

文章编号: 0258-702X(2002)02-0123-04

# 1.06 $\mu\text{m}$ 抽运的低阈值三共振准相位匹配 光学参量振荡器

张宽收, 李永民, 陈艳丽, 樊巧云, 谢常德, 彭堃堃

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

**提要** 在利用模清洁剂改善全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出激光质量的基础上, 利用准相位匹配(QPM)技术抽运三共振周期性极化铌酸锂晶体组成的光学参量振荡器(PPLN OPO), 在低至 1.5 mW 的阈值抽运功率下获得 2.1  $\mu\text{m}$  的近简并下转换光输出; 当抽运功率为 6 mW 时, 输出 0.9 mW 下转换光, 光-光转换效率为 15%。

**关键词** 准相位匹配, 低阈值, 三共振光学参量振荡器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Low Threshold Quasi-phase-matched Triply Resonant Optical Parametric Oscillator Pumped by 1.06 $\mu\text{m}$ Laser

ZHANG Kuan-shou, LI Yong-min, CHEN Yan-li,

FAN Qiao-yun, XIE Chang-de, PENG Kun-chi

(State Key Lab of Quantum Optics and Quantum Optical Devices, Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** An optimized all-solid-state single frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1.06  $\mu\text{m}$  with a mode-cleaner was used to pump a optical parametric oscillator consisting of periodically poled LiNbO<sub>3</sub>. The near degenerate subharmonic wave at 2.1  $\mu\text{m}$  wavelength was obtained under a pumped-threshold of 1.5 mW. The subharmonic output of 0.9 mW was produced at a pump power of 6 mW. The light to light conversion efficiency is 15%.

**Key words** quasi-phase-matched, low threshold, triply resonant optical parametric oscillator (TROPO)

## 1 引 言

连续光学参量振荡器(CW OPO)可以用来拓宽激光的波长范围, 具有较宽的调谐区域, 是一种理想的产生相干辐射的装置<sup>[1]</sup>, 在光谱学、相干光通讯、激光雷达等领域有着重要的应用前景。近年来, 随着全固化单频激光器技术的发展及高质量非线性晶体的出现, 使得低阈值、高转换效率、连续可调谐 OPO 技术有了长足发展<sup>[2]</sup>。特别是随着高质量准相位匹配(QPM)晶体的实用化, 进一步促进了 OPO 技术的发展。利用准相位匹配技术不仅可以利用非线

性晶体最大的有效非线性系数进行频率变换, 并且光束在晶体的整个长度内都可进行有效的参量相互作用, 而且扩展了频率变换的波长范围, 利用准相位匹配晶体构建的连续光学参量振荡器可进一步提高频率转换效率, 扩展波长调谐范围。由于许多化学气体在 2  $\mu\text{m}$  附近有强的吸收, 2  $\mu\text{m}$  激光可应用于微量化学气体的检测、环境保护与监测<sup>[3]</sup>。同时 2  $\mu\text{m}$  附近波长光对于人眼属于安全光, 被广泛应用于医学上<sup>[4]</sup>, 加之 1.06  $\mu\text{m}$  激光器已有众多成熟的商用产品, 因此, 如何利用准相位匹配晶体实现 2  $\mu\text{m}$  波段低阈值的 OPO 运转倍受人们关注。

收稿日期 2000-10-19; 收到修改稿日期 2001-01-02

基金项目 国家自然科学基金(No. 69938010), 山西省自然科学基金(No. 991034)和回国留学人员基金资助项目。

作者简介 张宽收(1965—)男, 山西大学光电研究所教授, 博士, 主要从事全固体化激光技术和量子光学研究。E-mail:

我们利用模清洁剂改善了全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出激光质量,利用其输出的 1.06 μm 激光抽运由周期性极化铌酸锂晶体组成的光学参量振荡器(PPLN OPO),在三共振条件下获得 2.1 μm 的近简并下转换光输出,阈值仅为 1.5mW;当抽运功率为 6 mW 时,得到 0.9 mW 下转换光输出,转换效率为 15%。装置系统全固化、小型化、高效率、运转稳定。实验中使用的 OPO 腔输出耦合镜透射率(99.2%)小于内腔损耗,只保证了低阈值运转,未达最高转换效率,适当提高输出耦合效率,可获得较大功率红外输出。

## 2 实验装置

三共振 PPLN OPO 实验装置如图 1 所示。

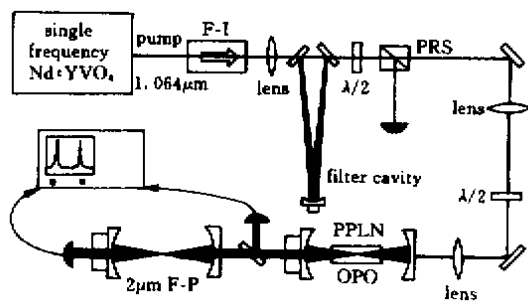


图 1 PPLN OPO 实验装置图

Fig.1 Experiment setup of PPLN OPO

采用自制的全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源,输出波长 1.06 μm,单频输出功率 500 mW。由于用激光二极管作为抽运源的全固化激光器的输出光束并非理想的高斯模式,在实验中将会影响抽运激光与 OPO 的模式匹配<sup>[5]</sup>,而且激光在低频段存在高的弛豫振荡噪声,在非经典光场产生实验中导致光场压缩度减小。为此我们设计了一个三环环形窄带 F-P 腔构成模清洁剂以改善激光的光束质量<sup>[6]</sup>,得到近理想的高斯光束,并且将激光强度噪声由模清洁剂前 30 MHz 处达到散粒噪声极限改善为在模清洁剂后 7 MHz 处即达到散粒噪声极限。

OPO 腔为由两个曲率均为 30 mm 的曲面镜构成的线性驻波腔。输入耦合镜对抽运光(1.06 μm)的反射率为 87%,对下转换光(2~2.2 μm)的反射率均为 99.8%,输出耦合镜对抽运光的反射率为 99.8%,对下转换光的反射率为 99.2%。为了得到比较小的腰斑,提高转换效率,降低阈值抽运功率,OPO 腔型采用近共心结构,有效腔长 55 mm。理论

计算表明,在此腔型结构中抽运光和信号光的腰斑分别为 50 μm,70 μm。所用的 PPLN 晶体尺寸为 0.5 mm×10 mm×20 mm,PPLN 晶体采用 I 类相位匹配( $e - e + e$ ),共有 15 个光学通道,极化周期分别为从 28.2 μm 到 31 μm。晶体两端镀以对 1.06 μm,2.1 μm 减反膜,剩余反射率均小于 0.6%。在实验中实测的 OPO 对抽运光的精细度为 35,对下转换光(2.1 μm)的精细度为 450。由于三共振 OPO 对于外界的扰动非常敏感,所以我们将整个腔固定在一块殷钢板上,并用有机玻璃罩密封起来,以隔绝外界的扰动,使得 OPO 可以稳定运转。

## 3 运转特性

实验中采用极化周期为 31 μm 的通道,将晶体置于晶体控温炉中,自制的控温仪精度为 0.01℃,以精确控制晶体的温度使之达到最佳相位匹配。采用焦距为 500 mm 和 40 mm 的透镜进行抽运激光和 OPO 的模式匹配,图 2 是当晶体中参量光没有达到相位匹配时,扫描 OPO 时抽运光的透射曲线,模式匹配优于 95%。

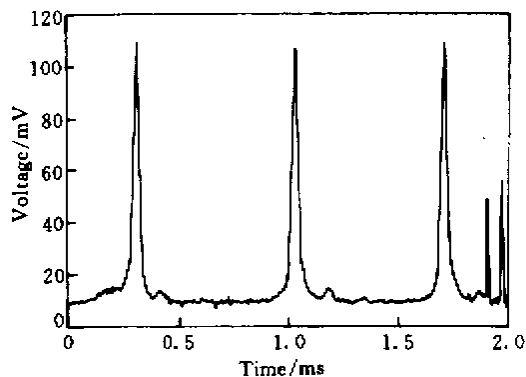


图 2 当没有下转换光产生时,扫描腔长得到的抽运光的透射曲线

Fig.2 Transmitted pump light as the cavity length is scanned and no down conversion light is generated

当把晶体加热至 176℃ 时,晶体中参量光满足相位匹配条件,产生近简并的参量下转换光(2.1 μm)图 3 中 a 是扫描 OPO 时下转换光的透射曲线。可以看到扫描时的下转换光并非一个单模,而是由许多模式组成的。这是由于簇效应引起的:当腔长被扫描时,输出光的频率随着腔的共振频率而改变(只要频率位于腔镜的带宽之内,并且相位失配不严重)而且共振腔长是一系列分立的值<sup>[7]</sup>,利用这一

特性通过腔长就可以对输出光频率进行调谐,而要获得单模运转就必须将腔长锁定在某一下转换共振频率上,一般情况下,要求锁定后腔长扰动小于 100 pm,抽运频率扰动小于 1 MHz<sup>[7]</sup>。图 3 中 *b* 是同时监视的抽运光的透射曲线,可以明显地观察到抽运光的抽空。图 4 是当调节晶体温度使下转换光接近完全简并时扫描 OPO 下转换光 *a* 和 *b* 抽运光的透射曲线,曲线右侧陡峭处为下转换光完全简并点。

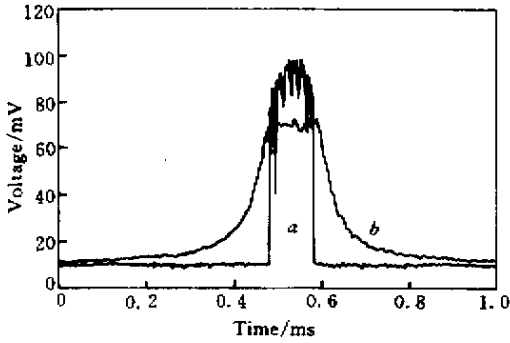


图 3 当腔长被扫描时,得到的下转换光(*a*)和抽运光(*b*)的透射曲线

Fig.3 Transmitted down conversion light *a* and pump light *b* as the cavity length is scanned

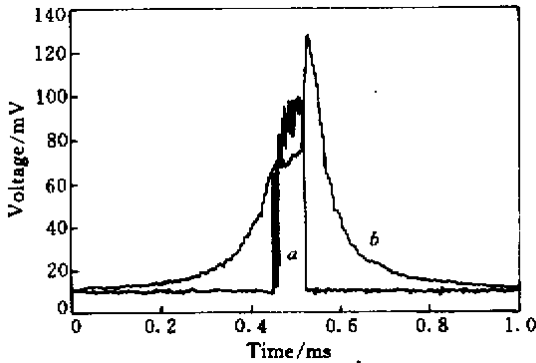


图 4 当腔长被扫描时,得到的下转换光(*a*)和抽运光(*b*)的透射曲线,下转换光右侧陡峭处为完全简并点

Fig.4 Transmitted down conversion light *a* and pump light *b* as the cavity length is scanned. The sharp peak of down conversion light was observed at the degenerated point

实验中通过扫描 OPO 测出其阈值抽运功率,实测最小阈值抽运功率为 1.5 mW。作为比较,用全固化单频激光器输出的激光(没有经过模式清洁剂改善光束质量)抽运 PPLN OPO,实测最小阈值抽运功率为 10 mW,由此可见抽运光的横模质量将直接影响 OPO 的运转条件。

实验中以 9 kHz 正弦信号调制 OPO 腔长,利用锁相技术与信号光的光强获得误差信号,经高压放大器放大后驱动 OPO 腔的压电陶瓷,将 OPO 的共振频率锁定到一对下转换光的透射峰上,同时,调节晶体温度使抽运光的失谐为零,两者相结合,实现了三模共振,稳定运转时间达 10 min。图 5 是锁定 OPO 腔后,输出光功率随抽运光功率的变化曲线,所用的计算公式为<sup>[8]</sup>

$$P^{out} = P^{out}_{idler} + P^{out}_{signal} = 4 \frac{T_s}{T_s + V_s} \frac{T_p}{T_p + V_p} P_{threshold} \left( \sqrt{\frac{P_{pump}}{P_{threshold}}} - 1 \right)$$

其中,  $T_s, T_p$  分别为信号光、抽运光的输出耦合镜透射率;  $V_s, V_p$  为内腔损耗。实验中发现,当抽运功率为阈值功率 4 倍时,转换效率达 15%。理论计算与实验结果基本一致。由于我们希望 OPO 在低阈值运转,以便利用同一装置获得非经典光场,故输出耦合镜的透射率小于内腔损耗,限制了输出效率。所以这套装置保证了低阈值运转的特点,但未达最高转换效率。

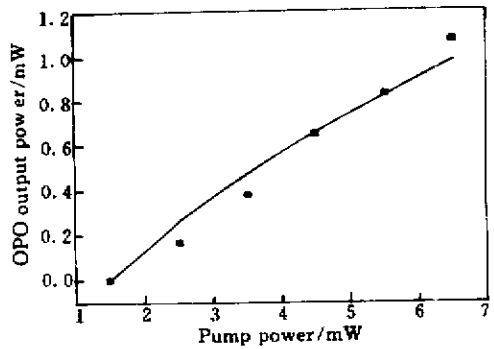


图 5 OPO 的输出功率随抽运功率的变化曲线

■ 实验结果; — 理论计算值

Fig.5 OPO output power versus the pump power

■ : experimental results; — : theory curve

### 4 结 论

利用模清洁剂改善全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出激光质量,抽运三共振 PPLN OPO,获得 2.1 μm 的近简并下转换光输出,阈值仅为 1.5 mW;当抽运功率为阈值功率的 4 倍时,得到 0.9 mW 下转换光输出,转换效率为 15%。实现了 2 μm 连续准相位 OPO 超低阈值运转,可应用于微量化学气体的检测、医学、环境保护与监测。若提高输出镜对 2.1 μm 光波的透射率,采用同一设计可获得更高功率的下转换光输出。同双共振 OPO 相比,三共振 OPO 显著降

低了阈值,可应用于需要低阈值的场合;同时,它要求抽运光也同时共振,条件比双共振更为苛刻,稳定性较差。

### 参 考 文 献

- 1 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**( 11 ): 2102 ~ 2115
- 2 D. Lee, N. C. Wong. Stabilization and tuning of a doubly resonant optical parametric oscillator[ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**( 9 ):1659 ~ 1667
- 3 Radu M. Mihalcea, Douglas S. Baer, Ronald K. Hanson. Diode-laser absorption measurements of CO<sub>2</sub> near 2.0 μm at elevated temperatures [ J ]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**( 36 ):8341 ~ 8347
- 4 Didier Bruneau, Stephane Delmonte, Jacques Pelon. Modeling

- of Tm, Ho: YAG and Tm, Ho: YLF 2-μm lasers and calculation of extractable energies [ J ]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**( 36 ):8406 ~ 8419
- 5 B. Willke, N. Uehara, E. K. Gustafson *et al.*. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd: YAG laser with a Fabry-Perot Ring-cavity premode cleaner [ J ]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**( 21 ): 1704 ~ 1706
- 6 Chen Yanli, Zhang Jin, Li Yongmin *et al.*. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd: YVO<sub>4</sub> laser using mode cleaner [ J ]. *Chinese J. Laser* ( 中国激光 ), 2001, **A28**( 3 ): 197 ~ 200 ( in Chinese )
- 7 A. J. Henderson, M. J. Padgett, F. G. Colville *et al.*. Doubly-resonant optical parametric oscillators: tuning behaviour and stability requirements [ J ]. *Opt. Comm.*, 1995, **119**( 1, 2 ) 256 ~ 264
- 8 S. Schiller, K. Schneider, J. Mlynek. Theory of an optical parametric oscillator with resonant pump and signal [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**( 9 ):1512 ~ 1524

## II 折叠光学谐振腔 600 W CO<sub>2</sub> 激光器的研制

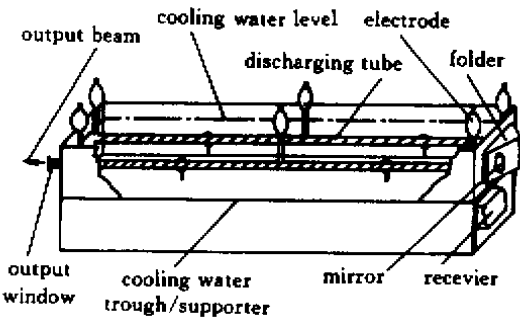
管式直流放电 CO<sub>2</sub> 激光器具有光束质量好,输出稳定,无噪声,成本低及运转费用低等优点,特别适宜输出数百瓦功率水平的工业用激光器;但只有使其结构紧凑,实现小型化,才能具有实用性和生命力。为此,本文作者成功研制了一台 II 折叠光学谐振腔,采用槽式水冷结构的器件,腔体部分外形尺寸为长 5300 mm × 宽 300 mm × 高 350 mm,获得 600 W 的稳定输出功率。

放电管及真空排气台连接。

由平行平面镀膜砷化钾片与镀金端面全反射镜构成平凹稳定腔,由两块镀金全反射镜装夹在转折镜座上实现光路的 II 转折,其中一片为平面镜,另一片为凹球镜,用以消除放电气体的类透镜效应。与传统结构相比,由于放电管外周没有同轴的水冷套管而避免了多层套管带来的腔体变形。该水冷却槽同时又兼作激光谐振腔的支撑底座,在相对稳定的水温下完全可以避免环境对系统热稳定性的影响而免除了谐振腔精度失调及导致输出光束功率的不稳定性。

研制结果表明该 II 折叠腔器件的结构设计简单合理,克服了原先管式放电管器件放电管冷却不充分,系统稳定性欠佳及不够紧凑的缺点,在一定程度上使管式放电 CO<sub>2</sub> 激光器向实用化方向迈进了一步。

致谢 该激光器的研制曾得到中国科学院上海光学精密机械研究所王之江院士的指导,在此特致谢意。



谐振腔的主体支撑为一根长 5 m,宽 0.3 m 的工字钢加工而成,其上部为冷却水槽,其内部水平安装两根 GG17 料的放电管。槽外一端为输出窗口和端面全反镜,另一端为 II 转折镜座(不锈钢加工而成)转折镜座上两相互垂直并分别与两放电管轴线呈 45°夹角的平面上机械封装有两块转折镀金全反射镜;由此,放电管可获得最大限度的热交换面积和粒子数反转效果。工字钢下面,吊装一根长 5 m,φ 120 mm 的无缝钢管制作的储气套,通过细玻管与

上海交通大学激光与材料加工

实验室,上海 200030

丁健君,吴腾飞,吴鲁海,瞿 丰

昆明理工大学材料科学与工程学院,昆明 650093

王 敏

收稿日期 2001-07-16;

收到修改稿日期 2001-10-24