光强,实验验证了OPO腔内存在最优信号光光强,能够使光参量振荡器的转换效率最优化。在此基础上,在 $2.9\ \mu\text{m}$ 波段实现了8 W的闲频光输出,输出效率达到19.5%。在无外加线宽限制器件的情况下,输出线宽小于0.68 nm。

关键词 激光器; 光参量振荡器; 转换效率; 模式耦合

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1001011

Optimal Conversion Efficiency of Continuous-Wave Optical Parametric Oscillator

Jiang Hongbo Shen Lifeng Zhao Zhigang Liu Bin Xiang Zhen Liu dong Liu Chong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Optimal conversion efficiency of a continuous-wave optical parametric oscillator (OPO) is investigated experimentally. The nonlinear crystal of OPO is a magnesia-doped periodic polarization lithium niobate crystal. As the power density inside the OPO cavity is associated with the reflectivity of the cavity mirrors, different cavity mirrors are used. Experimental results show that the best intensity inside the cavity exists to obtain the best conversion efficiency. By the coupling of the pump power and the OPO cavity, 8 W idler output at $2.9\ \mu\text{m}$ with the efficiency of 19.5% is achieved. The spectral width of the $2.9\ \mu\text{m}$ laser is less than 0.68 nm without any additional bandwidth control elements.

Key words lasers; optical parametric oscillator; conversion efficiency; mode coupling

OCIS codes 140.3460; 190.4970; 140.3325

1 引言

$3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段中红外连续相干光源在大气科学、医疗、光谱分析及军事等领域都有重要的应用价值和前景^[1-4],成为近年来的研究热点之一。光参量振荡器(OPO)是获得中红外输出的重要手段,研究人员已经对光参量振荡器进行了大量的理论研究。在OPO技术中,对非线性转换效率进行研究是一项重要的工作。刘红军等^[5]用Boyd等^[6]的方法分析了脉冲光参量放大器(OPA)中信号光强、抽运光耗尽、增益饱和、和频过程等因素对参量转换效率的影响。刘建辉等^[7]从理论上分析了晶体长度、抽运光斑截面类型、谐振腔参数等因素对光参量振荡器转换效率的影响,提出通过控制参量光的功率密度来控制逆转换效应以提高转换效率的方法。Zhang等^[8]数值模拟了纳秒级脉冲光参量振荡器,通过改变闲频光吸收系数控制腔内信号光光强,得出适当的闲频光吸收有助于提高参量光转换效率的结论,其本质也是通过改变腔内参量光功率密

收稿日期: 2016-05-20; **收到修改稿日期:** 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(61575172)、浙江省自然科学基金(LZ15F050001)、中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室开放基金(2014HEL04)、中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 姜洪波(1991—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: 21430064@zju.edu.cn

导师简介: 刘崇(1978—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事固体激光及非线性光学技术方面的研究。

E-mail: chongliu78@hotmail.com(通信联系人)

度控制逆转换效应。

外腔连续波 OPO 是获得连续中红外输出的重要手段,与脉冲 OPO 相比,其阈值高,更难发生参量振荡过程,并且热效应严重,非线性三波混频过程中的逆转换效应是影响其转换效率的主要因素。就输出功率而言,2005 年,Chen 等^[9]用 1.07 μm 掺 Yb 光纤激光器作为抽运源,利用氧化镁掺杂的周期性极化铌酸锂 (PPLN)晶体和环形腔结构在室温下实现了波长为 2.94 μm 、功率为 10 W 的连续中红外激光输出。2009 年,Kumar 等^[10]同样利用掺 Yb 光纤抽运源和环形腔结构,在抽运光功率为 26.8 W 时,实现了波长为 3.067 μm 、功率为 8.3 W 的连续闲频光输出。赵家群^[11]使用环形腔结构获得了功率为 10.2 W、波长为 3.004 μm 的闲频光输出。现有理论表明最优抽运光功率与输出镜反射率相关^[12],大约为阈值功率的 2.5 倍时转换效率最高。由于非线性晶体的热效应^[13],当抽运光功率高于阈值功率的 2.5 倍时,转换效率仍能保持较高水平。2014 年,Zeil 等^[14]以可变反射率体布拉格光栅 (VBG) 为输出镜,采用环形腔结构实现了 30 W 的稳定参量光输出,总转化效率达到 75%,研究表明在高功率抽运(2.5 倍阈值以上)情况下输出镜反射率越低转化效率越高,抽运消耗率和转化效率越接近,并且在转化效率维持较高水平时,继续降低输出镜反射率仍有可能获得更大的输出功率和转换效率,但是对驻波腔内是否存在最优信号光光强使得 OPO 达到最优的转换效率,抽运和输出镜对谐振光反射率之间的关系没有进行深入研究。

本文对连续波 OPO 的最佳转换效率,以及腔内最佳信号光强、抽运和输出镜对谐振光反射率的匹配问题进行了相关研究,发现适当的腔内信号光光强能保证较高的 OPO 非线性转换效率,并在此最优信号光光强下实现了 2.9 μm 、8 W 的闲频光输出,闲频光转换效率大于 19%,输出线宽小于 0.68 nm。

2 基本原理

图 1 为外腔连续波 OPO 的基本原理示意图。初始抽运光 $I_p(0)$ 从 OPO 的左腔镜入射到 MgO:PPLN 晶体中并发生参量转换,抽运光光子转换为信号光和闲频光光子,稳态时腔内存在稳定振荡的信号光 $I_s(0)$ 、抽运光 I_p 和闲频光 I_i 。 ΔI_s 、 I_i 和 I_p 分别表示从右侧输出镜输出的信号光、闲频光及剩余的抽运光。随着初始抽运光功率的不断增大,在输出镜对信号光反射率不变的情况下,腔内信号光光强不断增大,超过一定值后过高的信号光和闲频光反而向抽运光转换,这一过程被称为逆转换效应,逆转换效应会降低 OPO 的非线性转换效率。

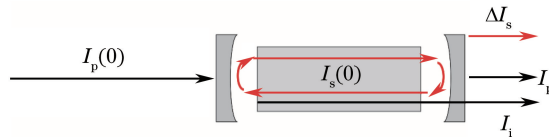


图 1 参量转换示意图

Fig. 1 Schematic of parametric conversion

为降低腔内过高的信号光光强,通常的做法是降低右侧输出镜对信号光的反射率,但反射率过低会影响正向转换的效率,因此应选择合适的抽运功率和输出镜反射率以达到 OPO 的最优输出转化率。腔内的功率在信号光、抽运光、闲频光之间不断转换,腔内信号光平均光强 $I_s(0)$ 、初始抽运光光强 $I_p(0)$ 以及输出镜对信号光的反射率 R 之间的关系为^[12]

$$I_s(0) = \frac{\omega_s}{\omega_p} \frac{\sin^2(\beta l)}{1 - R} I_p(0), \quad (1)$$

式中 $\beta = \sqrt{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_s(0) / \epsilon_0 c \lambda_p \lambda_i n_s n_i n_p}$, 下标 s, i, p 分别代表信号光、闲频光和抽运光, l 为晶体长度, c 为自由空间中的光速, ω 为光束的角频率, d_{eff} 为晶体的有效非线性系数, n 为晶体的折射率, λ 为波长, ϵ_0 为真空介电常数。

根据文献^[12],相位匹配条件下信号光单谐振参量振荡器(SRO)闲频光转换效率为

$$\eta_i = \frac{I_i}{I_p(0)} = \frac{\omega_i}{\omega_p} \sin^2(\beta l), \quad (2)$$

当晶体长度一定, $\beta = (n - 1/2)\pi/l$ ($n = 1, 2, \dots$) 时,闲频光转换效率最高。取 PPLN 晶体的有效非线性系数

$d_{\text{eff}} = 2d_{33}/\pi = 17.2 \text{ pm/V}^{[15]}$, 由 β 的表达式得到转换效率最高时腔内最优平均信号光光强 $I_s(0) = 335 \text{ kW/cm}^2$, 且 $I_s(0)$ 只由晶体特性决定, 晶体材料及长度等参数确定后最优腔内信号光强度也随之确定。结合(1)、(2)式可知转换效率与 $I_p(0)$ 和 R 的比值有关, 当闲频光输出效率为最大值时, 可以根据(1)式获得特定反射率下的抽运光光强, 减小 R 值使 OPO 可承受的抽运光光强增大, 从而获得更高功率的闲频光输出。本文首先在小功率抽运的条件下, 采用不同反射率的输出镜, 实验测量了获得最优转换效率时的腔内信号光强, 然后根据测量结果设计了高抽运光功率情况下的输出镜反射率, 得到了 $2.9 \mu\text{m}$ 波段、功率超过 8 W 的连续中红外输出。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 激光器为实验室自主研发的侧面抽运 Nd:YAG 连续固体激光器, 输出波长为 1064 nm , 输出功率超过 40 W , 光束质量因子 M^2 小于 1.4 。激光器输出光束通过隔离器, 由耦合透镜调整光斑大小后入射光参量振荡器。光参量振荡器谐振腔由两平凹镜组成。输入镜(M3)凹面曲率半径为 50 mm , 对 1064 nm 波长的光高透, 对 $1600 \sim 1800 \text{ nm}$ 信号光波段高反, 反射率大于 99.5% , 对 3000 nm 波长的光高反。输出镜(M4)凹面曲率半径为 50 mm , 对 1064 nm 和 $2600 \sim 3100 \text{ nm}$ 附近波段的光高透, 对 $1600 \sim 1800 \text{ nm}$ 波段的信号光具有高反射率。使用的 MgO:PPLN 晶体尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 极化周期为 $31.5 \mu\text{m}$, 晶体端面对抽运光、信号光、闲频光均镀有高透膜, 晶体置于 M3、M4 所组成的谐振腔中心。M5 为参量光和抽运光 45° 分光镜, 抽运光经 45° 反射后进入陷阱。M6 为信号光与闲频光 45° 分光镜, 信号光透过 M6 后进入功率计 1, 闲频光经 45° 反射后进入功率计 2。结合晶体温控炉的实际尺寸, 选择谐振腔腔长为 90 mm 的对称腔, 信号光在腔内对应的腔模束腰半径为 $113 \mu\text{m}$, 束腰位置在晶体中心。通过透镜耦合, 抽运光束腰位于晶体中心处, 半径为 $113 \mu\text{m}$ 。

实验中使用安捷伦 86146B 光谱仪测量抽运激光的谱线, 结果如图 3(a) 所示, 通过图中拟合曲线可得抽

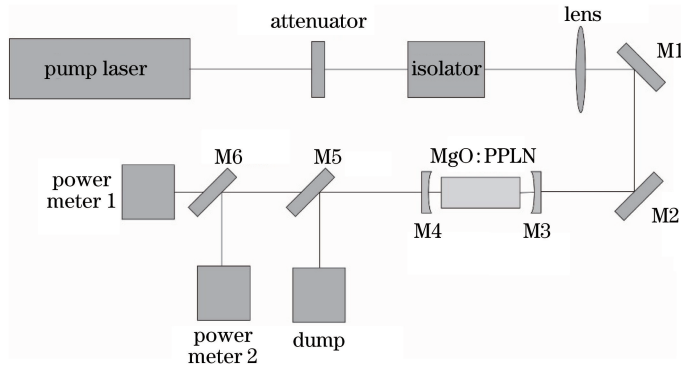


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

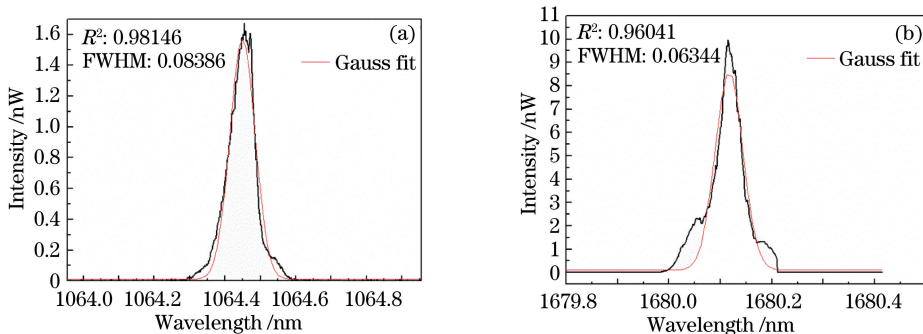


图 3 安捷伦 86146B 测量的(a)抽运光和(b)信号光谱线

Fig. 3 Spectra of (a) pump light and (b) signal light measured by Agilent 86146B

运激光谱线半峰全宽(FWHM)不超过 0.1 nm,已接近光谱仪分辨率的极限。实验中测量了信号光的谱线,如图 3(b)所示,受光谱仪测量波长范围所限,闲频光的谱线未能测量。实验中温控炉温度设为 45 °C,在 40 W抽运光功率下,由于存在热效应^[16],晶体中心的实际温度高于 45 °C。利用文献[16]中的线性吸收系数,对抽运光功率为40 W时的晶体温度分布进行了仿真,发现晶体中心和边缘的温差约为 14 °C。而在温度-波长调谐曲线中,波长在 1.7 μm 附近随温度的变化率约为 0.33 nm/°C,因而实际输出的中心波长与理论值(1675 nm)相比发生了 4.62 nm 的漂移,和实测信号光中心波长基本吻合。实际测得信号光输出谱线宽度约为 0.06 nm,由光参量振荡需满足的能量守恒和相位匹配条件^[17],可以得到闲频光线宽上限为

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda_s^2 \Delta\lambda_p + \lambda_p^2 \Delta\lambda_s}{(\lambda_s - \lambda_p)^2}, \quad (3)$$

根据(3)式计算得到闲频光的线宽小于 0.68 nm。

非线性介质产生参量转换过程中的自发辐射线宽一般较宽,根据 Baumgarther^[18]的结果,自发辐射线宽为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi cb} \left(\frac{2\pi}{l} + t\theta^2 \right), \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{c} \left(n_s - n_i + \lambda_i \frac{dn_i}{d\lambda_i} - \lambda_s \frac{dn_s}{d\lambda_s} \right), \quad (5)$$

$$t = \frac{\pi n_s n_p \lambda_i}{n_i \lambda_s \lambda_p}, \quad (6)$$

式中 $\theta = r/d$, r 为晶体后孔阑半径, d 为光阑到晶体的距离。由(4)式计算得到无谐振腔限制条件下自发辐射谱宽约为 13 nm ($\theta = 10$ mrad)。为限制过宽的自发辐射谱宽,选择较长的晶体($l = 50$ mm),同时由于稳定谐振腔的存在,只有满足相位匹配条件或相位失配量较小的傍轴光线才能参与谐振,所以实验中 OPO 的输出线宽小于由(4)式计算得到的自发辐射谱宽。最后用刀口法测量闲频光光斑半径,拟合得到其光束质量因子 $M^2 = 1.63$ 。

4 实验结果与分析

先使用小功率抽运光进行实验研究,得到了最优腔内信号光光强的实验值,将实验结果和理论结果进行对比,设计了大功率抽运光条件下需要的参数,最终获得了 8 W 的闲频光输出。

4.1 最优腔内信号光光强的实验研究

为获得 2.9 μm 波段的高功率连续波激光输出,(2)式得到的最优腔内信号光光强需要进行实验测定。分别采用 $R = 98.7\%$ 和 $R = 97.6\%$ 的输出镜进行实验,晶体温度设置为 45 °C。图 4 为不同抽运光功率对应的闲频光输出功率及转换效率曲线图。可以看到,输出镜反射率相同时闲频光输出功率随抽运光功率增大而增大。高反射率输出镜情况下的腔内信号光光强比低反射率时更快超过最优腔内信号光强,超过这个值之后闲频光功率虽然继续增加,但是其转换效率开始降低,原因是腔内信号光功率密度过大,同时抽运光光强相对较低,导致光参量振荡中存在严重的逆转换效应,参量过程从信号光和闲频光转换为抽运光,光参量转换效率受到影响。最优腔内信号光光强为

$$I_s(0) = \frac{\Delta I_s}{1 - R}, \quad (7)$$

式中 ΔI_s 为输出信号光光强,可由实验测得。图 4(a)和图 4(b)中,抽运光功率分别为 15 W 和 20 W 左右时 OPO 的转换效率最高,此时测得信号光输出功率分别为 1.91 W 和 3.52 W,近似认为功率分布在信号光腔模束腰内,由(3)式计算得到的腔内信号光强分别约为 366 kW/cm² 和 365 kW/cm²,说明存在腔内信号光光强的最优值使得参量转换效率最高,此时剩余抽运光功率约为 11 W。

上述实验结果表明,连续波光参量振荡器中存在最优腔内信号光光强,此时闲频光转换效率最高,可以选择信号光反射率不同的腔镜控制腔内信号光强,腔镜反射率的选择应与抽运光功率相匹配,同时降低谐振腔腔镜对信号光的反射率可以提高闲频光输出斜率效率,从而能够承受更大的抽运功率而不会引起很强的

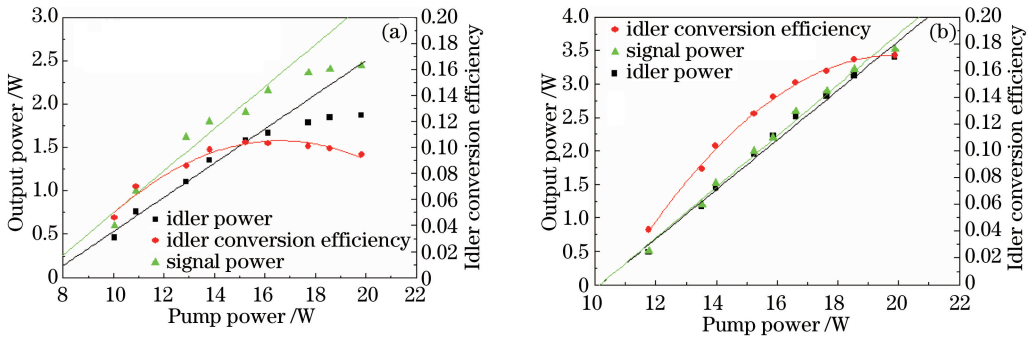


图 4 闲频光功率及转换效率随抽运光功率的变化。(a) $R=98.7\%$; (b) $R=97.6\%$

Fig. 4 Idler power and conversion efficiency as functions of pump power. (a) $R=98.7\%$; (b) $R=97.6\%$

热效应。上述实验中最佳腔内信号光功率密度值略大于理论计算的最佳值,这是由于实际晶体温度大于 $45\text{ }^\circ\text{C}$,信号光波长朝长波方向移动,同时输出镜在 1600 nm 波段的反射率随信号光波长的增加而减小。

4.2 高功率 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出

为获得高功率的 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出,应提高抽运光功率,降低输出镜对信号光的反射率。为控制 OPO 阈值,实验选用 $R=96.5\%$ 的输出镜,实验结果如图 5 所示。当抽运光功率超过 35 W 时,闲频光功率继续增加,此时转换效率趋于饱和,最高转换效率超过 19% ,当抽运光功率为 41 W 时,闲频光最高输出功率超过 8 W 。根据 4.1 节中的实验结果,当腔内信号光光强为 366 kW/cm^2 时,由(1)式求得的抽运光功率应为 40.38 W ,这与实验结果基本吻合。随着抽运光功率的进一步提高,通过控制腔内信号光光强能使 OPO 保持最优转换效率,但是不断增强的抽运光和闲频光会使晶体中产生大量的热,对输出效率造成影响^[19],导致输出线宽展宽^[16]。随着输出镜反射率的降低,OPO 的阈值也会得到提升。上述三个实验的阈值分别为 $7, 10, 15\text{ W}$ 。

由第 2 节的理论分析可知, $I_s(0)$ 只由晶体特性决定,而从上述实验结果来看,转换效率在相同 $I_s(0)$ 时达到最优,和理论分析一致。图 6 为根据(1)式得到的理论总转换效率随输出镜反射率的变化曲线,可以看出抽运光功率越高,达到最优转换效率时所需的输出镜反射率越小,在达到最优反射率之前总转换效率随反射率单调递增,超过最优反射率后总转换效率逐渐下降。根据(1)式得到抽运光功率分别为 $15, 20, 35\text{ W}$ 时,最优反射率约为 $98.2\%, 97.7\%, 96\%$,与实验中使用的腔镜反射率较为吻合。

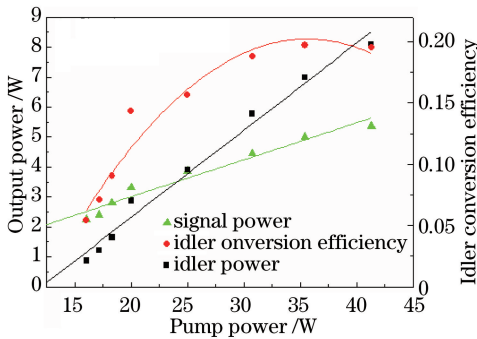


图 5 闲频光功率及转换效率随抽运光功率的变化($R=96.5\%$)

Fig. 5 Idler power and conversion efficiency as functions of pump power ($R=96.5\%$)

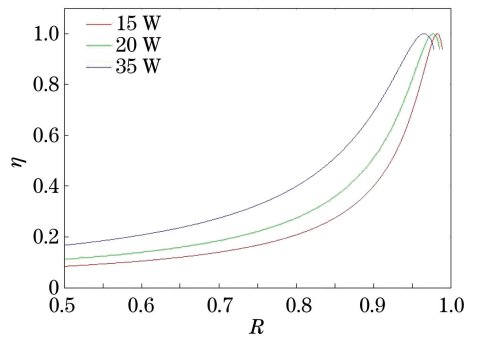


图 6 不同抽运光功率下转换效率与输出镜反射率的关系

Fig. 6 Conversion efficiency as a function of signal reflectivity for different pump powers

5 结 论

利用自主研发的侧面抽运 Nd:YAG 固体激光器作为抽运源,对基于 MgO:PPLN 晶体的连续波光参量振荡器最优转换效率进行了实验研究。实验证明连续光参量振荡器腔内存在最优的信号光光强,使得光参量振荡器达到最优转换效率。实验得到了 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 波段、功率超过 8 W 的连续中红外输出,其谱线宽度小于 0.68 nm ,闲频光转换效率大于 19% 。OPO 的最高输出功率受限于抽运激光器的输出功率,采用更高的抽

功率和反射率更低的输出镜有望获得更高的连续波中红外输出。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianghong, Xue Liangping, Yan Boxia, *et al.* Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO₃ crystal[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 209-213.
姚江宏, 薛亮平, 颜博霞, 等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡[J], 中国激光, 2007, 34(2): 209-213.
- 2 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang, *et al.* Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 670-674.
彭跃峰, 鲁燕华, 谢刚, 等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 670-674.
- 3 Li S, Farooq A, Hanson R K. H₂O temperature sensor for low-pressure flames using tunable diode laser absorption near 2.9 μm[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(12): 125301.
- 4 Richards B D O, Teddy-Fernandez T, Jha A, *et al.* Mid-infrared emission from Dy³⁺ doped tellurite bulk glass and waveguides[C]. SPIE, 2012, 8534: 853411.
- 5 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.* The generation of high efficiency and high quality and high stability parametric amplified light[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(1):010509.
刘红军, 陈国夫, 赵卫, 等. 高质量高效率高稳定性参量放大光产生的研究[J]. 物理学报, 2004, 53(1): 010509.
- 6 Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(8): 3597-3639.
- 7 Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. Back conversion in optical parametric process[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 024215.
刘建辉, 柳强, 巩马理. 光参量过程中的逆转换问题[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 024215.
- 8 Zhang X, Wang C H, Ye Z B, *et al.* Effect of idler absorption on efficiency of optical parametric oscillators[J]. Optical Review, 2014, 21(5): 505-508.
- 9 Chen D W, Rose T S. Low noise 10 W CW OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005: CThQ2.
- 10 Kumar S C, Das R, Samanta G K, *et al.* 16.6 W, continuous-wave, Yb-fiber-laser-pumped, singly-resonant optical parametric oscillator based on MgO:PPLN[C]. Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference, 2009, 32(4): CD7_2.
- 11 Zhao Jiaqun. Study on mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator technique based on MgO:PPLN crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 95-97.
赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光参量振荡器技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 95-97.
- 12 Li Gang. Transformation and expansion of laser frequency[M]. Beijing: Science Press, 2005: 211.
李港. 激光频率的变换与扩展[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 211.
- 13 Lin S T, Lin Y Y, Huang Y C, *et al.* Observation of thermal-induced optical guiding and bistability in a mid-IR continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2008, 33(20): 2338-2340.
- 14 Zeil P, Thilmann N, Pasiskevicius V, *et al.* High-power, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator employing a variable reflectivity volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29907-29913.
- 15 Nikogosyan N D. Nonlinear optical crystal: A complete survey[M]. Wang Jiyang, Transl. Beijing: Higher Education Press, 2009: 51.
尼科咯相. 非线性光学晶体——一份完整的总结[M]. 王继扬, 译. 北京: 高等教育出版社, 2009: 51.
- 16 Liu Lei, Wang Xiaobo, Li Xiao, *et al.* Thermal-induced dephasing in mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 24-28.
刘磊, 汪晓波, 李霄, 等. 中红外连续波单谐振光参量振荡器热致相位失配[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 24-28.
- 17 Peng Y F, Wei X B, Xie G, *et al.* A high-power narrow-linewidth optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Laser Physics, 2013, 23(5): 1382-1391.
- 18 Baumgarther R A, Byer R. Optical parametric amplifier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, 15(6): 432-444.
- 19 Ma Xinghuan, Liu Zhengying, Zhang Rongzhu. Influences of laser thermal effect on second harmonic generation in periodically poled lithium niobate crystal[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3302-3306.
马兴寰, 刘正颖, 张蓉竹. 激光热效应对 PPLN 晶体倍频效率的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3302-3306.