

文章编号 1004-924X(2013)06-1404-06

基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器

苏 辉^{1,3*}, 李志平^{1,3}, 段延敏^{2,3}, 王小蕾¹, 朱海永²

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; 2. 温州大学 物理与电子信息学院, 浙江 温州 325035; 3. 中国科学院 光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要:为了用简单、紧凑的谐振腔获得稳定的激光输出, 大的调谐范围和转换效率, 设计了信号光单共振 V 型光学参量振荡(OPO)腔, 采用内腔式抽运周期极化掺镁铌酸锂晶体(PPMgLN)的光学参量振荡技术获得了连续中红外宽波段调谐激光的输出。用 808 nm 半导体激光抽运 Nd:YVO₄ 晶体产生的 1 064 nm 激光作为光参量振荡的基频光, 通过 V 型腔灵活控制激光光斑并改变 PPMgLN 的极化周期和控制温度实现了 2 249~3 706 nm 中红外的连续宽波段调谐激光输出。在半导体激光抽运功率为 10.5 W, 极化周期为 29.98 μm, 控制温度为 411 K 的情况下获得了最高 650 mW 的中红外激光输出, 对应的中心波长为 3 466 nm, 线宽为 2.6 nm, 具有较好的单色性。在 7.5 W 的入射功率下, 最高 808 nm 抽运光到闲频光的转化效率达 7.73%, 对应输出功率为 580 mW。

关键词: 掺镁周期极化铌酸锂晶体; 光学参量振荡器; 内腔单共振; 温度调谐

中图分类号: O437.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1404

Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate

SU Hui^{1,3*}, LI Zhi-ping^{1,3}, DUAN Yan-min^{2,3}, WANG Xiao-lei¹, ZHU Hai-yong²

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China;

2. College of Physics and Electronic Information, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

3. Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

* Corresponding author, E-mail: hui@fjirms.ac.cn

Abstract: To obtain stable laser outputs, bigger turning ranges and higher transfer efficiencies by a simple and compact resonance cavity, a V-type Optical Parametric Oscillator (OPO) pumped by a 1 064 nm Nd:YVO₄ laser is designed, and broadband wavelength-tunable, continuous-wave (CW) mid-infrared laser sources are obtained. The Nd:YVO₄ laser crystal is pumped by a 808 nm semiconductor laser to generate a 1 064 nm laser as the fundamental frequency light, and the V-type cavity is

收稿日期: 2012-12-26; **修订日期:** 2013-01-28.

基金项目: 中国科学院百人计划资助项目; 福建省重点研究项目(No. 2011HZ001-3); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY12F05003; LQ13F050004); 温州市科技计划资助项目(No. G20110002); 中科院光电材料化学与物理重点实验室资助项目(No. 2008DP173016)

used to control laser spots and to change the grating period and temperature of the PPMgLN to obtain the 2 249 to 3 706 nm tunable idler output. With an 808-nm pump power of 10.5 W and a polarized period of 29.98 μm , a maximum idler output power up to 650 mW at 3 466 nm is achieved under the PPMgLN to be set at 411 K, which shows a better monochromaticity and is corresponding to a center wavelength of 3 466 nm and line width of 2.6 nm. Moreover, when 808 nm pump power is 7.5 W, the maximum optical-to-optical conversion efficiency can be up to 7.73% and the corresponding output power is 580 mW.

Key words: magnesium-doped periodically poled lithium niobate crystal; Optical Parametric Oscillator (OPO); intra-cavity single resonant; temperature-tuning

1 引 言

中红外激光器(3~5 μm)在气体探测、红外对抗、远距离物体扫描、光谱分析、医疗等诸多方面有重要的应用价值和广阔的应用前景^[1-2]。因此,此波段的激光器是人们关注的研究热点。目前,可产生中红外激光的方法较多,其中较重要的是半导体量子级联激光器,光纤激光器,以及基于非线性光学晶体变频的光参量振荡方法。

量子级联激光器是一种基于子带间电子跃迁,将数个量子阱结构串联在一起的新型单极光源。它的输出波长与有源区量子阱厚度有关,可通过温度或电流进行调谐^[3-4]。但是中红外量子级联激光器也有明显的缺点,它结构复杂,生长层次繁多,阈值电流密度大,散热性差;作为半导体激光器,输出功率小、而且可调谐范围很窄。中红外光纤激光器是用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的激光器,受限于自身工艺难度和成本较高,它的应用并不是太广泛。采用全固态激光抽运的光学参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)获得中红外波段激光的方法因具有结构紧凑,寿命长,输出功率高等优点而得到了迅速发展;尤其是随着周期性极化晶体研究的发展,通过利用周期极化晶体的准相位匹配可获得较高的非线性转换效率,通过选择适当的极化周期和相应温度还可以实现宽范围的波长调谐^[5-14]。

2007年,Wu等人报道了通过声光调Q的MgO:PPLN OPO输出,得到的信号光可在1.42~1.73 μm 调谐,闲频光可在2.76~4.27 μm 调谐^[11]。2008年,台湾国立清华大学的Lin等人报道了用1 064 nm的光纤激光器抽运掺镁周期极化铌酸锂晶体的连续光参量振荡输出。在25

W的抽运功率下,获得了7.4 W,1.57 μm 的输出和0.2 W,3.3 μm 的输出^[9]。2010年,印度的Dixit等人报道了使用多极化周期MgO:PPLN的单共振腔OPO,得到最大的信号光和闲频光输出功率分别为250 mW和140 mW^[14]。目前,已有文献报道的输出以信号光为主,而闲频光的连续输出功率相对较低。

本文采用波长为808 nm的半导体激光抽运Nd:YVO₄晶体产生的1 064 nm的激光作为镁掺杂周期极化铌酸锂晶体(PPMgLN)光学参量振荡腔的抽运光源,对闲频中红外的激光进行了研究。为了在输出功率较稳定的同时能够调节OPO的腔长,以得到更好的模式匹配和调节激光光斑,本文设计了信号光单共振的V型OPO腔。实验中根据PPMgLN晶体的准相位匹配技术和OPO的光学参量变换,通过改变晶体的极化周期和温度实现了OPO的闲频光在2 249~3 706 nm的中红外宽波段分立调谐。在10.5 W的半导体激光入射功率,极化周期为29.98 μm 和控制温度为411 K的情况下获得了最高为650 mW的中红外激光输出。

2 实验装置

实验采用内腔单共振OPO结构,如图1所示。最左端是波长为808 nm的半导体激光器泵源,光纤耦合输出激光束为200 μm ,L₁和L₂是两个焦距为30 mm的平凸透镜,它们组成的耦合透镜组将光纤耦合输出的激光聚焦到激光晶体前端面。激光晶体的尺寸为3 mm×3 mm×10 mm,掺杂原子百分数为0.4%的a切Nd:YVO₄晶体,前端面镀对808 nm的增透膜和1 064 nm的高反膜作为基频光的高反腔镜,后端

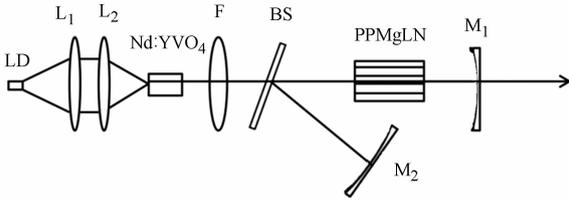


图 1 波长为 808 nm 的光纤耦合输出半导体激光器抽运的内腔单共振腔结构(L_1 和 L_2 是耦合聚焦透镜组, F 是双凸透镜, BS 是中间反射镜, M_1 和 M_2 分别是输出透镜和反射透镜)

Fig. 1 Configuration of ICSRO pumped by fiber-coupled diode-laser-array at 808 nm (L_1 and L_2 : coupling lenses, F : lens, BS : intermediate mirror, M_1 : output cavity mirror, M_2 : reflecting mirror)

面镀 808 nm 和 1 064 nm 的增透膜。在实验过程中, $Nd:YVO_4$ 晶体温度恒定控制在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。 M_1 , M_2 和中间反射镜 BS 构成 OPO 腔, 中间反射镜 BS 双面镀有 1 064 nm 的增透膜, 右端面镀有信号光和闲频光的高反射膜(反射率 $R > 99.5\%$)。输出镜 M_1 是曲率半径为 100 mm 的平凹透镜, 凹面镀有 1 064 nm 和信号光的高反膜(反射率 $R > 99.5\%$), 同时镀闲频光的高透膜(透过率 $> 90\%$)。反射镜 M_2 是曲率半径为 100 mm 的平凹透镜, 凹面同时镀有信号光和闲频光的高反膜(反射率 $R > 99.5\%$)。实验中选用的是 PPMgLN 晶体, 因为 PPMgLN 晶体相比于普通的 PPLN 晶体具有更好的抗光折射能力, 更高的光损伤阈值和更大的二阶非线性光学系数(d_{33})。OPO 腔中的 PPMgLN 晶体大小为 $1\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 并且前后端面镀有 1 064 nm 的增透膜。实验过程中通过将 PPMgLN 晶体放进控温炉来调节控制晶体的温度, 温控炉的调节温度为 $50 \sim 190\text{ }^\circ\text{C}$, 控制精度高于 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。为便于光路调整, 温控炉固定在特制的调整平台上。 $Nd:YVO_4$ 晶体的前端面到 M_1 构成抽运光(1 064 nm)的谐振腔, 腔长为 180 mm。 M_1 和 M_2 通过反射镜 BS 构成信号光的谐振腔, 腔长为 135 mm。使用的 OPO 腔是 V 型腔能够任意调节 OPO 腔长而不影响抽运光的谐振腔长。这样设计既能获得较大的抽运光抽运功率, 又能灵活控制激光光斑。为了降低连续 OPO 阈值, 提高闲频光的转化效率, 信号光被完全限制在 OPO 腔内, 只输出闲频光。

表 1 晶体及镜片参数表

Tab. 1 Parameters of crystals and mirrors

crystal	Size	Coating film
Nd:YVO ₄	3×3×10 mm ³	S1: HT-808 nm > 95%, HR-1 064 nm > 99.5%
		S2: HT-808 nm > 95%, HT-1 064 nm > 99.5%
PPMgLN	1×10×40 mm ³	S1: HT-1 064 nm > 99.5% S2: HT-1 064 nm > 99.5%
		S1: HT-1 064 nm > 95%, S2: HT-1 064 nm > 95%, 1.4~2 μm HR R > 99.5%, 3~4 μm HR R > 99.5%
BS	Φ=20 mm	S1: 1 064 nm & 1.4~2 μm HR R > 99.5%, 3~4 μm AR T > 90% S2: 3~4 μm AR T > 90%
M ₁	Φ=20 mm, R=100 mm	S1: 1 064 nm HT T > 95%, 1.4~2 μm HR R > 99.5%, 3~4 μm HR R > 99.5%
M ₂	Φ=20 mm, R=100 mm	S1: 1 064 nm HT T > 95%, 1.4~2 μm HR R > 99.5%, 3~4 μm HR R > 99.5%

3 实验结果与分析

实验使用的 PPMgLN 共有 5 个周期, 分别是 29.52, 29.98, 30.49, 31.02, 31.59 μm。根据 PPMgLN 晶体的 Sellmeier 方程和准相位匹配条件可计算出闲频光在不同的极化周期和温度下的波长调谐曲线, 如图 2 所示, 并且与实验测量的波长进行比较。利用所有的光栅周期, 当调节温度

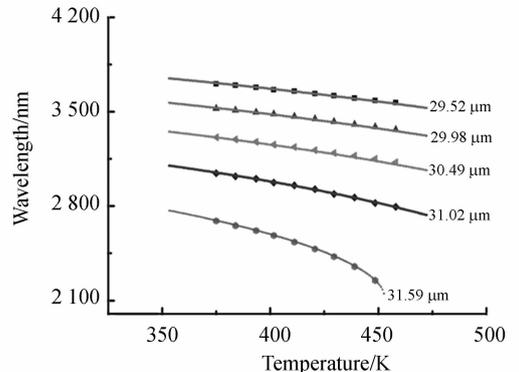


图 2 不同周期温度调谐的实验波长与理论波长的曲线

Fig. 2 Temperature-tuning curves of OPO at different grating periods of PPLN

在 373~463 K 变化时,可以实现闲频光 2 249~3 706 nm 的连续变化。图 2 中的实线是理论值曲线,曲线上的点是实验测量值。从图可知,实验值和理论值吻合得很好,由温度调节精度和周期调节引起的误差小于 1 nm。

为优化激光输出,PPMgLN 晶体极化周期设定在 29.98 μm ,在 7.5 W 的 808 nm 半导体激光抽运功率下,对系统进行调整。图 3 给出了闲频光输出功率随温度在 373~463 K 的变化曲线。由于 PPMgLN 晶体的改变会导致晶体热透镜效应的微小变化,使输出功率随着温度而波动。随着温度从 373 K 升高到 463 K,实现了超过 520 mW 的闲频光输出,波长为 3 346~3 533 nm。其中,在温度为 411 K 时得到最高 580 mW 的 3 466 nm 闲频光输出。把晶体温度控制在 411 K,改变 PPMgLN 晶体极化周期,得到不同周期的输出功率曲线,如图 4 所示。由于系统的镀膜参数在 3.5 μm 附近最佳,所以在第 2 个极化周期(29.98 μm)下闲频光输出功率最大。

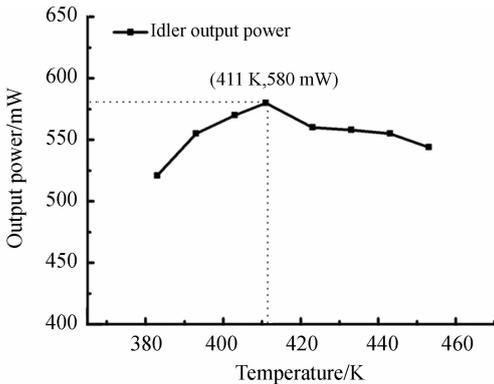


图 3 PPMgLN 极化周期为 29.98 μm 时,闲频光输出功率与温度的变化曲线

Fig. 3 Measured output idler power versus temperature of PPMgLN at grating period of 29.98 μm

通过前面的实验分析,在晶体温度为 411 K 和周期为 29.98 μm 时的闲频光输出功率要比其它温度和周期下的输出功率更大。进一步实验将晶体温度恒定在 411 K,周期为 29.98 μm 情况下,研究闲频光的输出功率和转化效率随着抽运功率的变化。图 5 给出了输出功率随半导体激光器功率的变化曲线和光-光转换效率曲线。闲频光的出光阈值为 3.5 W,输出功率随着抽运功率

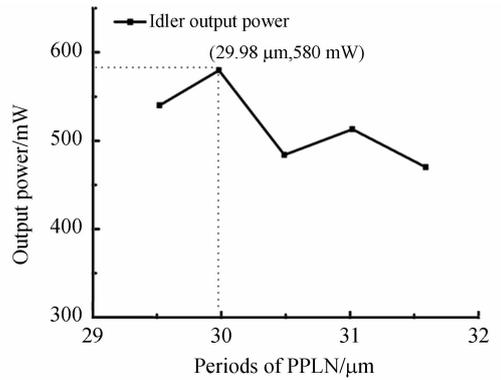


图 4 PPMgLN 温度控制在 411 K 时,不同极化周期输出功率的变化曲线

Fig. 4 Idler output power as a function of grating period at 411 K

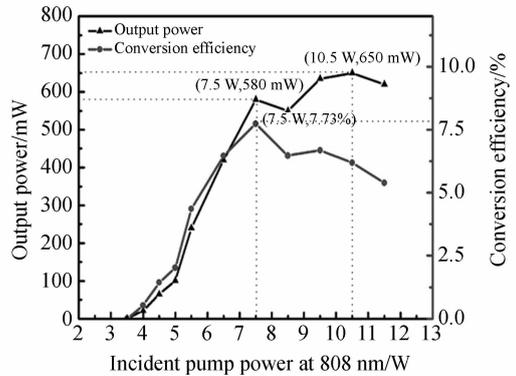


图 5 PPMgLN 晶体极化周期为 29.98 μm ,温度为 411 K 时,闲频光的输出功率和转换效率与半导体激光泵源功率的关系曲线

Fig. 5 Idler output power and conversion efficiency of OPO as function of 808 nm pump power at grating period of 29.98 μm and temperature of 411 K

的增大而升高,在泵源功率为 10.5 W 时得到最大的输出功率为 650 mW。转化效率随着抽运功率的增大,在 7.5 W 抽运功率下最高的光-光转换效率达 7.73%,对应闲频光的输出功率为 580 mW。随着泵源功率继续增加,闲频光的输出功率继续增大。但是泵源功率的增加会增大 Nd:YVO₄ 晶体的热效应作用,使得 OPO 腔损耗增加,所以转换效率有所下降。在实验中用功率计记录 10 min 内的功率波动,连续闲频光输出功率波动约为 5%。利用 Bristol 激光波长计(821B 中红外激光波长计)对闲频光谱线进行测量,如图 6

所示。结果显示,闲频光的中心波长约为 3 466 nm,谱线宽度为 2.6 nm,具有较好的单色性。

4 结 论

为了在输出功率较稳定的同时能够调节 OPO 的腔长得到更好的模式匹配和调节激光光斑,本文设计了信号光单共振的 V 型 OPO 腔,实验中采用了 808 nm 半导体激光抽运 Nd:YVO₄ 晶体内腔式抽运周期极化掺镁铌酸锂晶体 (PPMgLN) 的光学参量振荡,实现了连续中红外宽波段调谐激光的输出。结合 V 型腔对激光光斑的灵活控制,改变 PPMgLN 的极化周期和控制温度实现了 2 249~3 706 nm 中红外的连续宽波段调谐激光输出,调谐宽度达 1 457 nm。在半导体激光入射功率为 10.5 W,极化周期为 29.98 μm 和控制温度为 411 K 的情况下获得了最高 650 mW 的中红外激光输出,对应的波长为 3 466 nm,线宽为 2.6 nm,具有较好的单色性。在 7.5 W 的入射功率下,808 nm 抽运光到闲频光的转化效率最高达 7.73%,对应的输出功率为 580 mW。本文用较简单和紧凑的腔型实现了宽可调范围的中红外波段(2.25~3.71 μm)较大的连续功率输出和转换效率的激光输出。

LI A ZH. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2213-2220. (in Chinese)

[4] 卞进田,聂劲松,孙晓泉. 中红外激光技术及其进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S3): 188-193.
BIAN J T, NIE J S, SUN X Q. Mid-infrared laser technology and its progress[J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 188-193. (in Chinese)

[5] 檀慧明,林洪沂,张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2303-2308.

TAN H M, LIN H Y, ZHANG B L. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2303-2308. (in Chinese)

[6] 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.

YANG J, LI X Q, YAO J Q, *et al.*. High-power

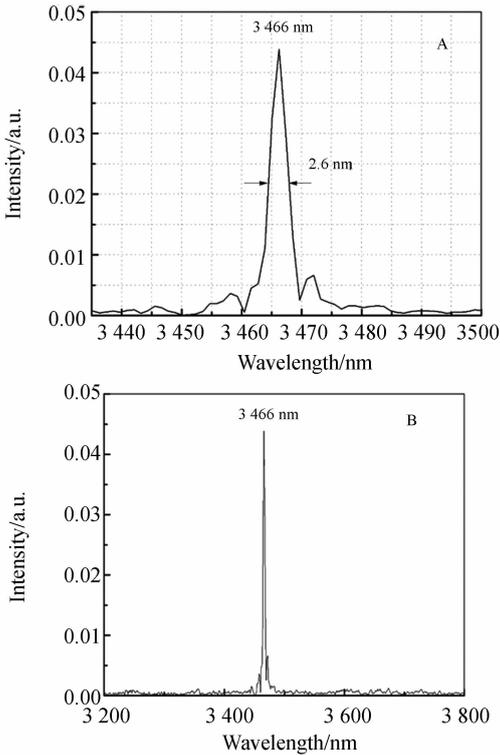


图 6 闲频光输出光谱图(A 图是 B 图放大后图像)
Fig. 6 Output idler spectra of OPO system (Panel A is amplified image of panel B)

参考文献:

[1] 陈东,张伯昆,胡燮,等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(6): 678-683.

CHEN D, ZHANG B K, HU X, *et al.*. Research on the high resolution trace gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 678-683. (in Chinese)

[2] 罗乐,周军,刘成岳,*et al.*. 红外激光心肌打孔的理论模型和实验验证[J]. *光子学报*, 2005, 34(6): 817-819.

LUO L, ZHOU J, LIU CH Y, *et al.*. Theoretic model of making vessels in myocardium by infrared laser and experiment validating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(6): 817-819. (in Chinese)

[3] 李爱珍. 单极型量子级联激光器的发明及其进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2213-2220.

temperature-tunable periodically-poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1459-1462. (in Chinese)

[7] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(11): 2102-2116.

[8] DING X, SHENG Q, CHEN N, *et al.*. High efficiency continuous-wave tunable signal output of an intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(10): 4314-4318.

[9] LIN S T, LIN Y Y, TU R Y, *et al.*. 3- μm continuous-wave singly resonant OPO [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, San Jose, California*, 2008: OPOs II (CTuII).

[10] VAN HERPEN M M J W, BISSON S E, HARRIN F J M. Continuous-wave operation of a single-frequency optical parametric oscillator at 4-5

mm based on periodically poled LiNbO₃[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(24): 2497-2499.

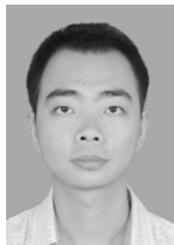
[11] WU B, SHEN Y H, CAI S S. Widely tunable high power OPO based on a periodically poled MgO doped lithium niobate crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39:1115-1119.

[12] BHUSHAN R, YOSHIDA H, TSUBAKIMOTO K, *et al.*. High efficiency and high energy parametric wavelength conversion using a large aperture periodically poled MgO : LiNbO₃[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 3902-3905.

[13] LIN H Y, TAN H M, MIAO J G, *et al.*. Extracavity, widely tunable, continuous wave MgO-doped PPLN optical parametric oscillator pumped with a Nd:YVO₄ laser [J]. *Optical Materials*, 2009, 32:257-260.

[14] DIXIT N, MAHENDRA R, NARANIYA O P, *et al.*. High repetition rate mid-infrared generation with singly resonant optical parametric oscillator using multi-grating periodically poled MgO : LiNbO₃[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42: 18-22.

作者简介:



李志平(1987—),男,福建将乐人,硕士,2010年于山东大学物理学院获得学士学位,主要从事中红外固体激光器的研究。E-mail: lizhiping@fjirsm.ac.cn



段延敏(1982—),女,河南濮阳人,博士,讲师,2012年于中国科学院福建物质结构研究所获得博士学位,主要从事新型激光器及其变频激光的研究。E-mail: ymduan@wzu.edu.cn



王小蕾(1984—),女,安徽亳州人,博士,助理研究员,2011年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事纳米集成光学及其光学器件的研究。E-mail: xlwang@fjirsm.ac.cn



朱海永(1982—),男,浙江温岭人,博士,副教授,2010年于中国科学院福建物质结构研究所获得博士学位,2011年-2012年在新加坡南洋理工大学从事博士后研究,主要从事新型激光器及其变频激光的研究。E-mail: hyzhu@wzu.edu.cn

导师简介:



苏 辉(1971—),男,福建福安人,博士,研究员,博士生导师,1993年于武汉大学物理系获得学士学位,1998年于福建物质结构研究所获得博士学位,2004年于美国新墨西哥大学电子工程系获得博士学位,2004~2006年在美国伊利诺依州香槟分校做博士后,从事半导体中的快光与慢光现象与红外探测器的研究,2006~2009年在美国 EMCORE 公司做 Staff scientist 和 Senior staff scientist,2009年应聘中国科学院福建物质结构研究所“项目百人计划”,担任课题组组长,研究方向为半导体激光器、光电器件和系统。E-mail: huisu@fjirsm.ac.cn