

文章编号: 0258-7025(2004)12-1417-04

双镜环行行波激光器

许闹帷, 霍玉晶, 何淑芳

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 提出了一种全新的固态双镜立体环行行波激光器。此类激光器的谐振腔仅由两面反射镜组成, 其中一面反射镜直接镀制在激光介质上, 激光束在腔内沿立体环形光路行进, 形成闭合谐振回路。利用 Nd:YAG 作为工作介质和双凹稳定谐振腔型, 实现了用激光二极管(LD)抽运的多种双镜环行行波激光的稳定运转。实验结果表明此类激光器具有结构简单、调整容易、稳定性好的优点, 并可望通过多点纵向抽运实现热效应低的高效率、高光束质量、大功率全固态激光器, 单向输出的基频光和/或倍频光的单频激光器, 以及高重复频率、短腔长的锁模激光器。

关键词 激光技术; 固体激光器; 行波; 双镜腔; 环行

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Solid-State Round Traveling-Wave Laser with Two Mirrors

XU Wei-wei, HUO Yu-jing, HE Shu-fang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In this paper a completely new type of solid-state round traveling-wave laser is presented. A Nd:YAG crystal is used as gain medium. Its resonator consists of only two concave mirrors (one of them is directly coated on the laser crystal surface), between which laser beam travels along a closed 3-dimensional loop. Steady oscillation of many kinds of round traveling-wave lasers has been observed. The laser experiment results indicated that the novel laser has simple structure and stable output. Based on the new structure of the new type of solid-state lasers, high-power high-efficient lasers with high beam quality can be developed by end-pumping at multi-points on the laser crystal. High-efficient single-frequency laser and mode-locked laser with short cavity length can also be developed by means of suitable design.

Key words laser technique; solid-state laser; traveling-wave; two-mirror cavity; round travel

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光激光器由于其具有波长短、光子能量高、在水中传输距离远和人眼敏感等优点, 在激光医学、信息存储、彩色打印、彩色投影电视、水下通信、光谱技术、激光技术、机场导航、探潜海底形貌探测和激光武器等科学研究、国防建设和国民经济的许多领域中有重要的应用, 因而成为各国研究的重点。它们的功率高、光束质量好、能量转换效率高、体积小、寿命长及使用方便, 因而是其他种类的绿光激光器的有力竞争

者^[1~4]。但这类激光器件中有一个倍受人们关注的“绿光噪声问题”^[5], 表现为输出激光强度随时间发生大幅度无规波动, 使其应用受到限制。解决“绿光噪声问题”的方法之一是使激光器单纵模运转。这种单频激光器可以通过采用环形谐振腔与光二极管的组合实现^[2]。但这种单频激光器通常使用多面独立的反射镜, 从而结构复杂, 工作不稳定, 且价格居高不下。其次, 在现有的超快光学等领域中有重要应用的锁模激光器中, 由于调制器的频率最高仅为百兆赫量级, 必须使用很长的激光谐振腔, 从而使这类激光器的尺寸太大, 工作不稳定, 使用不方便。再

收稿日期: 2003-12-16; 收到修改稿日期: 2004-08-16

基金项目: 北京市自然科学基金(4822011)和清华大学基础研究基金(200110001)资助项目。

作者简介: 许闹帷(1979—), 女, 清华大学电子工程系硕士研究生, 主要从事全固态激光器及其应用的研究。E-mail: xuweiwei00@mails.tsinghua.edu.cn

有,LD 纵向抽运全固态激光器有很高的效率和很好的光束质量,但其输出功率受到热透镜效应等因素的限制,因此只能用于制作成中小功率激光器。上述激光器的这些缺点主要是它们使用多镜谐振腔、长谐振腔和单点抽运的结果^[6]。

为了克服上述激光器的缺点,本文提出全新的双镜环行行波激光器。它的谐振腔仅由两面反射镜组成,结构简单;采用 LD 进行纵向抽运。

2 谐振腔设计

在所有的立体闭合回路中,8 字型回路最为简单,如图 1 所示。根据几何知识,可以得到以下的关系式

$$L = 2R - \sqrt{R^2 - d^2} \quad (1)$$

其中 L 为两镜间距离, R 为镜面的曲率半径, d 为 8 字形的半宽度。

现在考虑正 n 棱柱型的立体光路情况。其底面为两镜面的内接正 n 边形,光线沿对角线行走,以 n 次反射为一个周期。下面以 6 次反射为例说明。如图 2 所示,正六面柱的两个底面是内接于谐振腔两个球面镜的正六边形,光线沿面对角线行走,经过 6 次反射形成闭合回路。

根据规律计算得到了一个“腔长”(两镜间距离)的理论通用公式

$$L = 2 \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \cdot \sin^2 \frac{180^\circ}{n} + 2(R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}) \quad (2)$$

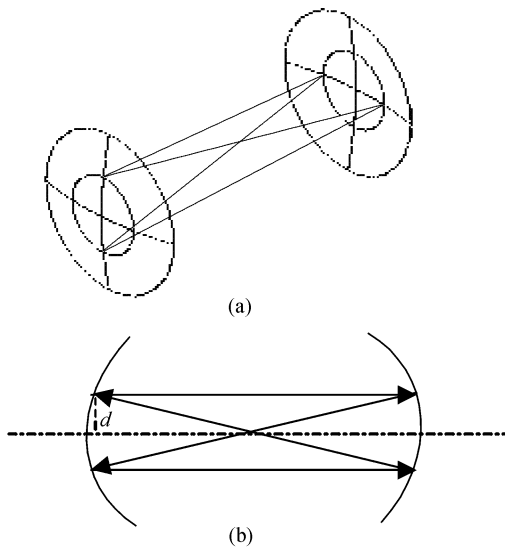


图 1 立体 8 字形振荡示意图(a)和侧视图(b)
Fig. 1 Schematic diagram of the 8-figure loop (a) and its side-view (b)

其中 x, y 为初始点在镜面上的坐标; n 为形成一次闭合回路振荡的反射次数^[4]。由(2)式可求出经镜面上任一点经过 n 次反射形成的立体环行行波的腔长。

将理论值与计算机模拟结果进行比较(表 1),验证了模型的正确性。

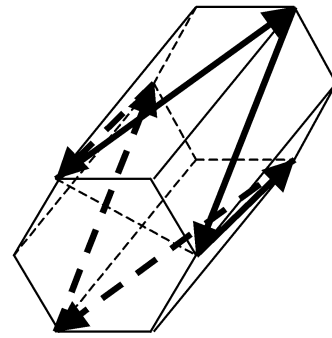


图 2 6 次反射模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of 6 times reflection loop

表 1 腔长理论计算值和模拟值
Table 1 Theoretical and simulation results of cavity length

Loop	Theoretical value /mm	Simulation value /mm
4 times reflection loop	100.7226	100.5354
6 times reflection loop	51.0840	50.8870
8 times reflection loop	30.3500	30.5228

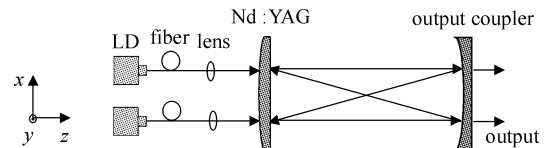


图 3 双镜环行行波激光器实验装置简图
Fig. 3 Setup of traveling-wave laser with two concave mirrors

3 实验结果

实验装置图如图 3 所示。用两个光纤耦合的 LD 作为抽运源,每只的最大输出功率为 1.4 W,用控温仪控制 LD 的温度,使其工作波长为 808.5 nm;采用纵向抽运的方式。用 HH 型高稳定半导体激光器驱动器(清华大学研制)为 LD 提供稳定的电流,并进行温度控制;用 3 mm 厚, Nd^{3+} 浓度为 1 at.-% 的 Nd:YAG 作为增益介质。把激光晶体放在抽运端,可大大提高激光效率。采用双凹形谐振腔,并把一面介质膜反射镜直接镀制在 Nd:YAG 晶体

的一个端面上,其曲率半径为 100 mm;此反射镜对抽运光是高透射的 ($T > 95\%$),对 $1.064 \mu\text{m}$ 振荡激光是全反射的 ($R > 99.8\%$),同时对 $0.532 \mu\text{m}$ 倍频光是高反射的 ($R > 98\%$)。Nd:YAG 晶体的另一个通光表面上镀有同时对 $1.064 \mu\text{m}$ 基频光和 $0.532 \mu\text{m}$ 倍频光都是高透射(剩余反射率 $R < 0.5\%$)的增透膜。输出耦合镜是对 $1.064 \mu\text{m}$ 基频光的反射率高于 99.8% ,对 $0.532 \mu\text{m}$ 倍频光是高透射 ($T > 95\%$)的介质膜反射镜。

用红外相机拍摄在激光输出端的输出激光束光强分布,结果如图 4~6 所示。



图 4 平面 8 字形激光振荡的输出光强分布

Fig. 4 Output of 8-figure loop

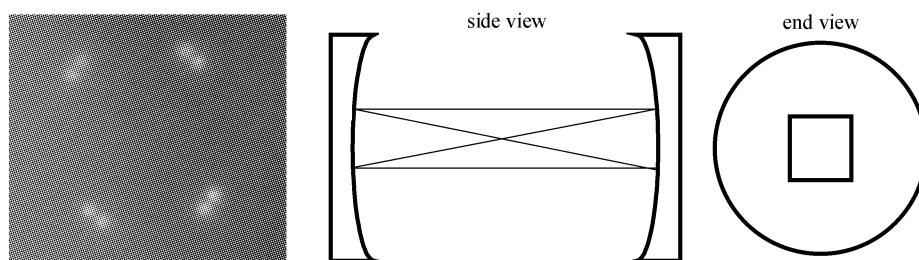


图 5 4 次反射激光振荡实验示意图

Fig. 5 Output of 4 times reflection loop

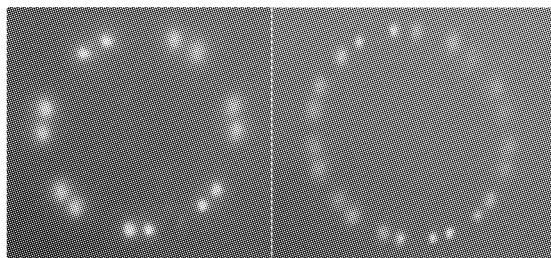


图 6 7, 11 次反射激光振荡实验结果图

Fig. 6 Output of 7, 11 times reflection loop

对平面 8 字形振荡回路的激光器,其单点抽运的阈值功率为 240 mW,腔内振荡模式 TEM_{00} 模,光斑直径 0.3 mm,发散角 1.2 mrad,用 F-P 腔测单线宽度为 40 MHz(受仪器分辨率限制)。采用 1 个抽运功率为 1.4 W 的 LD 抽运时,输出 $1.064 \mu\text{m}$ 激光功率为 110 mW;当采用 2 个抽运功率为 1.4 W 的 LD 分别在激光介质上的两个不同反射点进行抽运时,输出功率增加到 360 mW。可以看出,两点抽运使输出功率显著提高。对谐振腔进行优化可使输出功率进一步提高。由于此类激光器可以在很多点同时进行纵向抽运,因此可以预计有更高的输出功率和转换效率。

实验发现,调整谐振腔还可以获得其他不同的环行行波激光振荡;随着反射次数的增加,阈值功率也

在增加。其原因是由于反射次数增加,腔内由于衍射和在镜面上的反射和散射引起的损耗也增加,从而导致阈值抽运功率增加。对于多次反射的振荡模式,虽然损耗有一定增加,但是反射次数越多,可以加入的抽运 LD 个数也越多,使净增益变大,因而可以达到更高的输出功率和转换效率。图 5 和 6 是部分实验结果。

4 结 论

本文提出并实现了一种新型的双镜环行行波激光器,实现了 LD 抽运的多种双镜环行行波激光振荡,并进行了多点抽运的实验和初步的理论分析。它采用镀制在激光晶体上的反射镜作为谐振腔的一个腔镜,所产生的激光束在腔内往返多次形成闭合回路,从而可以方便地在激光材料的多个不同反射点同时进行抽运,减弱热透镜效应,进而得到高的转换效率和大的输出功率。这种谐振腔本身尺寸较小,却可以得到很大的有效谐振腔腔长,利用这一特性可获得短腔长的锁模激光器。在 Nd:YAG 晶体上施加磁场并配合使用偏振敏感的反射镜,就能产生单向的行波激光振荡,得到单纵模运转,使腔内倍频激光器的绿光噪声问题得到解决。

参 考 文 献

- Huo Yujing, He Shufang. Research on solidified miniature green laser with high performance [J]. *High Tech. Communication*, 2000, **10**(3):28~31
霍玉晶,何淑芳. 高性能微型全固态绿激光器的研究[J]. 高技术通信, 2000, **10**(3):28~31
- K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12):875~877
- Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui *et al.*. 1.5 W cw frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):119~122
王海波,马艳,翟泽辉等. LD端面抽运1.5 W单频稳频绿激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(2):119~122
- Zheng Wei, Wang Chingyue, Zhao Jiangshan *et al.*. Self-starting Kerr-lens mode-locked Ti:Al₂O₃ laser at repetition rates of 20 MHz. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):481~484
郑玮,王清月,赵江山等. 20 MHz自启动克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6):481~484
- T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9):1175~1180
- Huo Yujing, Xu Weiwei. Study on solid-state ring traveling-wave laser with two mirrors [C]. *SPIE*, 2000, **4220**:30~33

布拉格光栅间距限制速率对光码分多址系统特性的影响*

在全光接入技术中,光码分多址(OCDMA)以其抗干扰性强、保密性好以及用户接入灵活等优点,成为当前研究热点。光码分多址技术中的关键技术之一是地址码的编解码,一维编码方案有素数码,光正交码等,采用了波长和时间的二维编码主要有素数跳频码,二维光正交码等。采用二维编码的光码分多址可以大大增加系统用户容量,更适合于高性能、多用户、接入灵活的全光接入网。

利用布拉格光栅插入损耗小,结构精细小巧,与系统连接简便等优点,P. C. Tech 和 H. Ben 等用布拉格光栅实现了素数跳频编码器,并分别完成了每路 622 Mbps 和每路 1.25 Gbps 的系统传输实验。国内也开展了相关技术的研究,一维频谱编码的实验研究已见报道,采用二维光正交码和二维素数跳频码的光码分多址系统在理论分析上取得了积极的研究成果,但相关的实验研究尚少见报道。

上述工作都是在相邻布拉格光栅间距限制条件下讨论和研究的。而此限制条件所决定的用户传输速率一般被认为是不可超越的。本文研究了用户速率超过限定速率后性能的变化。实验系统包括两个发送端(一个作为发送用户,另一个为干扰用户)和一个接收端,速率从 70 Mbps 至 1.4 Gbps。采用(63×63,3,1,1)的二维光正交码,利用布拉格光栅阵列进行时间和波长的二维编码。根据光正交码编码理论,本地用户地址码和干扰用户的地址码分别选择(0,0)(3,6)(32,1)和(0,0)(2,1)(12,6),对本地用户数据而言,每个数据脉冲经过编码后由三个脉冲构成,第一个脉冲对应的是(0,0),即第 0 个切普有一个波长为 λ_0 的脉冲;第二个脉冲对应的是(3,6),即第 3 个切普

有一个波长为 λ_6 的脉冲;第三个脉冲对应的是(32,1),即第 32 个切普有一个波长为 λ_1 的脉冲。编码器采用反射波长分别为 1550 nm (λ_0), 1551.2 nm (λ_6) 和 1552.5 nm (λ_1), 谱宽 0.3 nm 的光栅级联做编码器,本地用户编码器相邻光栅间距分别为 16 cm 和 154 cm。

设系统最大传输速率 R_b ,扩频码的码片间隔为 L_c , N 为码长,光在光纤中的传播速度为 $v=c/n$, n 为纤芯的折射率。考虑当已扩频信号的码片在时域不发生重叠时,系统的最大数据传输速率为

$$R_b = v/(2L_c N),$$

根据编码器的参数可得系统最大的传输速率为 300 Mbps。实验中采用的用户速率为 500 Mbps(超过限制速率近 2 倍)和 700 Mbps(超过限制速率近 2.5 倍)的伪随机信号进行了背对背传输实验。从单用户和两个并发用户的系统解码后的光信号波形可以看出接收端仍能正确解码。理论计算和实验结果都表明用户速率超过限定的速率几倍后,系统仍然可以达到较好性能。说明速率限制条件是考虑扩展后的信号码片在时域不重叠,在多用户同时接入情况下不造成码间干扰。因此速率超限只会使码片的重叠概率增加,并不会使相应的系统误码率成倍增加。所以在要求误码率相同前提下,并发用户数小于光正交码码重的系统和地址码较长系统,其用户速率可以突破限制速率的 2~3 倍。理论分析和实验研究表明布拉格光栅间距条件所决定的速率限制,并非为不可逾越的必要条件。

天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室,
光电信息技术科学教育部重点实验室,
天津 300072

付晓梅,于晋龙,王文睿,戴居丰,杨恩泽

收稿日期:2004-07-01;收到修改稿日期:2004-11-11

* 国家 863 计划(2001AA312220)资助项目。