

# 紧凑高效的 Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿光激光器

颜博霞<sup>1</sup> 毕勇<sup>1</sup> 王栋栋<sup>2</sup> 鲍光<sup>2</sup> 齐岩<sup>1</sup> 房涛<sup>1</sup> 张瑛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100086  
<sup>2</sup>北京中视中科光电技术有限公司, 北京 100094)

**摘要** 研究了一种基于周期极化掺镁铌酸锂(PPMgLN)晶体做倍频器件的新型、紧凑和高功率连续绿光激光器。利用外加电场极化法成功制备了厚度为 1 mm, 短周期为 6.95 μm, 占空比接近 50%, 大面积均匀的 PPMgLN; 在 6.8 W 单管激光二极管(LD)抽运的情况下, 利用通光长度仅 1 mm 的 PPMgLN, 腔内倍频获得了 3.8 W 的绿光 532 nm 激光输出, 光-光转换效率高达 56%。

**关键词** 激光器; 绿光激光器; 腔内倍频; 周期极化; 掺镁铌酸锂晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302007

## Compact and Highly Efficient 3.8 W Intracavity Frequency-Doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN Green Laser

Yan Boxia<sup>1</sup> Bi Yong<sup>1</sup> Wang Dongdong<sup>2</sup> Bao Guang<sup>2</sup> Qi Yan<sup>1</sup> Fang Tao<sup>1</sup> Zhang Ying<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)  
<sup>2</sup>Phoebus Vision Opto-Electronics Technology Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract** A compact and highly efficient green-light source is demonstrated based on periodically poled Mg:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) crystal. The MgO:LiNbO<sub>3</sub> samples of 1 mm thick, 6.95 μm domain period, uniform periodicity, near 50% duty cycle are fabricated by use of a high-voltage multi-pulse poling method. A maximum power of 3.8 W at 532 nm is obtained by a 6.8 W laser diode (LD) pumped, the PPMgLN length in Nd:YVO<sub>4</sub> intracavity is only 1 mm, and the corresponding optical to optical conversion efficiency is 56%.

**Key words** lasers; green laser; intracavity frequency-doubled; periodically poled; MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal

**OCIS codes** 140.0140; 190.0190; 160.0160

### 1 引 言

中小功率绿光在激光表演、激光显示、医疗等方面有广泛的应用, 尤其是近年来迅速发展的激光显示领域<sup>[1,2]</sup>。目前, 中小功率绿光的倍频常用的非线性晶体主要是磷酸钛氧钾(KTP)和三硼酸锂(LBO), 其中 KTP 晶体由于非线性系数大、价格低廉而占有很大的市场, 但为避免灰迹现象, 使用 KTP 的绿光激光器通常在 500 mW 以下。抗灰迹的 KTP 近年来已有商品化的产品, 但价格高昂。LBO 晶体的抗损伤阈值高, 但其生长周期长, 价格昂贵,

更适用于大功率绿光激光器中, 而且 LBO 晶体非线性系数小, 即使在中小功率中, 一般仍需要 10 mm 的长度以上, 造成激光器体积大<sup>[3,4]</sup>。近年来随着周期极化技术的成熟, 适用于绿光倍频的短周期的周期极化类晶体逐渐出现<sup>[5~7]</sup>, 尤其是周期极化掺镁铌酸锂(PPMgLN)晶体, 其光折变损伤阈值提高, 可以在室温下工作, 非线性系数比 LBO 大 20 倍, 通光长度短, 腔内倍频仅需要 1 mm 甚至更短即可以实现高效输出<sup>[8]</sup>, 更有利于实现绿光激光器的小型化, 而且目前常用的外加电场极化法采用半导

收稿日期: 2010-09-17; 收到修改稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701)资助课题。

作者简介: 颜博霞(1980—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事非线性晶体器件和固体激光器等方面的研究。

E-mail: yanboxia@aoe.ac.cn

体光刻技术制作,且重复性好,适合大规模工业化生产,成本可以降低到与 KTP 相当,甚至更低。然而,PPMgLN 的损伤阈值较低,可能仅适合应用于 10 W 以下的绿光输出。因此,未来 PPMgLN 有望在中小功率替代 KTP 和 LBO 晶体应用于工业化产品中。

近年来,很多文章报道了利用 PPMgLN 的单通连续腔外倍频的绿光<sup>[9,10]</sup>,特点是可以实现高效输出和高质量的光斑模式。Miller 等<sup>[11]</sup>报道过利用 53 mm 长的周期极化铌酸锂晶体(PPLN)获得了 42% 的单通连续转换效率。PPMgLN 波导倍频绿光也有很多报道<sup>[12]</sup>,但波导式的 PPMgLN 制作工艺复杂,价格昂贵,不适合应用于消费类工业产品中。因此,利用 PPMgLN 腔内倍频绿光成为目前激光显示应用绿光激光器的研究热点之一。本实验室之前已经报道过 1.5 W 的腔内倍频输出<sup>[13,14]</sup>,本文使用 1 mm 通光长度的 PPMgLN,在单管激光二极管(LD)抽运下,获得了 3.8 W 绿光输出,光-光转换效率达到 56%,实现了紧凑、高效的绿光激光器。

## 2 倍频晶体 PPMgLN 的制备

使用外加电场极化法制备 PPMgLN,利用 Sellmeier 方程可以计算出 PPMgLN 晶体 1064 nm 倍频的周期是 6.95  $\mu\text{m}$ (30  $^{\circ}\text{C}$ ),制备高品质的短周期的 PPMgLN 的难点是克服外加高压电场引起的畴壁扩展。长周期的晶体(15  $\mu\text{m}$  以上)在极化时存在自终止现象<sup>[15]</sup>,占空比控制相对容易,而短周期晶体在极化时不存在自终止现象,要精确地控制电压、极化时间的关系;另一个难点是低成本的 PPMgLN 要求极化大面积均匀,即成品率高。实验中主要采取了两种措施对极化工艺进行改进提高:1)精确地设计电极宽度,导致相应的畴合并情况变弱;2)在高温下进行极化,高温导致 PPMgLN 的矫顽场大幅下降<sup>[16]</sup>,在 170  $^{\circ}\text{C}$  下仅 1.4 kV,同时高温抑制了畴的横向扩张。基于这些改进,成功地制备了 1 mm 厚的高品质 6.95  $\mu\text{m}$  的 PPMgLN 晶体,成品率高达 95%。图 1 示出了 PPMgLN 晶体 +z 面经 HF 酸腐蚀后的图片,可以看出 +z 面的占空比约为 60%,接近最佳占空比 50%,且条纹边缘整齐。

## 3 激光实验和结果分析

腔内倍频绿光激光器的实验装置如图 2 所示,可以看出,此绿光激光器的结构非常简单,只包括单

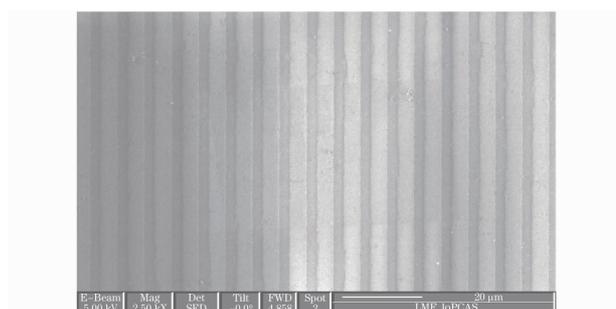


图 1 PPMgLN 晶体 +z 面周期畴结构显微图片, 周期 6.95  $\mu\text{m}$

Fig. 1 Surface morphology of the periodical domain structure with a period of 6.95  $\mu\text{m}$  on the PPMgLN crystal +z face

管 LD,激光晶体  $\text{Nd:YVO}_4$ , PPMgLN 和输出镜 4 个元件。这是因为 PPMgLN 非线性系数大和准相位匹配技术无走离的优点,对激光的功率密度要求低,因此 LD 到激光晶体无聚焦透镜,直接入射同样可以实现高效转换。激光晶体选择掺杂原子数分数 0.5% 的  $\alpha$ -切割  $\text{Nd:YVO}_4$ ,晶体尺寸 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  2 mm,前端面(靠近 LD)镀 808 nm 减反(AR)膜和 1064,532 nm 的高反(HR)膜,后端面镀 1064,532 nm AR 膜,PPMgLN 晶体尺寸 1 mm  $\times$  1 mm  $\times$  2 mm,双端面镀 1064,532 nm AR 膜,输出镜 M 为平面镜,前端面(靠近 PPMgLN)镀 1064 nm HR 膜和 532 nm AR 膜,后端面镀 532 nm AR 膜。LD,  $\text{Nd:YVO}_4$  使用 TEC 制冷片制冷,温度控制在 25  $^{\circ}\text{C}$ 。激光腔长通过优化设计,在短腔时获得最佳输出功率。

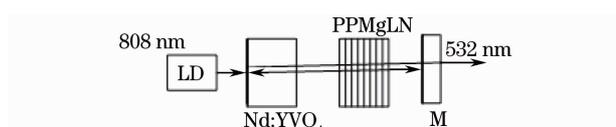


图 2  $\text{Nd:YVO}_4$ /PPMgLN 腔内倍频绿光 激光器实验装置图

Fig. 2 Configuration of the  $\text{Nd:YVO}_4$ /PPMgLN intracavity frequency-doubled green light source

根据谐振腔理论,利用 ABCD 矩阵分析了不同曲率输出镜的激光束腰半径,如图 3 所示,使用凹面镜时束腰半径比平面镜时小很多,虽然这样功率密度会高一些,但这里使用的倍频晶体 PPMgLN 的有效非线性系数大,准相位匹配无走离,所以大的束腰半径更有利于实现高效输出。通过输出镜  $R=50$  mm 的激光实验,在短腔情况下,输出功率明显低于平面镜输出功率,与理论分析相符。

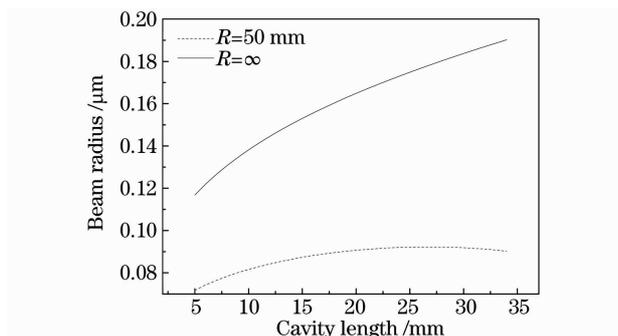


图 3 不同曲率输出镜下激光束腰半径随腔长的变化曲线

Fig. 3 Average beam radii in PPMgLN as a function of the cavity length with different curvatures

实验中,PPMgLN 的通光长度仅为 1 mm,其温度带宽很宽<sup>[4]</sup>,且周期 6.95 μm 的 PPMgLN 适用于 30 ℃左右,PPMgLN 简单地与 LD 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体置于同一热沉底座上,无需额外的制冷或加热控制,即可得到最佳的输出功率。图 4 示出了绿光连续输出的特性曲线。实验使用的单管 LD 抽运输出功率最高 6.8 W,此时得到最高的绿光输出功率 3.8 W,光-光转换效率达 56%。图 4 中 PPMgLN 倍频实验的出光阈值较高,这是平-平腔的特点决定的。另外,图 4 列出了使用 LBO 做倍频晶体的绿光输出特性(输出镜曲率半径 50 mm),在 LD 抽运功率 5.8 W 时,绿光输出 2.6 W,转换效率 45%。而且,PPMgLN 采用准相位匹配方式,无走离,获得的光斑模式好,圆斑,无变形。而在使用 LBO 的激光器中,如要获得如此好的光斑模式,则相应地要使用牺牲输出功率的手段来实现,从而降低了其电光效率。高光束质量的绿光激光器更利于在生物、医学等方面的应用。

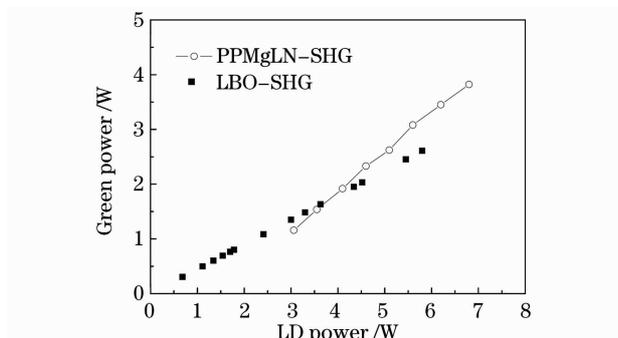


图 4 绿光连续输出特性曲线

Fig. 4 Green light output power as a function of pump LD power

同时,通过长期稳定性测试(1 个月的时间),功率稳定性为 2.5%,如图 5 所示,PPMgLN 未观察到

光折变损伤或损坏现象,这表明 PPMgLN 是适合的,此绿光激光器稳定、可靠。

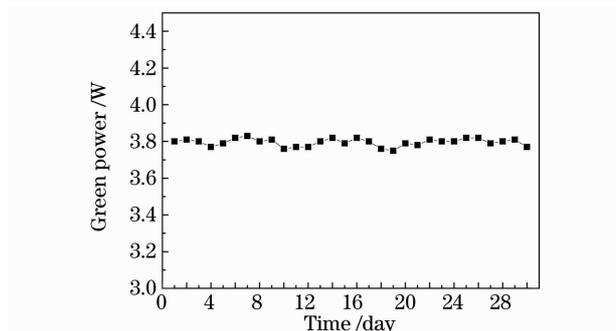


图 5 绿光激光器一个月的稳定性测试曲线

Fig. 5 Green output power versus work time in a month

激光器的整体体积为 10 mm × 15 mm × 30 mm,可见,使用平面输出镜、短腔结构的 Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN 腔内倍频绿光激光器,体积紧凑,效率高,非常符合典型应用——激光显示,如图 6 所示。



图 6 绿光激光器样机

Fig. 6 Picture of the green laser module

能够获得这么高的转换效率,原因主要有:1)经过极化工艺的改进,制备的 PPMgLN 质量好;2)正确的谐振腔设计,激光的光斑尺寸较大,利用 PPMgLN 非线性系数大的优点同样可以获得高效率的倍频转换输出。在以后的实验中,可以考虑将高反膜镀在 PPMgLN 上,将输出镜省略,使激光器的体积更加小巧、可靠。

## 4 结 论

成功制备了 1 mm 厚的高品质 PPMgLN 晶体,在单管 LD 抽运下,使用仅 1 mm 长的 PPMgLN,室温情况下,获得 3.8 W 的 532 nm 输出,光-光转换效率 56%。激光器的整体体积为 10 mm × 15 mm × 30 mm。PPMgLN 为倍频晶体的绿光激光器具有体积小、效率高和光斑模式好等优点,成为很有发展潜力的绿光光源。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Guang, Wang Bin, Fang Tao *et al.*. Laser digital cinema projector[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, **4**(3): 314~318
- 2 Wang Yanwei, Bi Yong, Wang Bin *et al.*. Large screen laser projection display and laser television[J]. *Physics*, 2010, **39**(4): 232~237  
王延伟, 毕 勇, 王 斌等. 超大屏幕激光投影与激光电视[J]. *物理*, 2010, **39**(4): 232~237
- 3 Ma Yi, Cui Lingling, Wang Weimin *et al.*. High average power and high beam quality intracavity frequency doubled green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 22~25  
马 毅, 崔玲玲, 王卫民等. 高功率高光束质量腔内倍频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 22~25
- 4 Li Fengqin, Yu Lin, Shen Yumei *et al.*. All-solid-state CW 12.9 W TEM<sub>00</sub> mode green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1332~1336  
李凤琴, 于 琳, 申玉梅等. 输出功率 12.9 W 的全固态连续 TEM<sub>00</sub>模绿光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1332~1336
- 5 Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. 2.1 W continuous wave green light output by first-order quasi-phase-matched intracavity second harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1314~1318  
纪 峰, 姚建铨, 张百钢等. 2.1 W 连续绿光输出的一阶准相位匹配腔内倍频[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1314~1318
- 6 Yu Jian, Ni Wenjun, Xue Ting *et al.*. Frequency doubled CW green light generation in periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 793~795  
于 建, 倪文俊, 薛 挺等. 周期极化 KTiOPO<sub>4</sub> 晶体连续倍频绿光输出[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 793~795
- 7 Hu Xiaopeng, Zhu Shining. Quasi-white light laser based on super-crystal-lattice [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 20  
胡小鹏, 祝世宁. 基于光学超晶格的准白光激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(2): 20
- 8 T. Yokoyama, K. Mizuuchi, K. Nakayama *et al.*. Compact intracavity green light source with wide operation temperature range using periodically poled Mg:LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(8): 6787~6789
- 9 N. Pavel, I. Shoji, T. Taira. Room-temperature, continuous-wave 1-W green power by single-pass frequency doubling in a bulk periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8): 830~832
- 10 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. 59 mW green light second harmonic generation of quasi-CW double-cladding fiber laser in periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 777~779  
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪等. 准连续双包层光纤激光在周期性极化铌酸锂晶体中倍频产生 59 mW 绿光[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 777~779
- 11 G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch *et al.*. 42%-efficient single-pass CW second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24): 1834~1836
- 12 Y. Hirano, S. Yamamoto, Y. Koyata. Highly efficient planar-waveguide green laser[C]. CLEO/QELS, 2008, CPDA3
- 13 Zhou Mi, Yan Boxia, Bao Guang *et al.*. 52% optical-to-optical conversion efficiency in a compact 1.5 W 532 nm second harmonic generation laser with intracavity periodically-poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(7): 1568~1571
- 14 Chu Shaowei, Zhang Ying, Wang Bin *et al.*. High efficiency intracavity continuous-wave green light generation by quasiphasematching in a bulk periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Advances in Optoelectronics*, 2008, 2008: 151487
- 15 K. Nakamura, J. Kurz, K. Parameswaran *et al.*. Periodic poling of magnesium-oxide-doped lithium niobate[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(7): 4528~4534
- 16 H. Ishizuki, I. Shoji, T. Taira. Periodical poling characteristics of congruent MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals at elevated temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(23): 4062~4064