

文章编号:1001-5078(2003)05-0343-03

高光束质量人眼安全 OPO 激光器

保爽熒, 巩马理, 陈 刚, 柳 强, 邹姗姗

(清华大学 精密仪器系数字光电与激光技术实验室, 北京 100084)

摘 要:将固体激光中用以提高光束质量的高斯型变反射率虚共焦非稳腔技术应用于 OPO, 在理论上分析高斯型变反射率非稳腔的模式分布, 实验上采用 $1.064\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, OPO 为单谐振非临界相位匹配方式, 得到 $1.57\mu\text{m}$ OPO 输出能量 60mJ/pluse , 重复频率 1Hz , M^2 小于 3, 光光效率 40% 的人眼安全激光。

关键词:变反射率镜; 高光束质量; 光参量振荡器; 人眼安全激光

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

High Beam Quality Eye-safe Optical Parametric Oscillator

BAO Shi-yi, GONG Ma-li, CHEN Gang, LIU Qiang, ZOU Shan-shan

(Digital Photonic Engineering Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We adopted the technology of virtual confocal unstable resonator with Gaussian-reflectivity mirrors which was used to improve the brightness of output beam from solid-state laser to improve the beam quality of OPO. Eigen mode-fields of virtual confocal unstable resonator with Gaussian-reflectivity mirrors was calculated. The pump laser is $1.064\mu\text{m}$ Nd:YAG laser and non-critically phase-matched KTP-OPO acted as a single resonator for the signal wave. The highest output single of 60mJ/pluse at 1Hz is obtained with $M^2 < 3$ and conversion efficiency up to 40%.

Key words: varied reflectivity mirrors; high beam quality; optical parametric oscillators; eye-safe laser

1 引 言

OPO (Optical Parametric Oscillator) 是一种可以获得高相干、波长可以大范围调谐的激光技术^[1,2]。采用 $1.064\mu\text{m}$ 波长抽运非临界相位匹配 KTP-OPO, 可以得到满足激光测距、环境检测、激光雷达等实际应用要求的 $1.57\mu\text{m}$ 人眼安全激光^[3]。

光参量振荡器一直存在光束质量差的弱点, 这在很大程度上限制了 OPO 技术的应用。Mark S. Bowers^[4] 等人在理论上预言采用非稳腔结构的 KTA-OPO, 可以有效地提高 OPO 的输出光束质量; Suresh^[5] 等人在 BBO-OPO 试验中, 采用了非稳腔 GRM (Gradient Reflectivity Mirror) 技术, 得到远场发散角小于 2mrad 的信号光输出。

在本实验中, 我们采用 $1.064\mu\text{m}$ 泵浦光抽运非临界相位匹配 (NCPM) 的 KTP-OPO 谐振腔采用

带高斯型变反射率输出镜的虚共焦非稳腔, 得到输出能量大于 60mJ/pluse , 重复频率 1Hz , 中心波长 $1.57\mu\text{m}$, 衍射极限因子 M^2 小于 3, 光光转换效率 40% 的信号光输出。

2 高斯型变反射率输出镜非稳腔模型

相对于稳定谐振腔, 非稳腔由于可以提供较大的模体积、实现可控的衍射耦合输出、提供较大的横模损耗间距等优点, 被高功率大能量固体激光器所采用^[6]。在实际中最有意义的非稳腔是腔本身能够实现准直输出的共焦非稳腔, 其中包括 $g_1 g_2 > 1$ 正共焦非稳腔和 $g_1 g_2 < 0$ 负共焦非稳腔。但是由于

作者简介: 保爽熒 (1978—), 男, 回族, 清华大学精密仪器与机械学系数字光电与激光技术实验室, 硕士研究生, 主要研究方向为: 高亮度光参量振荡器。

收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-04-30

非稳腔反射镜边缘存在的衍射效应,致使非稳腔产生的环状输出光束包含了比较明显的衍射环,其中心还会出现一些热斑。在 1965 年,Vakhimov 等人就发现径向反射率可变输出镜,能提高模场分布和相位分布,提高选模的能力,实现非稳腔的光滑输出,目前这两种技术已经被广泛的应用于高能量固体激光器^[7],并且得到了近衍射极限的光束输出。

分析谐振腔内本征模式的传统方法主要有经典衍射积分和矩阵光学方法,Collins^[8]公式将标量衍射理论和矩阵光学联系起来,用 Collins 公式表示变换矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统的惠更斯-菲涅尔衍射积分方程为:

$$E_2(r_2,\varphi_2)=-\frac{ik\exp(ikL)}{2\pi B}\iint E_1(r_1,\varphi_1)\exp\left\{\frac{ik}{2B}[Ar_1^2+Dr_2^2-2r_1r_2\cos(\varphi_1-\varphi_2)]\right\}r_1dr_1d\varphi_1$$

(1)

其中 $E_1(r_1,\varphi_1)$ 和 $E_2(r_2,\varphi_2)$ 分别是入射光场和衍射光场, $k=2\pi/\lambda$ 。本文采用凌东雄^[9]老师提出谐振腔本征模式分析方法,从柱坐标柯林斯公式出发,参考如图 1 所示的谐振腔结构,将导出的衍射积分方程转化为有限和矩阵方程,通过求变换矩阵的本征向量和本征值,可以获得谐振腔中存在的本征模场分布。将参考平面上的本征模场乘以高斯型变反射率输出镜的透过率 $T(r_1)=1-H\exp(-2\frac{r^2}{\omega^2})$,就可以得到输出光场的近场分布。

图 2(a)所示是计算得到的高斯型反射率非稳腔腔内本征模式的分布。由于变反射率腔镜的采用,增大了各阶模式之间的差异,大大增强了腔的选模能力,可以得到如图所示的单模模振荡。图 2(b)是高斯型变反射率谐振腔输出的近场分布。从图中可以看出,近场光斑的中心存在一个明显的凹陷,理论计算的结果与我们实验中测量到的近场光斑分布(图 4)十分相近。

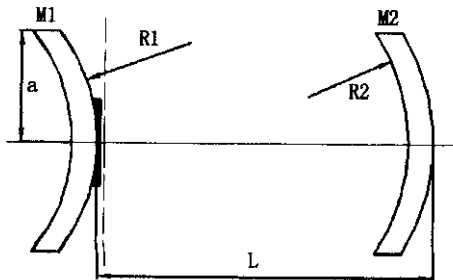


图 1 高斯型变反射率非稳腔示意图

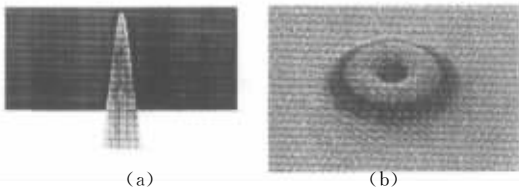


图 2 高斯型变反射率非稳谐振腔腔内本征模和输出模场分布

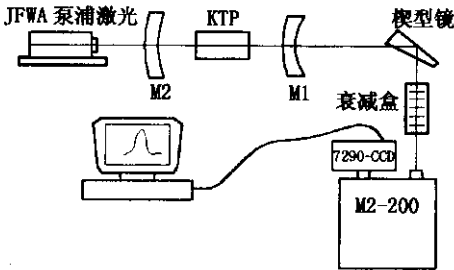


图 3 1.064 μm 抽运 KTP—OPO 实现人眼安全输出的实验与测量装置

3 实验及结果

1.064 μm 抽运非临界相位匹配 KTP 光参量振荡器的实验与测量装置如图 3 所示,采用外腔抽运 OPO,单谐振方式工作。抽运源选用华北光电技术研究所生产的 JFWA 型固体激光器,抽运波长 1.064 μm ,重复频率 1Hz,实验中使用到最大抽运能量 150mJ/pluse。

OPO 的谐振腔采用带高斯型变反射率输出镜的非稳腔,结构如图 3 所示。M₁ 和 M₂ 构成 OPO 激光谐振腔,输出镜 M₁ 对 1.064 μm 全反,对 1.57 μm 变反射率;输入镜 M₂ 对 1.064 μm 高透对 1.57 μm 全反。采用的 KTP 晶体尺寸为 5×5×20mm(由山东大学晶体材料研究所提供),采用 x 轴切割, $\theta=90^\circ,\varphi=0^\circ$,以非临界相位匹配方式进行工作。KTP 晶体两端镀 1.064 μm 和 1.57 μm 双波长增透膜。根据山东大学提供的 KTP 晶体折射率 Sellmeier 方程,计算出 1.064 μm 抽运 x 切割 KTP OPO 信号光中心波长为 1.57 μm ,空闲光波长为 3.3 μm 。

表 1 OPO 抽运光和信号光的光束参数

	M _x ²	M _y ²	θ_x/mrad	θ_y/mrad	w _{ox} /mm	w _{oy} /mm
Pump	2.29	3.70	1.780	2.169	1.744	2.309
Signal	2.12	2.97	3.067	3.473	1.384	1.709

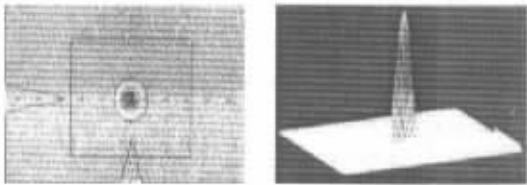


图 4 泵浦光光斑

采用 M^2-200 和 LBA-PC 激光光束分析仪测量 $1.064\mu\text{m}$ 抽运光和 OPO 输出的 $1.57\mu\text{m}$ 信号光的光束直径、远场发散角、束腰位置等,衍射极限因子 M^2 因为综合了光束直径和远场发散角,对光束质量提供了相对客观的评价标准,所以我们实验重点采用 M^2 来评价光束质量。光斑图像采集采用 7290A 红外 CCD。

由于 OPO 的输出状态受泵浦光影响很大,所以实验中首先对泵浦光的光束参数进行了测量,测量到的泵浦光和信号光的光束参数见表 1。从表中我们可以发现采用带高斯型变反射率输出镜的非稳腔结构的 OPO,输出信号光的光束衍射因子 M^2 相对于泵浦光有所改善,主要是输出镜对腔内光束进行空间整形限模的效果。

图 4 为 CCD 采样到的 $1.064\mu\text{m}$ 抽运光二维和三维分布,从图中可以看出泵浦光在 X 和 Y 两个方向存在一定的不对称性,但总体上呈现较好的高斯基模分布。

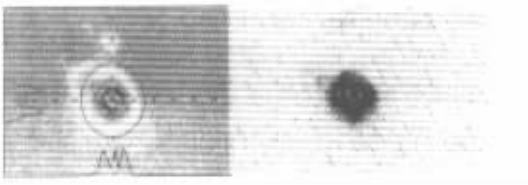


图 5 KTP-OPO 输出信号光近场分布

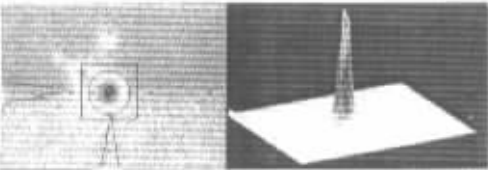


图 6 KTP-OPO 输出信号光远场分布

图 5 和图 6 分别为 CCD 采样到的 KTP-OPO 输出 $1.57\mu\text{m}$ 信号光近场和远场的二维和三维分布。从近场分布可以明显的看出经过高斯变反射率腔镜调制后的光斑,在中心有明显的凹陷,这与我们前面理论计算的结果十分相近。而远场光斑是一个相对标准的高斯分布。

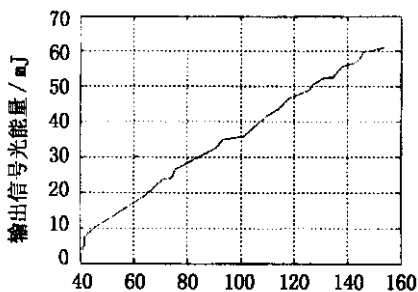


图 7 KTP-OPO 输出能量与抽运能量的关系

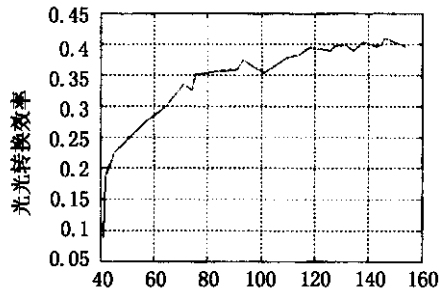


图 8 KTP-OPO 转换效率与抽运能量的关系

用 EPM2000 能量计(探头 J50HR)测定 KTP-OPO 抽运能量与 OPO 输出能量和转换效率之间的关系分别如图 7、图 8 所示。试验中获得的 OPO 最高输出能量 60mJ , 光光转换效率大于 40% 。

4 结 论

在实验中,用 $1.064\mu\text{m}$ 抽运非临界相位匹配的 KTP,OPO 谐振腔采用带高斯型变反射率输出镜的虚共焦非稳定谐振腔结构,获得了 M^2 小于 3 的人眼安全激光的输出,光斑场分布与理论计算的结果相符,从而说明采用带高斯型变反射率输出镜的非稳腔结构,可以有效的提高和改善光参量振荡器输出光束质量,是未来实现高亮度光参量振荡器有效的方案之一。

参考文献:

- [1] L R Marshall, et al. Efficient multiwatt 2-5 μm tunable sources[Z]. CLEO-Technical Digest, 1996, P368-369.
- [2] B Vezin, et al. Tunable no-tracking OPO-OPA tandem in the near-infrared pumped by a Ti sapphire laser[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1996, 63(2): 199-201.
- [3] L R Marshall, A Kaz. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1993, 10(9): 1730-1736.
- [4] Mark S Bowers, Margaret K Brown, et al. High brightness output from optical parametric oscillators using unstable resonators[A]. Conference Proceedings-Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-CLEO VII 1997: 455-456.
- [5] S Chandra, et al. Improved OPO brightness with a GRM non-confocal unstable resonator[Z]. Advanced solid-state Lasers, 1996, 177-178.
- [6] N Hodgson, H Weber. High-power solid-state lasers with unstable resonators[J]. Opt. and Quan. Ele., 1990, 22: 39-55.
- [7] M Morin, Graded reflectivity mirror unstable laser resonators[J]. Opt. and Quan. Ele., 1997, 29: 819-866.
- [8] S A Collins. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[Z]. J. Opt. Soc. Am. A, 1970, 60(9): 1168-1177.
- [9] 凌东雄, 伏云昌, 等. 高斯型变反射率圆镜平凹腔本征模场的矩阵分析[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 25-28.