

文章编号: 0258-7025(2010)09-2303-06

基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器

檀慧明¹ 林洪沂^{1,2} 张搏麟³

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用 Nd:YVO₄ 固体激光器的 1064 nm 波长作为抽运源, 在室温下实现了 PPMgLN 晶体准相位匹配的光学参量振荡器(OPO)输出。在连续工作模式下, OPO 的抽运阈值为 1.1 W, 并在 8.75 W 的 1064 nm 连续抽运下获得了 905 mW 的 3.2 μm 闲频光输出; 在主动调 Q 的工作模式下, 由平均功率为 6.6 W 的 1064 nm 脉冲激光抽运, 获得了 1.13 W 的中红外波段闲频光输出, 光-光转换效率达到 17%。采用平均功率为 1.15 W 的 Cr:YAG 被动调 Q 的 1064 nm 脉冲激光抽运, 获得了 125 mW 的中红外脉冲激光输出。通过改变晶体的极化周期, 实现了闲频光 3.13~4.20 μm 中红外宽带可调谐的连续和脉冲激光输出, 并在主动调 Q 脉冲激光作为抽运光源时, 测量了相应 OPO 的分立输出光谱、波长调谐间隔和光谱带宽。

关键词 激光器; 光学参量振荡器; PPMgLN 晶体; 中红外可调谐激光器; 连续和脉冲激光输出

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2303

Mid-Infrared Tunable All-Solid-State Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN

Tan Huiming¹ Lin Hongyi^{1,2} Zhang Bolin³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract An optical parametric oscillator (OPO), which is pumped by a Nd:YVO₄ laser with the 1064 nm wavelength, is obtained based on PPMgLN. For the continuous wave (CW) operation mode, the threshold is only 1.1 W and the output power of idler at 3.2 μm is 905 mW. For the active Q-switched operation mode, the average output power at mid-infrared wavelength is 1.13 W, which corresponds to an optical-optical conversion efficiency of 17%. For the passively Q-switched operation mode with a Cr:YAG saturable absorber in the cavity of Nd:YVO₄ laser, the average output power of idler from OPO at the mid-infrared wavelength is 125 mW. By changing the periods of the domain structure on the PPMgLN wafer, a widely tunable mid-infrared spectrum from 3.13 to 4.20 μm is obtained.

Key words lasers; optical parametric oscillator; PPMgLN crystal; mid-infrared tunable laser; continuous wave and pulse output

1 引 言

由于中红外波段的激光在激光雷达、激光测距、

光谱测量和环境检测等领域具有重要的应用前景, 半导体激光抽运的全固态激光器具有高效率、高稳

收稿日期: 2010-04-14; 收到修改稿日期: 2010-06-17

基金项目: 吉林省科技发展计划(200903053)资助课题。

作者简介: 檀慧明(1954—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: hmtan2223@yahoo.com.cn

定性、结构紧凑、长寿命和高光束质量等优点^[1],全固态的中红外波段激光器一直是激光技术的研究热点,采用全固态激光抽运的光学参量振荡器(OPO)作为可获得中红外波段激光输出的实用性方案也获得迅速发展^[2~4],尤其是随着周期性极化晶体(periodically poled crystal)的研究发展,通过该晶体的准相位匹配技术获得的中红外波段 OPO 更是引起了广泛的关注^[5~10]。准相位技术的最大优点是可以利用晶体较大,但采用双折射不能相位匹配的非线性系数,而获得较高的非线性转换效率。与双折射相位匹配技术相比,准相位匹配没有双折射相位匹配中关于波矢方向和偏振方向的限制,通过选择适当的极化周期与相应的温度,就可以实现相位匹配和波长调谐^[11]。

本文采用 Nd:YVO₄ 激光器的 1064 nm 波长作为抽运源,通过 PPMgLN 晶体的准相位匹配技术和 OPO 的光学参量变换,分别获得了连续(CW)、主动调 Q 和被动调 Q 的中红外波段激光输出。通过改变晶体的周期,实现了 OPO 的闲频光在 3.13~4.20 μm 的中红外宽波段分立调谐。

表 1 几种周期性极化晶体的特性

Table 1 Properties of the periodically poled nonlinear crystals

Crystals	Nonlinear coefficient/ (pm/V)	Photorefractive damage threshold	Optical damage threshold (532 nm)	Coercive field/ (kV/mm)	Length /mm	OPO spectral range /μm
PPLN	15~17	low	low	21	50	0.35~5
PPMgLN	25.2	moderate	moderate	4.5	50	0.35~5
PPLT	10	high	high	1.7~4.5	/	visible near-IR
PPKTP	5~10	high	high	2	20	/

为了解决 PPLN 应用于中红外 OPO 中遇到的问题,进一步研究发现,在 PPLN 中掺入 MgO 可以极大地降低其矫顽电场,同时掺 MgO 在摩尔分数 5% 的铌酸锂晶体中,抗光损伤阈值比常规的无掺杂铌酸锂晶体提高了将近 100 倍,有效地提高了材料的抗光损伤能力,在常温下就可实现非线性光学频率转换。因此 PPMgLN 在高功率 OPO 方面是比 PPLN 更理想的非线性光学材料^[9,10]。

与双折射相位匹配相同,PPMgLN 晶体的光参量振荡过程满足能量守恒和动量守恒关系

$$\frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_p}, \quad (1)$$

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} = \frac{1}{\Lambda}, \quad (2)$$

式中 n_p, n_s, n_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的折射率; λ_p, λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的波

2 PPMgLN 晶体的特性

表 1 列出了常用的准相位匹配周期极化晶体,主要有 PPLN, PPKTP, PPLT^[12] 和 PPMgLN 等。其中 PPKTP 具有较高的损伤阈值和 2 kV/mm 的矫顽电场,因此容易极化,但其非线性系数只有 5~10 pm/V,因此采用该晶体的激光器振荡阈值较高,且转换效率低;PPLT 主要应用于近红外、可见光和紫外波段;PPLN(周期性极化铌酸锂)具有 15~17 pm/V 的较大有效非线性系数,同时极化技术成熟,已获得了广泛的应用,已有文献报道了该晶体应用于 OPO,倍频和差频等非线性光学频率转换技术中。但由于 PPLN 晶片在常温下的抗光损伤能力较差,需要加热到 120 °C 以上才能有效地实现 OPO 的频率变换,而且该晶体的矫顽电场较大,晶体厚度难以超过 1 mm,使得晶体的通光面积不能很大,这样在一定程度上制约了 PPLN 在实用化 OPO 中的应用,尤其是该晶体在大功率的 OPO 及小型化的 OPO 的应用中更受到限制。

长, Λ 为 PPMgLN 晶体的极化周期。PPMgLN 晶体内 n_p, n_s 和 n_i 可由 Sellmeier 方程获得^[13]。本实验所用的 PPMgLN 共有 7 个周期,为 31.5~28.5 μm,根据(2)式计算可分别获得对应于 3.13~4.19 μm 的 7 个中红外波长。

3 实验装置

实验采用外腔抽运的 OPO 结构,如图 1 所示。M1 是抽运光耦合透镜,焦距为 50 mm,用于实现抽运光与振荡光的模式匹配。OPO 的谐振腔由两个曲率半径都是 200 mm 的平凹镜构成,分别为输入镜 M2 和输出镜 M3。M2 镀有抽运光高透,信号光和闲频光高反的多层介质膜;M3 镀有抽运光高反,闲频光高透和信号光反射率约为 90% 的多层介质膜。本实验是单谐振和双程抽运的双凹谐振腔结构

的 OPO。为了降低 OPO 的阈值，其谐振腔应尽量短，选在 50~60 mm 之间。PPMgLN 晶体的尺寸为 40 mm×8.2 mm×1 mm，晶体两个端面镀有抽运光、信号光和闲频光增透的多层介质膜。在实验中，将 PPMgLN 晶体用铝箔包裹，安装在置于室温的铜基座上，可以通过对铜基座的平移进行波长分

立调谐。测量中红外的闲频光时，采用锗滤光片滤掉 1.43~1.6 μm 的信号光和 1064 nm 的抽运光以及其他波长的杂散光。由于锗滤光片没有镀膜，仅有 47% 的透射率，在测量的数据处理时已考虑到这一损失。

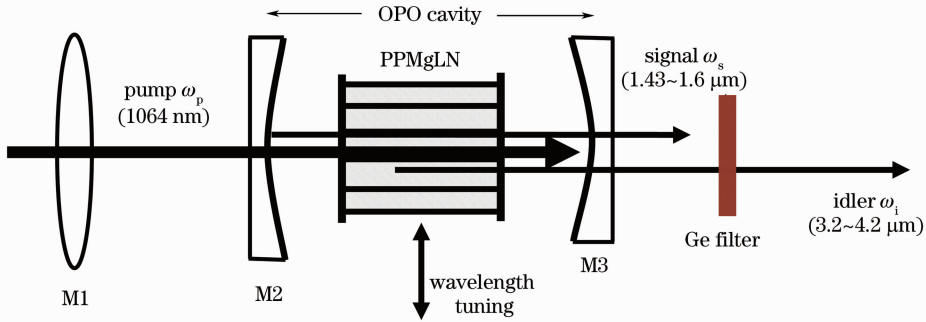


图 1 OPO 实验结构

Fig. 1 OPO experimental setup

实验中采用 Nd:YVO₄ 激光器的 1064 nm 谱线作为 OPO 的抽运源，有连续、主动调 Q 和被动调 Q 等 3 种工作状态。图 2(a)和(b)分别是 Cr:YAG 被动调 Q 和声光(AO)主动调 Q 的 1064 nm 抽运源结构图。其中 Cr:YAG 被动调 Q 的抽运源采用平凹谐振腔结构，输入腔镜的曲率半径为 100 mm。饱和吸收体采用初始透射率为 85% 的 Cr³⁺:YAG 晶体，两端镀有 1.064 μm 增透膜。Cr:YAG 的放置应尽量靠近平面输出镜，可以增加激光晶体与饱和吸收体处的振荡光光束直径比，降低获得被动调 Q 脉冲输出的第二阈值条件，激光晶体采用两端镀有 1064 nm 增透膜的 Nd:YVO₄ 晶体，晶体长度为

5 mm, Nd³⁺ 的掺杂原子数分数为 0.5%。连续抽运源的结构与主动声光调 Q 抽运源相似，也是平-平腔结构，只是在主动调 Q 的基础上去掉声光调制器。连续与主动声光调 Q 抽运源的激光晶体都采用离子键合的 Nd:YVO₄ 晶体，结构为 YVO₄+Nd:YVO₄+YVO₄，尺寸为 3 mm+5 mm+3 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%，晶体左端镀有 808 nm 增透和 1.064 μm 高反的多层介质膜作为激光器的输入腔镜，另一端镀 1.064 μm 波长的增透膜。激光谐振腔的输出镜是 1.064 μm 的反射率为 70% 的平面镜。激光器主动调 Q 时，采用 AO 调制器的作用长度约为 30 mm，两端镀 1.064 μm 增透膜，重复频

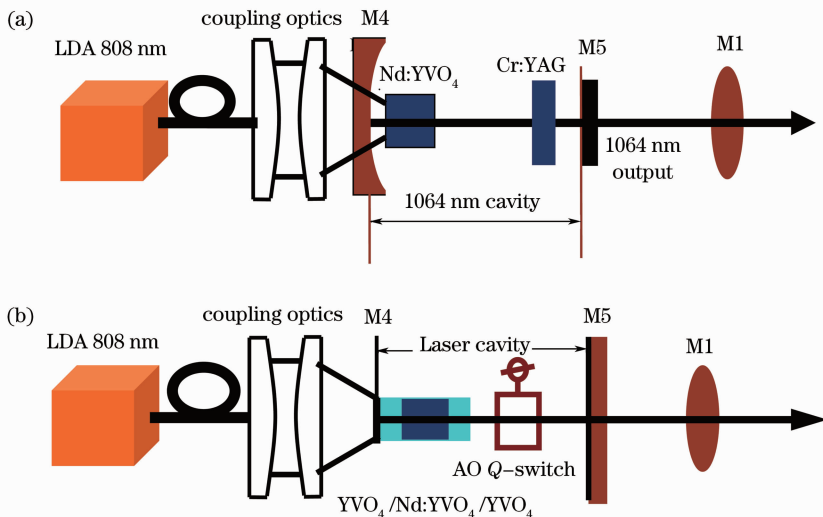


图 2 OPO 的抽运源装置图。(a) Cr:YAG 被动调 Q；(b) AO 调制器主动调 Q

Fig. 2 Experimental setup of Nd:YVO₄ laser. (a) Cr:YAG passive Q-switch; (b) AO active Q-switch

率在 1~50 kHz 可调。3 种结构的 Nd:YVO₄ 激光器抽运源都是 808 nm 的半导体激光器阵列 (LDA), 通过双平凸镜的光学耦合系统聚焦到激光晶体内部。

4 实验结果与分析

OPO 系统抽运源的 Nd:YVO₄ 激光器工作状态分别为连续、主动调 Q 和被动调 Q 3 种工作模式。通过改变 Nd:YVO₄ 激光器工作模式, OPO 可以分别获得连续和脉冲的中红外波长激光输出。

4.1 连续输出的中红外 OPO

当 LDA 的 808 nm 抽运功率为 20 W 时, 连续的抽运源获得了最大 8.75 W 的 1064 nm 输出。由于 PPMgLN 晶体的有效非线性系数非常高 (25.2 pm/V), 采用单谐振的外腔抽运结构可以很容易实现连续的 OPO 中红外激光输出。在固定 1064 nm 的 OPO 抽运功率为 3.4 W 时, 对应不同的晶体极化周期, 获得的波长调谐曲线如图 3 所示。晶体的极化周期为 31 μm 时, 对应于中红外 3.2 μm 波长, 获得了调谐实验最高的 OPO 激光输出功率。

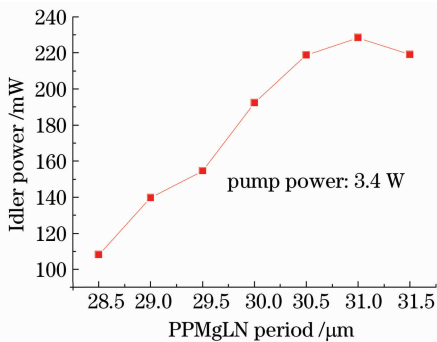


图 3 抽运光 3.4 W 时, 不同晶体极化周期对应的闲频光输出功率

Fig. 3 Idler output power versus the poling period when pump power is 3.4 W

固定 PPMgLN 周期为 31 μm, 在连续工作时分别测量了在不同抽运功率下, 信号光、闲频光以及信号光和闲频光总的输出功率随 1064 nm 抽运光功率的变化如图 4 所示。在抽运功率为 8.75 W 时, 获得了输出功率为 905 mW 的 3.2 μm 闲频光和输出功率为 980 mW 的 1.59 μm 信号光。1064 nm~3.2 μm 中红外光的光-光转换效率为 10.3%, 总的光-光转换效率为 21.5%。抽运阈值仅为 1.1 W 左右, 远低于同类结构 OPO 系统的 2~4 W 阈值^[14]。

4.2 Cr:YAG 饱和和吸收体被动调 Q 输出的中红外 OPO

由于在激光谐振腔内的 Cr:YAG 处 1064 nm 振

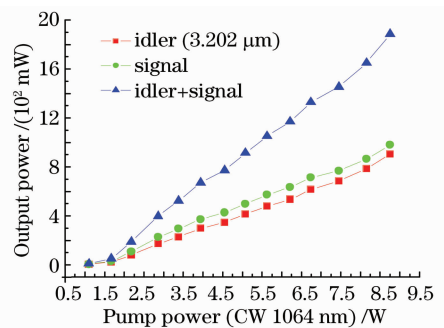


图 4 闲频光、信号光以及信号光和闲频光的总输出功率随 1064 nm 连续抽运功率的变化

Fig. 4 Idler, signal and the whole power versus the pump power of 1064nm CW output

荡光的功率密度较高, 该处的功率密度又会通过耦合透镜 M1 聚焦到 OPO 的 PPMgLN 晶体内部引起该晶体的损坏。而且在高功率密度下, Cr:YAG 表面的增透膜在调试实验过程中也很容易损坏, 因此, 实验中采用 Nd:YVO₄ 激光器的 808 nm 抽运功率没有超过 4.5 W, 这时测量 1064 nm 的平均输出功率为 1.15 W, 脉冲重复频率为 140 kHz, 脉宽为 35 ns, 脉冲激光的输出比较稳定。图 5 是 PPMgLN 的周期为 31 μm 时, 闲频光、信号光以及信号光和闲频光总的平均输出功率与 1064 nm 波长抽运功率的关系。该 OPO 的 1064 nm 抽运阈值为 0.25 W。在抽运光功率为 1.15 W 时, 获得了平均功率为 125 mW 的中红外波长的脉冲激光输出, 同时也获得了平均功率为 85 mW 的信号光输出, 总的光-光转换效率达到 18.6%, 功率未出现饱和。

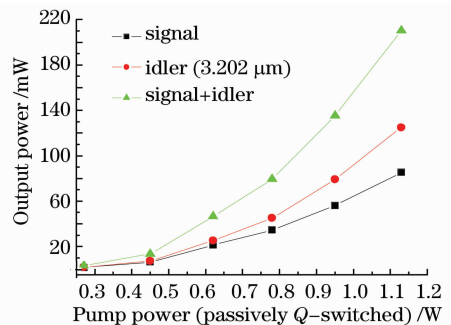


图 5 闲频光、信号光以及信号光和闲频光的总输出功率随被动调 Q 的 1064 nm 平均抽运功率的变化

Fig. 5 Idler, signal and whole power of OPO versus the 1064 nm average pumping power from a passive Q-switch laser

4.3 声光调 Q 中红外输出

在声光主动调 Q 的实验中, 为了防止 AO 调制器晶体和 PPMgLN 晶体的光损伤, AO 调制器的重复频率尽量不低于 10 kHz。808 nm 的抽运功率为

20 W, AO 调制器的重复频率为 40 kHz 时, 获得 Nd:YVO₄ 激光器的输出 1064 nm 波长的平均功率为 6.6 W。测量时改变 AO 调制器的重复频率, 发现激光的脉冲宽度随重复频率的增加而增加, 在 40 kHz 时, 脉宽为 65 ns。

图 6 是 OPO 晶体的极化周期为 30.5 μm, 抽运功率为 6.6 W 和重复频率为 40 kHz 时, 闲频光、信号光以及信号光和闲频光的总平均输出功率随抽运光功率的变化。测量时 OPO 的抽运阈值为 0.4 W。在抽运光的平均功率为 6.6 W 时获得了平均功率为 1.13 W 的中红外脉冲激光输出, 光-光转换效率达到 17%, 信号光和闲频光的总平均输出功率最高超过 2 W, 而且未出现饱和。

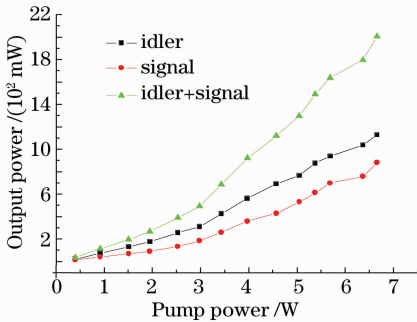


图 6 闲频光、信号光以及信号光和闲频光的总平均输出功率与声光调 Q 的 1064 nm 抽运光的平均功率的关系
Fig. 6 Idler, signal and whole power of OPO versus the average pumping power of 1064 nm from an AO active Q-switch laser

图 7 为 808 nm 的抽运功率为 12 W 时, 不同的重复频率对应的闲频光平均输出功率。在 40 kHz 时, OPO 获得了最大 690 mW 的输出功率。

采用中红外光谱仪, 在室温下测量了不同的晶体极化周期所对应的波长及光谱宽度, 如表 2 所示。随着调谐波长的增加, 平均调谐步长也增加, 最小为

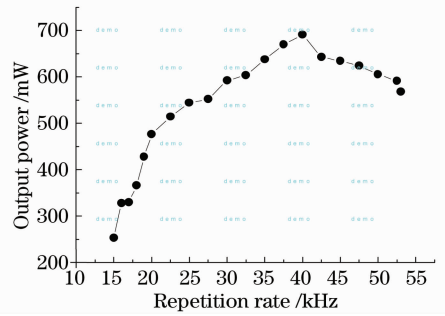


图 7 OPO 闲频光平均输出功率随 AO 调制器重复频率的变化

Fig. 7 Average power of idler versus the frequency of AO modulator

0.12 μm, 最大为 0.25 μm。调谐步长在极化周期为 29.0 μm 的步长较小可能是由于晶体极化制备时的误差、波长的测量误差或者由于晶体的散热不好等原因。在测量不同的极化周期时, 晶体的温度有一些差别也可能引起波长的测量误差。图 8(a) 和 (b) 是晶体的极化周期分别为最长和最短时测量的波长和光谱带宽的曲线, 光谱带宽分别为 18 nm 和 25 nm。其他晶体极化周期的测量结果如表 2 所示, 光谱带宽都位于 18~25 nm 之间。

表 2 波长和光谱带宽的测量结果

Table 2 Testing results of the wavelength and spectral bandwidth

Poling period/ μm	Wavelength/ μm	Tuning step / μm	Spectral bandwidth / nm
31.5	3.13		18
31.0	3.25	0.12	25
30.5	3.43	0.18	20
30.0	3.61	0.18	19
29.5	3.83	0.22	19
29.0	3.95	0.12	22
28.5	4.20	0.25	25

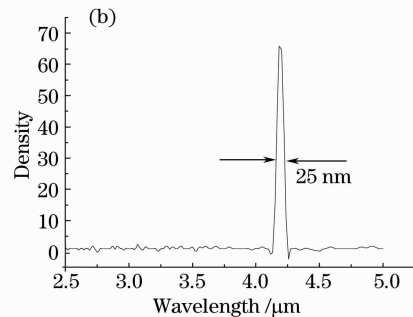
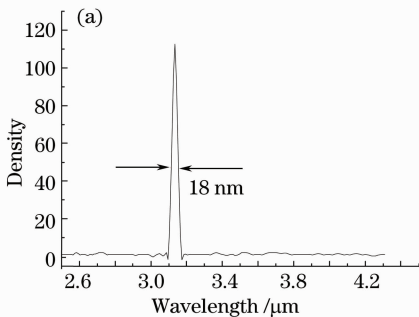


图 8 晶体极化周期分别为最长和最短时的光谱曲线。(a) 晶体极化周期为 31.5 μm; (b) 晶体极化周期为 28.5 μm
Fig. 8 Spectroscopy curve at maximum and minimum poling period of the PPMgLN. (a) poling period at 31.5 μm; (b) poling period at 28.5 μm

另外,在脉冲和连续 OPO 的实验中发现信号光与闲频光功率的比值是不一样的。在连续 OPO 的实验中,信号光功率总大于闲频光的功率;在脉冲 OPO 系统中,信号光功率小于闲频光的功率。其原因可能是由信号光自身的倍频、三倍频以及信号光与抽运光和频等非线性光学效应在一定的程度上引起了信号光的输出功率损失^[15]。尤其在脉冲激光抽运的 OPO 中,腔内的抽运光和信号光的峰值功

率较高,非线性光学效应明显,引起的信号光损失要大于连续光抽运。在脉冲光抽运的实验时可以比连续光抽运更清楚地看到这些效应产生的可见光。

采用 Nd:YVO₄ 激光器的 1064 nm 波长作为抽运源,分别获得了基于 PPMgLN 晶体准相位匹配的低阈值工作连续、主动调 Q 和被动调 Q 的脉冲 OPO。表 3 是 3 种抽运条件下实验结果的比较。

表 3 连续、被动调 Q 和主动调 Q 的 1064 nm 激光抽运 OPO 的实验结果比较

Table 3 Comparison of experimental results of OPO pumped by CW, passive Q-switch and active Q-switch laser

	Maximum pumping power /W	Maximum output power of idler /W	Optical-optical conversion efficiency of idler /%	Threshold of OPO at 1064 nm /W
CW OPO	8.75	0.905	10.3	1.1
Passive Q-switch OPO	1.15	0.125	10.9	0.25
Active Q-switch OPO	6.6	1.13	17	0.4

通过对晶体的平移改变晶体的极化周期,实现了闲频光 3.13~4.20 μm 中红外宽带可分立调谐的连续和脉冲激光输出。随着改变晶体的极化周期,调谐波长的步长最小为 0.12 μm,最大为 0.25 μm。在不同极化周期时,测量了 OPO 输出的中红外闲频光的光谱宽度在 18~25 nm 之间。

5 结 论

实验表明,无论是采用连续还是脉冲的 1064 nm 激光抽运,PPMgLN 都是高效的中红外 OPO 光学参量变换晶体,并且有较低的抽运阈值,因此在中红外的 OPO 领域具有很大的应用前景。如果在改变 PPMgLN 晶体极化周期,进行分立调谐波长基础上,再改变晶体的工作温度,进行波长的微调,可实现 3~4.2 μm 中红外波段的连续调谐输出。

参 考 文 献

- Gao Lanlan, Tan Huiming, Wang Wei *et al.*. LD pumped Nd:YVO₄ CW three-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1749~1753
- 高兰兰,檀慧明,王巍等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 连续 3 波长激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1749~1753
- L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Multi-grating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 591~593
- Jieguang Miao, Jiying Peng, Baoshan Wang *et al.*. Compact KTA-based intracavity optical parametric oscillator driven by a passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(23): 4287~4291
- W. Zendzian, J. K. Jabczynski, J. Kwiatkowski *et al.*. High-repetition-rate, intracavity-pumped KTP OPO at 1572 nm [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(3): 329~332
- Ji Feng, Lu Rongsheng, Li Baosheng *et al.*. Angle-tuned dual-signal quasi-phase matching optical parametric generator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 358~361
- 纪峰,卢荣胜,李保生等. 角度调谐双信号光运转准相位匹配

- 光学参量的产生[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 358~361
- Hideki Ishizuki, Ichiro Shoji, Takunori Taira. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a 3-mm-thick periodically poled MgO:LiNbO₃ device [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2527~2529
- Pu Zhao, Baigang Zhang, Enbang Li *et al.*. Experimental study on a high conversion efficiency, low threshold, high-repetition-rate periodically poled lithium niobate optical parametric generator [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 7224~7229
- Zang Guiyan, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Temperature tuning quasi-phase matched optical parametric oscillators [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(5): 469~472
- 臧贵艳,姚建铨,张百钢等. 温度调谐准相位匹配光学参量振荡器[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(5): 469~472
- 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
- Yang Jian, Li Xiaoqin, Yao Jianquan *et al.*. High-power temperature-tunable periodically-poled lithium niobate optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1459~1462
- 杨剑,李晓芹,姚建铨等. 基于周期极化铌酸锂晶体的高功率可调谐光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1459~1462
- Yao Jianghong, Li Guangao, Xu Jingjun *et al.*. New development of quasi-phase-matching (QPM) technique [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1999, **16**(4): 289~294
- 姚江宏,李冠告,许京军等. 准相位匹配(QPM)技术研究新进展[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(4): 289~294
- G. K. Samanta, G. R. Fayaz, M. Ebrahim-Zadeh. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2623~2625
- O. Paul, A. Quosig, T. Bauer *et al.*. Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% MgO doped congruent LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1): 111~115
- W. R. Bosenberg, A. Drobshoff, J. I. Alexander *et al.*. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 713~715
- B. Wu, Y. Shen, S. Cai *et al.*. Widely tunable high power OPO based on a periodically poled MgO doped lithium niobate crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(6): 1115~1119