

一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器的基本特性研究

龚梦帆 肖光宗* 傅杨颖 张斌

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 为了提高Y型腔正交偏振氦氖激光器的输出光特性,对激光器的腔体结构、增益区光路以及偏振分光片的加工工艺进行改进,研制出了新型一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器。介绍了该激光器的基本结构和工作原理,实验测试了激光器的输出光模式、输出光功率、频差闭锁特性和频差稳定性。与先前分立式结构的Y型腔正交偏振激光器相比较,详细分析了改进后的激光器的优势,特别指出了其在频差稳定性方面的提升。实验结果表明,利用一体化Y型腔结构可以实现激光器的频率分裂;通过调节P子腔反射镜上压电陶瓷的电压,可以线性调节激光器的输出频差;相比于分立式Y型腔激光器,一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器的输出光功率提高至647 μW ,频差闭锁阈值降低至12 MHz,频差范围提高至12~1038 MHz,频差稳定性提高至 1.2×10^5 Hz。

关键词 激光器; 正交偏振激光器; 频率分裂; 频差稳定性

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121406

Characters of Orthogonal Polarized He-Ne Laser with Integrated Y-Shaped Cavity Research

Gong Mengfan Xiao Guangzong Fu Yangying Zhang Bin

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract To improve the laser performance, an orthogonal polarized He-Ne laser with integrated Y-shaped cavity is designed after modifying the cavity structure, the gain region and the processing technology of polarizing beam splitter. Cavity structures and operating principles of the laser are described, and the mode, power, lock-in features, frequency difference stability of the laser are measured. Detailed performance enhancements are shown, especially the frequency difference stability. Comparisons are presented to traditional laser with detached Y-shaped cavity. The results show that the frequency difference between two cavities can be linearly adjusted by changing the voltage of the piezoelectric transducer in the P-cavity. Compared with the detached Y-shaped cavity laser, the output power of the integrated laser is improved to 647 μW , the lock-in frequency difference is reduced to 12 MHz, the range of frequency difference is improved to 12~1038 MHz, while the frequency difference stability is improved to 1.2×10^5 Hz.

Key words lasers; orthogonal polarized laser; frequency splitting; frequency difference stability

OCIS codes 140.1340; 140.3425; 140.3430

1 引言

多年来,从早期的双频激光干涉仪测量,到20世纪70年代出现的绝对距离干涉计量术,国内外研究者对双频激光在干涉测量领域应用的研究一直方兴未艾^[1-3]。近年来,双频激光器作为双频激光干涉仪光源,在干涉测量领域逐渐扮演着越来越重要的角色,并在传感领域崭露头角,双频激光技术显然已成为激光技术的一项重要组成部分。

典型的双频激光器有环形激光器^[4]和塞曼双频激光器^[5],在诸多应用中已被广泛使用。1997年Bretenaker等^[6]研制了空间分离型大频差可调谐双频Nd:YAG激光器,随后便有许多研究者不断提出各

收稿日期: 2015-07-10; 收到修改稿日期: 2015-08-25; 网络出版日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61308058)

作者简介: 龚梦帆(1991—),女,硕士研究生,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: happygmf@126.com

导师简介: 张斌(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: kd208zb@sina.com

*通信联系人。E-mail: xiaoguangzong@163.com

种双频激光器的方案以及其在精密测量中的应用^[7-10]。其中,正交偏振双频激光器逐渐成为国内近些年双频激光器的重点研究之一,清华大学张书练教授带领的课题组对正交偏振激光器本身的物理特性进行了详细的分析和研究^[11]。

1962年,Kleinman等^[12]首次提出在激光器腔外加一反射镜构成F-P腔来选择纵模。同年,Kogelnik^[13]等利用He-Ne激光器第一次实践了这种方法,从此促进了复合腔激光器的发展。Y型腔正交偏振激光器以独特的“Y”字型交叉复合腔体结构进入双频激光器领域,它可以产生两束偏振态正交垂直的不同频率的线偏振光,实际应用中利用这两个频率的光产生稳定的拍频来满足计量和传感领域的需求^[14-16]。

一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器的研制着眼于提高Y型腔正交偏振激光器的频差范围和频差稳定性。测试了该激光器的性能参数(激光模式、输出功率、闭锁阈值以及频差稳定性),并进行了初步的分析,便于下一步使用该激光器进行干涉测量和参数传感,从而深入了解其物理特性,拓展更多新的应用。

2 结构特点和工作原理

2.1 基本结构

一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器的结构如图1所示。图1中M1~M4均为反射镜,PBS为消光比在5000左右的偏振分光片,M1镜处安装有压电陶瓷PZT1用于调节激光器的总腔长,M2镜处安装有压电陶瓷PZT2用于调节激光器的子腔长。激光器光学总腔长为130 mm,纵模间隔约为1155 MHz,激光在腔内通过偏振分光片分成两束偏振态互相垂直的光,将这两种正交成分标定为s光和p光,如图1所示。s光和p光在各自的腔内传播,两个子腔段与增益区公共腔段构成“Y”字型腔体结构,称采用这种谐振腔结构实现频率分裂的方法为“Y型腔频率分裂方法”^[14]。

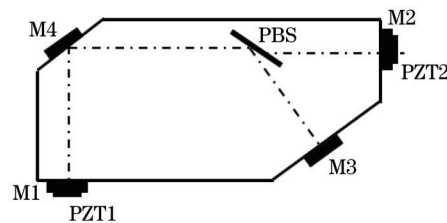


图1 一体化Y型腔正交偏振氦氖激光器

Fig.1 Orthogonal polarized He-Ne laser with integrated Y-shaped cavity

由图1可以看出,激光通过偏振分光片PBS产生反射光和透射光,两束光分别在两个子谐振腔中传播。将M1距离偏振分光片这一段称为公共腔,将PBS到M2这一腔段称P子腔,将PBS与M3构成的腔段称为S子腔。

2.2 腔体改进设计

Y型腔激光器改善了一般低损耗双频激光器潜在的弊端,例如:利用经过特殊膜层结构设计和镀制工艺的偏振分光片^[2]进行分光,有效地保证了腔内没有多余光学元件可对激光产生影响。着眼于提高此类双频激光器的频差范围和频差稳定性,在先前的谐振腔结构基础上,考虑从以下两点对激光器进行了加工和改造:

1) 折叠腔光路

结合激光器出光条件以及输出频差与腔长的关系,考虑到提高输出频差范围,将激光器的光路设计为折叠路径,缩短分立式Y型腔激光器的腔长尺寸,获得更大的频差值。改进之后,激光器结构变得紧凑灵巧,同时更能适应工业需求。

2) 偏振分光片的光胶粘合技术和开槽设计

分立式Y型腔存在一个影响频差稳定性的关键因素,这一因素来自偏振分光片与腔体的粘合技术。分立式Y型腔采用钢封技术,钢作为一种金属,容易受到腔内温度变化的影响,当电流放电产热而腔内温度升高时,钢易受周围温度的变化发生微形变导致分光片产生纵向位移从而影响S子腔的光程,进一步影响S子腔谐振光的频率稳定性。改进后的激光器腔内偏振分光片采用光胶技术粘合,可有效地避免钢封技术在热效应作用下引起的光程变化。另外,分光片由先前的平面片结构改进为槽片结构,由此可以减小光胶应力,进一步提高输出频差稳定性。

2.3 工作原理

如图1所示,S光和P光分别在定义的S子腔和P子腔中传播,根据激光原理可知,s光和p光的纵模间隔分别为

$$\Delta_s = \frac{c}{2(l_0 + l_s)}, \quad (1)$$

$$\Delta_p = \frac{c}{2(l_0 + l_p)}, \quad (2)$$

式中 l_0 为公共腔光学腔长, l_s 和 l_p 分别为S子腔和P子腔的光学腔长。由(1)式和(2)式可知,激光器腔内存在两个不同偏振态的纵模序列,纵模序列在增益曲线上的分布如图2所示。调节压电陶瓷PZT1的驱动电压可以调节激光器的总腔长从而改变激光器各纵模相对增益曲线的位置,调节压电陶瓷PZT2的驱动电压可以调节P子腔的腔长,推动p偏振态纵模序列在纵模轴上移动,从而产生不同大小的频差。

实验中推动压电陶瓷观察到,在增益区线下最多同时存在3个纵模,此时腔内s光和p光同时振荡,模式组合为 ν_s 、 ν_{s+1} 和 ν_p 或者 ν_p 、 ν_{p+1} 和 ν_s ,大多数情况下出现的均为稳定的不同偏振态双纵模分布,如图3所示。

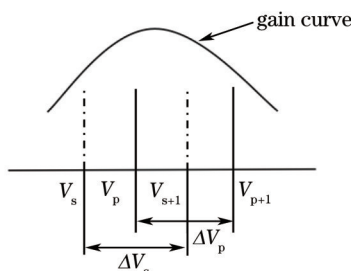


图2 增益曲线下纵模间隔和频率分量

Fig.2 Longitudinal mode spacing and frequency components under gain curve

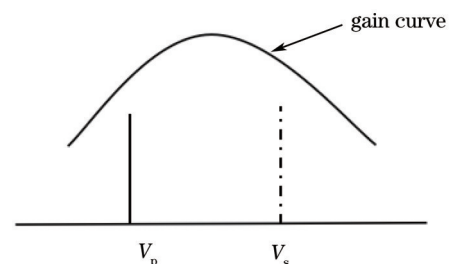


图3 不同偏振态的双纵模分布

Fig.3 Double-longitudinal modes of different polarization distributions

3 实验分析

3.1 激光输出模式

3.1.1 横模分布

在距离激光器3 m远处目测激光光斑,观察到形状规则的圆形亮斑,同时采用CCD探测器探测激光束得到光斑图像,实验装置和光斑图像分别如图4(a)、(b)所示。

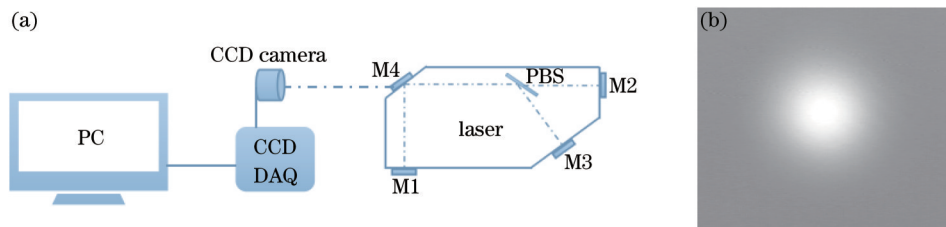


图4 CCD探测输出激光光斑。(a) CCD探测激光模式实验装置;(b) 激光光斑图像

Fig.4 CCD light spot of output laser. (a) Experimental device of CCD detects laser mode; (b) laser spot image

由光斑图像可得到激光光强分布,如图5(a)所示。选取光斑强度最大值,绘制其所在水平线及其垂直线上的光强曲线,并以一维高斯模型拟合,可大大简化二维高斯拟合的流程。图5(b)为水平线上光强分布曲线及其高斯拟合的效果图,蓝色散点连线为实际探测到的光强分布曲线,红色曲线为高斯拟合曲线。可以观察到光强分布曲线和高斯曲线极为贴合。采用同样的方法,在最大值垂直线上也观察到相似的贴合情况。结合光强二维分布图,不难发现探测光束的强度满足高斯分布,因此激光输出为基横模,光束质量优良。

3.1.2 纵模分布

使用共焦球面扫描干涉仪观察激光器的输出光纵模分布。当激光器工作电流为1.6 mA时,调谐压电陶瓷PZT1和PZT2,通过调谐PZT1改变s光和p光在增益曲线下获得的增益大小,通过调谐PZT2改变s光与

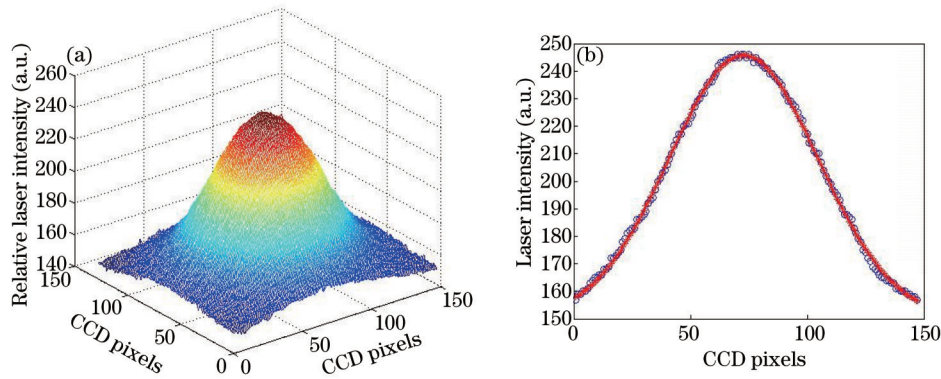


图5 输出激光的横模分布。(a) 输出激光的光强分布;(b) 光强分布曲线的高斯曲线拟合

Fig.5 Transverse mode distribution of output laser. (a) Intensity distribution of output laser;

(b) Gaussian fits curve of light intensity distribution

p光之间的纵模间隔,在示波器上观察不同频差下的纵模分布结果如图6所示,曲线1为锯齿波扫描电压,曲线2为光强波形。一个锯齿波电压扫描激光器两个周期的纵模分布波形。图6(a)、(b)分别为激光器内仅有s或p单偏振光振荡时的单纵模分布和双纵模分布;图6(c)和(d)分别为激光器输出较小频差和较大频差时的纵模分布,此时增益曲线下存在偏振态不同的两个纵模同时振荡。

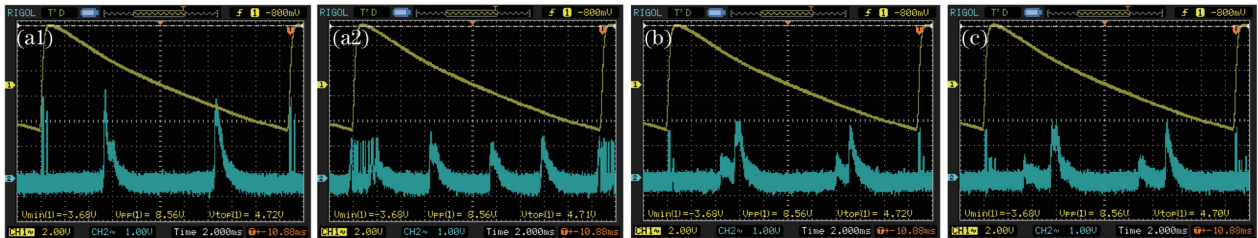


图6 不同频差大小时的纵模分布。(a) 激光器内仅有单偏振光时的纵模分布。(a) 单纵模分布和(b) 双纵模分布;

(c) 较小频差时的s光纵模和p光纵模;(d) 较大频差时的s光纵模和p光纵模

Fig.6 Longitudinal modes distribution in different frequency differences. (a) Single mode distribution and (b) double modes distribution of single polarized light in laser; (c) s and p longitudinal modes in small frequency difference;

(d) s and p longitudinal modes in large frequency difference

3.2 输出功率与放电电流的关系

改变激光器放电电流,调谐压电陶瓷PZT1,使得公共腔输出光总功率达到最大值。如图7所示为输出光功率和电流的关系,图中 P_0 为实际测量光功率值, P_1 为对应的拟合曲线。

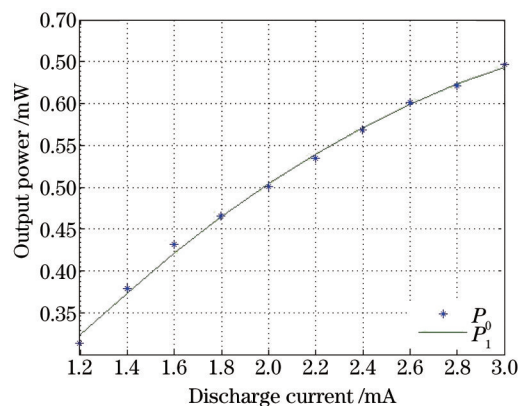


图7 激光器输出功率与放电电流的关系

Fig.7 Output power versus discharge current

3.3 频差闭锁阈值与放电电流的关系

频差闭锁是正交偏振激光器中常见的物理现象,在实验测量激光器闭锁阈值的过程中发现,当激光器放电电流不同时,频差闭锁值也不同,测得二者的关系如图8所示。

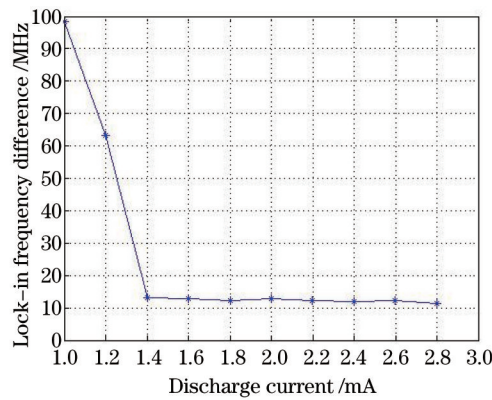


图8 频差闭锁阈值与放电电流的关系曲线

Fig.8 Lock-in frequency difference versus discharge current

根据实验数据得到,在电流激励值不超过 1.4 mA 的条件下,激光器频差闭锁阈值随放电电流的增大而减小,电流值达到 1.4 mA 后,激光器的闭锁阈值基本不再随电流变化,且稳定在 12 MHz 左右。导致这一现象可能是因为激光器增益系数随放电电流的增加而增大,两偏振光纵模对增益粒子的争夺变得逐渐“缓和”,模式竞争随之变小,从而频差闭锁阈值变小。

3.4 频差稳定性

激光器冷启动后约 2 h 达到热平衡状态,使用频率计对其频差稳定性进行测试,采样周期为 1 s,短期测试时间约 20 min,测试曲线如图 9 所示,横坐标代表频率采样时间,纵坐标代表频差。

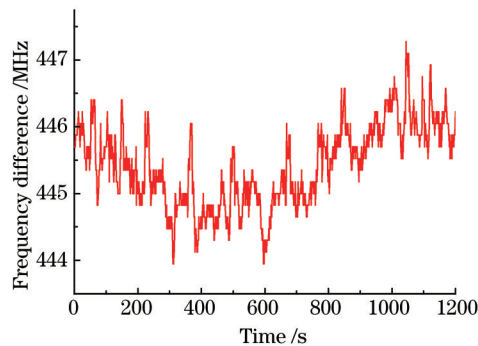


图9 短期频差稳定性

Fig.9 Frequency difference stability in short time

在国际计量标准中,评价稳频激光的频率稳定度时通常采用阿伦方差表示,定义为

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N/2} (\Delta\nu_{2i} - \Delta\nu_{2i-1})^2}, \quad (3)$$

式中 N 为时间采样点数, $\Delta\nu_{2i}$ 和 $\Delta\nu_{2i-1}$ 为采样平均时间 τ 内连续测量的两个相邻的拍频的频率。根据(3)式可得,激光器在 20 min 内的频差稳定性为 1.2×10^5 Hz。

4 结 论

将分立式 Y 型腔正交偏振氦氖激光器的腔体结构和加工工艺进行改进,得到了新型一体化结构的正交偏振氦氖激光器。介绍了该激光器的基本结构和工作原理,研究了其输出模式、输出功率、频差闭锁阈值和频差稳定性。与先前分立式 Y 型腔正交偏振激光器相比较,详细阐述了该激光器的特点及其在输出频差稳定性方面的优势。实验测得一体化 Y 型腔正交偏振氦氖激光器的输出模式为基横模、双纵模,对比于分立式 Y 型腔激光器,一体化 Y 型腔正交偏振氦氖激光器的输出光功率由 235 μ W 提高至 647 μ W,频差闭锁阈值由 22 MHz 降低至 12 MHz,频差范围由 22~1018 MHz 提高至 12~1038 MHz,频差稳定性提高至 1.2×10^5 Hz。然而由于外界环境和激光器内部因素的影响,激光器的输出频差稳定性还有待提高,因此研究影响激光器输出频差稳定性因素,对激光器几何结构进行优化设计,是目前和今后的主要研究内容。

参考文献

- 1 Chi Guichun. Applied Laser in Measuring Technology[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1994.
迟桂纯. 激光在计量测试技术中的应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- 2 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0408004.
池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉仪测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
- 3 Zhang Zhiping, Cheng Zhaogu, Qin Zhaoyu, *et al.*. Influence of acceleration on the error of laser dual-frequency interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 694-698.
张志平, 程兆谷, 覃兆宇, 等. 加速度对激光双频干涉仪测量误差的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 694-698.
- 4 JIANG Y N. Ring Laser Gyro[M]. Beijing: Tsinghua University, 1985.
- 5 R A J Keijsers. Polarization properties of internal mirror He-Ne lasers in a strong transverse magnetic field[J]. Opt Commun, 1977, 23(2): 194-198.
- 6 M Brunel, F Bretenaker, A Le Floch, *et al.*. Tunable optical microwave using spatially resolved laser eigenstates[J]. Opt Lett, 1997, 5(384): 384-386.
- 7 Liu Jinghua, Zhang Shulian, Zhu Jun, *et al.*. Dual-frequency He-Ne laser with anti-reflective/ birefringence/ high-reflective [C]. SPIE, 2002, 4919: 248-255.
- 8 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602013.
- 9 Xing Junhong, Jiao Mingxing. Design and experimental study of tunable dual-frequency Nd: YAG laser with large frequency difference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(02): 051402.
邢俊红, 焦明星. 大频差可调谐双频 Nd: YAG 激光器设计与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(02): 051402.
- 10 Yang Qing, Huo Yujing, Duan Yusheng, *et al.*. Double-longitudinal-mode continuous-wave laser with ultra-large frequency difference used for narrowband terahertz-wave generation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514002.
杨清, 霍玉晶, 段玉生, 等. 用于产生窄带太赫兹波的超大频差双纵模连续激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514002.
- 11 Zhang Shulian. The Theory of Orthogonal Polarized Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 12 D A Kleinman, P P Kisliuk. Discrimination against unwanted orders in the Fabry-Perot resonator[J]. Bell Syst Tech, 1962, 41(2): 453-462.
- 13 H Kogelnik, C K N Patel. Mode suppression and single frequency operation in gaseous optical masers[J]. Proc IRE, 1962, 50: 2365-2366.
- 14 Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang. A novel orthogonal polarized dual-frequency laser using a Y-shaped cavity [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(7): 1314-1317.
- 15 Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang *et al.*. A novel active optical approach for acceleration measurement based on a Y-shaped cavity dual-frequency laser[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 344-348.
- 16 Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang, *et al.*. Precise force measurement method by a Y-shaped cavity dual-frequency laser[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(10): 101201.

栏目编辑: 宋梅梅