

文章编号 1004-924X(2011)11-2558-07

Y型腔正交偏振氦氖激光器及其基本特征

肖光宗*, 龙兴武, 张 斌

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院 光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研制了基于Y型腔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基本原理。实验研究了该激光器的输出光模式、输出光功率、输出光频差调谐特性和频差闭锁特性。通过改变共用段反射镜上压电陶瓷的电压, 观察了激光器闭锁状态时两偏振光光强随着总腔长调谐变化的规律, 并分析了闭锁状态下不同偏振态纵模之间的相互作用机理。与以往产生双频激光的方案进行对比, 分析了Y型腔正交偏振氦氖激光器的特点, 给出了其在频差稳定性方面的优势和制约因素。实验结果表明, 利用Y型腔结构可以实现氦氖激光器的频率分裂, 激光器最大输出功率约为235.2 μW ; 通过调节共用段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; 实验中激光器的频差为22~1 018 MHz, 闭锁阈值频差约为22 MHz。

关键词: 氦氖激光器; 正交偏振激光器; 频率分裂; Y型腔

中图分类号: TN248.2, **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2558

Orthogonal polarized He-Ne laser with Y-shaped cavity and its characteristics

XIAO Guang-zong*, LONG Xing-wu, ZHANG Bin

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaoguangzong@163.com

Abstract: Based on the Y-shaped cavity frequency splitting method, an orthogonal polarized He-Ne laser was designed and implemented. The structure and basic principle of the laser were introduced in detail, and the transverse and longitudinal models, output powers, the ellipticity of output light and frequency difference lock-in phenomenon and frequency difference tuning characteristics were experimentally investigated. By changing the voltage of piezoelectric transducer applied to the common cavity mirror, the power tuning characteristics of S polarized and P polarized lights were observed and summarized. Furthermore, the interaction mechanism of S polarized and P polarized lights as above-mentioned was also analyzed. Compared with the traditional dual frequency lasers, the characters of the laser, as well as its merits and demerits on the frequency difference stability were presented. Experiments show that the maximum output power of the laser is about 235.2 μW . By adjusting the

收稿日期: 2011-03-17; 修订日期: 2011-04-15.

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新基金资助项目(No. B090703)

voltage of the piezoelectric transducer in the P cavity, the frequency difference between the S polarized and P polarized lights is linearly varied from 22 MHz to 1 018 MHz and lock-in frequency difference of the laser is about 22 MHz.

Key words: He-Ne laser; orthogonal polarized laser; frequency splitting; Y-shaped cavity

1 引 言

正交偏振激光器在位移、振动、速度、角速度和加速度等物理量的精密测量方面有着广泛的应用,近年来国内外对正交偏振激光器的研究方兴未艾。典型的双频激光器有环形激光器^[1]和塞曼双频激光器^[2],前者主要用于角速度测量,已广泛应用于飞机、舰艇和导弹等的惯性导航中,后者过小的输出频差限制了它的测速范围。

清华大学以研制大频差双频激光器为出发点,自 1985 年开始利用双折射原理研究激光频率分裂,实现了激光器的正交偏振振荡。他们先后提出或研究了自然双折射大频差双频激光器、应力双折射双频激光器、应力双折射腔镜双频激光器、双折射-塞曼双频激光器、双双折射元件双频激光器、叠层双折射膜双频激光器、叠层双折射-塞曼双频激光器和 LD 泵浦双折射可调谐巨大频差 Nd:YAG 激光器等等多种方案^[3],并利用双频激光器的光强调谐、频差调谐和光回馈效应等物理现象,开展了双频激光器用于位移、波片相位延迟、角度、振动和磁场等物理量测量的研究^[4-8]。

法国 A. Le Floch 研究了在正交偏振激光器调谐中处于熄灭状态的频率转化成振荡频率,振荡频率转化为熄灭频率的跳变过程,提出了造成偏振跳变和回滞现象的两个不同机制——旋转机制和抑止机制^[9]。德国 Wolfgang Holzapfel 研究了基于固体激光器 Nd:YAG 的光弹效应的双频激光器在力和加速度传感方面的应用^[10]。

目前,国内外的正交偏振激光器大多采用腔内双折射原理实现频率分裂,用来产生双折射效应的材料包括石英、Nd:YAG、KD*P 等双折射晶体和施加了应力的光学玻璃片,它们的双折射性质容易受到温度等环境因素的影响^[11],从而限制了双频激光器频差稳定性等物理性能的进一步提高。前苏联最早提出 Y 型腔实现激光频率分裂的方案,但未见其后续文献报道。文献^[3]指出基于该方案的激光器用于位移测量可能存在一些物

理原理障碍,即频差闭锁导致频差范围减小,在一定的腔镜位移范围内一个叉内的频率是熄灭的,而实际上通过该文献中提到的施加横向磁场减小模竞争的方法可以将闭锁阈值频差降低到 1 MHz 以内,频差范围接近一个纵模间隔;文献^[12-13]基于“双折射滤光片”的选频原理,提出了一种 LD 泵浦双频固体激光器方案,该激光器的谐振腔也属于 Y 型腔。文献^[14]提出了基于频差分裂方法的双频氦氖激光器的激光加速度计方案。

本文主要着眼于研制具有高稳定频差的双频激光器,采用 Y 型腔实现氦氖激光器的频率分裂,由于激光器腔内没有双折射元件,为其频差稳定性的提高提供了可能。文中将 Y 型腔频率分裂方法应用于氦氖激光器中,并成功研制了 Y 型腔正交偏振氦氖激光器原理样机。介绍了该激光器的基本结构和 Y 型腔实现激光频率分裂的基本原理,通过实验测试了该激光器的频差范围和闭锁阈值频率,研究了闭锁状态下不同偏振态纵模之间的相互作用过程。

2 基本结构与基本原理

Y 型腔正交偏振氦氖激光器的基本结构如图 1 中矩形框内部分所示,其中 M_1 为反射镜、 M_2 和 M_3 均为输出镜,PBS 为偏振分光镜,W 为增透窗片,PZT₁ 和 PZT₂ 均为压电陶瓷,它们分别安装在 M_1 和 M_3 上。增益介质中氦气和氖气的气压比为 7:1,氦同位素配比为 1:1。S 偏振态光和 P 偏振态光(以下分别简称为“S 光”、“P 光”)共用增益介质,从 M_1 到偏振分光片这一段共用的谐振腔,称之为“共用段”;S 光和 P 光经偏振分光片后分别进入不同的谐振腔,这两段非共用的谐振腔称之为“S 子段”和“P 子段”。S 子段、P 子段和共用段连接在一起,形似“Y”,它们构成复合腔,为了与激光技术中常用的复合腔法(如迈克耳孙干涉仪式复合腔和福克斯-史密斯干涉仪式复合腔等)选纵模区分^[15],这里称该复合腔(包括 S 子段、P 子段、偏振分光片和共用段)为“Y 型腔”,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”。

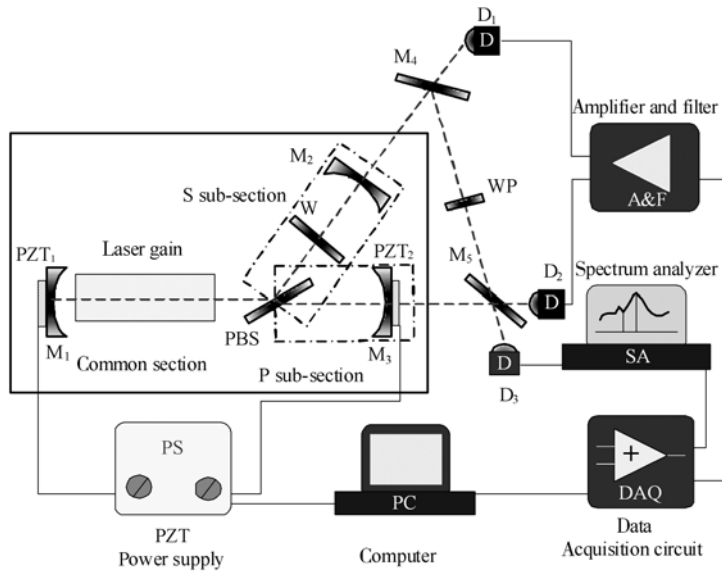


图 1 Y 型正交偏振氦氖激光器和实验装置

Fig. 1 Orthogonal polarized He-Ne laser with Y-shaped cavity and experimental setup

偏振分光片是该激光器的关键元件,经过特殊的膜层结构设计和镀制工艺,它对 S 光的反射率大于 99.9%,对 P 光透射率大于 99.9%。这样一方面保证了 S 光有极小的透射损耗,P 光有极小的反射损耗,使得它们都有足够的净增益维持振荡;另一方面避免因 S 光进入 P 子腔过多而形成迈克耳孙干涉仪式复合腔,或者 P 光进入 S 子段过多而形成迈克耳孙干涉仪式复合腔^[14]。

由激光原理分析可知,该激光器中 S 光和 P 光的纵模间隔可分别写为^[12,14,16]

$$\Delta_s = \frac{c}{2(\langle l_c \rangle + \langle l_s \rangle)},$$

$$\Delta_p = \frac{c}{2(\langle l_c \rangle + \langle l_p \rangle)}.$$

其中, c 为光速, $\langle l_c \rangle$ 为共用段的光学长度, $\langle \rangle$ 表示光学长度, $\langle l_s \rangle$ 和 $\langle l_p \rangle$ 分别为 S 子段和 P 子段的光学长度。这样通过 Y 型腔实现了激光纵模的分裂,在激光器内同时存在两个不同偏振态的纵模序列。

3 实验与分析

3.1 基本特性测试

3.1.1 输出功率

改变激光器的放电电流时,调谐压电陶瓷

PZT₁ 使输出镜 M₃ 处的输出功率最大,此时 S 光和 P 光纵模频率关于中心频率对称,它们的光强基本相等。不同的放电电流下,激光器输出镜 M₃ 的输出功率与放电电流的关系曲线如图 2,可见最小维持电流约为 1.04 mA,输出功率最大值约为 235.2 μW,对应的最佳放电电流约为 3.10 mA。

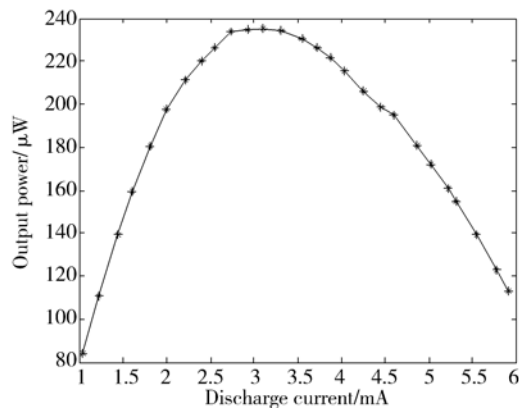


图 2 输出功率与放电电流的关系

Fig. 2 Relation between output power and discharge current

3.1.2 输出模式

在距离反射镜 M₃ 约 5 m 处接收到的激光光斑为规则的圆形,其光强分布如图 3,图中的实线为高斯曲线,输出激光的光强分布与高斯曲线符合得较好,说明其横模为基横模。

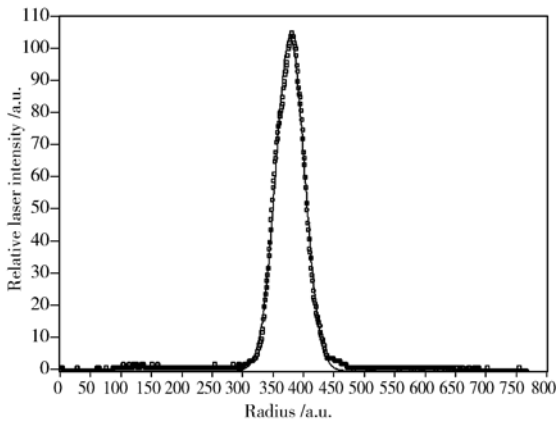
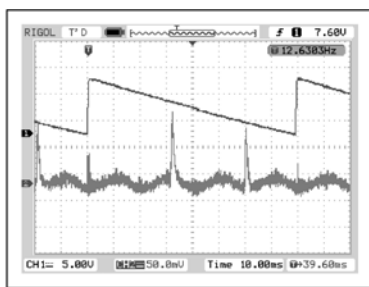


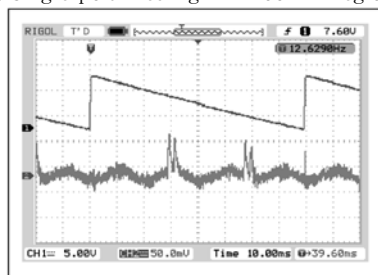
图 3 输出激光的光强分布

Fig. 3 Relative intensity distribution of output light



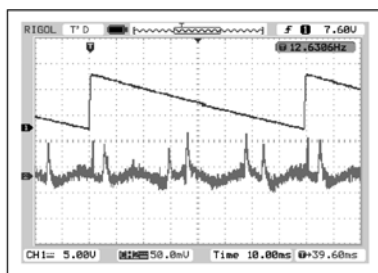
(a) 频差闭锁下的单偏振光

(a) Single polarized light in look-in region



(b) 较小频差下的 S 光纵模和 P 光纵模

(b) S and P longitudinal modes in small frequency difference



(c) 较大频差下的 S 光纵模和 P 光纵模

(c) S longitudinal and P longitudinal modes in large frequency difference

图 4 不同频差下的纵模

Fig. 4 Longitudinal modes with different frequency differences

调谐压电陶瓷 PZT₂ 的电压改变两偏振纵模之间的频差,使用 F-P 扫描干涉仪,得到不同频差下激光器的纵模分布如图 4。图中曲线 1 为扫描电压,曲线 2 为光强。图 4(a)为激光器的频差闭锁状态,此时只有一个偏振态纵模振荡,图 4(b)和图 4(c)分别为较小频差和较大频差时的纵模分布,此时两个不同偏振态的纵模同时振荡。

3.2 频差调谐特性实验与分析

3.2.1 实验装置与实验方法

实验装置如图 1,其中激光器的共用段长度约为 62.7 mm, S 子段和 P 子段长度相当,约为 67.3 mm。WP 为 $\lambda/2$ 片,用来将 P 光的偏振方向旋转 90°,使之与 S 光的偏振方向相同; M₁ 和 M₅ 均为半透半反片,它们用来将 S 子段和 P 子段输出的偏振光传播方向调整到同一条直线上进行合光以产生干涉。D₁、D₂ 和 D 均为光电探测器, SA 为频谱分析仪, PS 为压电陶瓷驱动电路, A&F 为放大和滤波电路, DAQ 为数据采集电路, PC 为计算机。

实验中, S 光和 P 光的光强分别经过光电探测器 D₁ 和 D₂, 放大和滤波电路 A&F 和数据采集卡 DAQ 进入计算机; 计算机根据 S 光和 P 光的光强差, 通过压电陶瓷驱动电路 PS 改变压电陶瓷 PZT₁ 的电压, 使得两偏振光光强差最小, 以保证激光器稳定运转。计算机通过压电陶瓷驱动电路 PS 来改变压电陶瓷 PZT₂ 的电压, 推动 P 子段的腔镜 M₃, 以改变 S 子段和 P 子段的长度差, 实现对 S 光和 P 光的频差调谐。最后, 用频谱分析仪 SA 记录下压电陶瓷 PZT₂ 在不同电压下光电探测器 D 所接收到的信号中的频率。

3.2.2 实验结果与分析

实验中的激光器总腔长约 130 mm, 纵模间隔约为 1 154 MHz, 略大于出光带宽, 实现了 S 光和 P 光的单纵模运转。在压电陶瓷 PZT₂ 的不同电压下, 光电探测器所接受到的拍频频率变化如图 5, 其横坐标为压电陶瓷 PZT₂ 上的电压, 纵坐标为拍频频率。

由图 5 可见, 随着压电陶瓷 PZT₂ 上的电压增大, 拍频信号的频率线性增加。S 光和 P 光的拍频变化范围从 22 MHz 到 1 018 MHz, 闭锁阈值频率为 22 MHz, 这与文献[3]所报道的双频激光器闭锁阈值频率相当。双频激光器存在闭锁阈值源于纵模之间的强竞争。由于频差较小时, 相

邻纵模在增益曲线上的烧孔大面积重叠,竞争的结果将是净增益相对较大的纵模振荡,相邻的另一纵模熄灭。

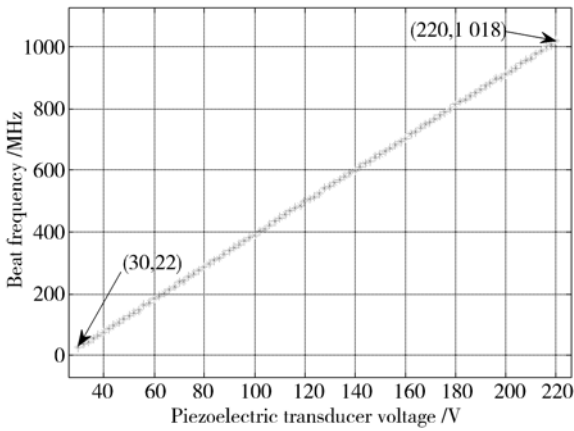


图 5 拍频频率随压电陶瓷电压的变化曲线

Fig. 5 Beat frequency versus piezoelectric transducer voltage

由于两偏振态纵模的损耗存在差异,当 S 光和 P 光频差小于闭锁阈值频率时,两偏振态纵模在增益曲线上的相对位置不同,将有两种不同的竞争结果^[17]。一种结果是:一种偏振态的两个纵

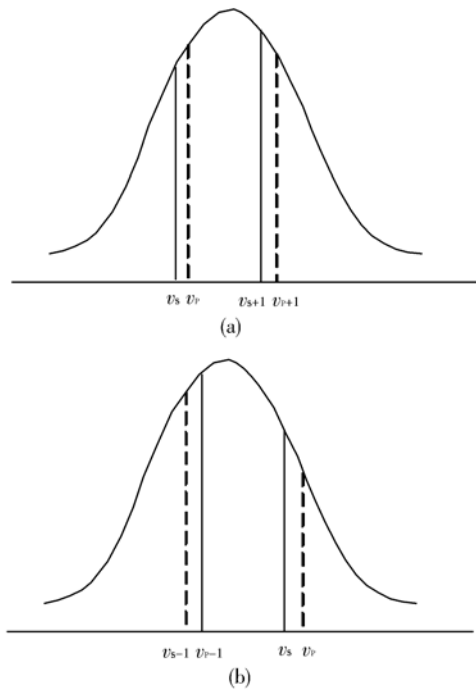


图 6 闭锁状态的纵模分布

Fig. 6 Longitudinal modes distribution in lock-in region

模振荡,另一种偏振态的两个纵模熄灭,如图 6 (a)中用虚线表示的纵模将熄灭,下同);另一种结果是:频率轴上相邻的两个不同偏振态纵模中,靠近增益曲线中心的纵模振荡,另一纵模熄灭,如图 6(b)。

通过压电陶瓷 PZT₁ 推动共用段的反射镜 M₁,改变纵模在增益曲线上的相对位置,可以观察上述两种竞争过程,共用段调谐过程中两偏振光的光强变化曲线如图 7。随着压电陶瓷 PZT₁ 电压增大,激光器总腔长缩短,S 光和 P 光的纵模间隔都增大,图 6 中“频率梳”向右移动。

压电陶瓷 PZT₁ 的电压从 0 V 到 40 V 这一阶段,S 光为双纵模,P 光熄灭,即为图 6(a)中的状态。在这个阶段,S 光两个纵模的净增益均大于与它们相邻的 P 光纵模。随着压电陶瓷的推动,S 光双纵模的频率中心逐渐靠近增益曲线中心,光强逐渐增大。当 S 光双纵模的频率中心到达增益曲线中心时,光强达到最大值。当 S 光双纵模的频率中心越过并开始远离增益曲线中心时,s 模增益开始减小,s+1 模也将因增益不足而熄灭,S 光的光强开始逐渐减小。此时,从频率轴左边进入出光带宽的 s-1 模和 p-1 模中,p-1 模更靠近增益曲线中心,当它的净增益大于 s-1 模后 p-1 模将竞争胜利开始振荡,就形成了图 6(b)中的纵模分布状态。当 p-1 模越过增益中心后,增益小于与之相邻的 s-1 模,p-1 模的净增益小于 s-1 模后因竞争失败而熄灭,S 光两个纵模又将同时振荡,如图 6 (a)。

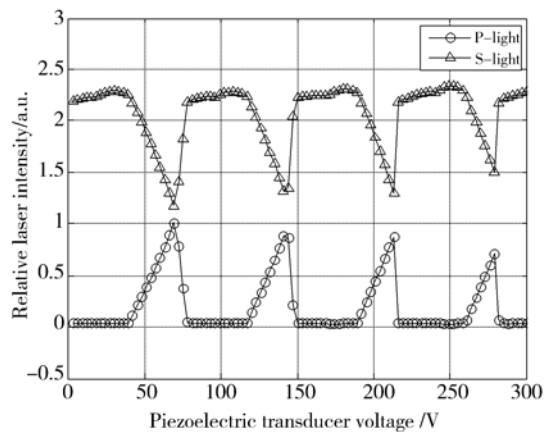


图 7 闭锁状态的光强调谐曲线

Fig. 7 S-light and P-light power turning curves in lock-in region

4 结 论

将 Y 型腔频率分裂方法应用于氦氖激光器中,研制了 Y 型腔正交偏振激光器的原理样机。介绍了该激光器的基本原理和结构,通过实验初步分析了激光器内双纵模偏振态交替的机理,测试了激光器的输出模式、输出功率、频差范围和闭锁阈值频差,分析了闭锁状态下不同偏振态纵模之间的相互作用过程。

作为一种新型的正交偏振双频激光器,与以往产生双频激光的方法相比具有以下特点:(1)以往的正交偏振激光器大多采用双折射效应产生频率分裂,而晶体或应力玻璃等元件的双折射性质容易受到温度等环境因素影响^[11],造成频差不稳定。Y 型腔正交偏振激光器内除了谐振腔和增益介质自身微小的各向异性外^[17],没有其它双折射元件,避免了这一不稳定因素;而超低膨胀系数微晶玻璃作为腔体材料又保证了温度对 S 子段和 P

子段光学长度差的影响较小,这就为激光器频差的高稳定提供了可能。当然,温度对 S 子段和 P 子段光学长度差的影响仍然是制约其频差稳定性提高的主要因素。(2)以往采用两支激光器拍频获得频差的方法,作为无法消除的自身热源,两支激光器都有各自独立的增益区和阴极,它们对每支激光器频率的影响不同,无法通过差动的方法提高拍频频率的稳定性。Y 型腔正交偏振激光器内 S 光和 P 光共用增益区,通过差动的方法可以大大减小激光器自身热源对频差的影响。(3)以往采用声光晶体移频或者双频的方法,系统结构复杂,成本较高,而本文研制的 Y 型腔正交偏振激光器结构简单。此外,由于 S 光和 P 光可以分别从 S 子腔和 P 子腔输出,无需额外的分光、合光等光学元件,使用更加方便。(4)该激光器频差从 22 MHz 到 1 018 MHz 可调,通过改变压电陶瓷 PZT₂ 的电压可以线性改变频差。在激光器增益介质上施加磁场可以减小或消除频差闭锁,从而获得更大的频差范围。

参考文献:

- [1] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1985
JIANG Y N. *Ring Laser Gyro*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. (in Chinese)
- [2] Keijsers R A J. Polarization properties of internal mirror He-Ne lasers in a strong transverse magnetic field[J]. *Optics Communications*, 1977, 23(2): 194-198.
- [3] 张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 224-228.
ZHANG SH L. *The Theory of Orthogonal Polarized Laser* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 224-228. (in Chinese)
- [4] YANG S, ZHANG S L. The frequency split phenomenon in a He-Ne laser with rotation quartz crystal plate in its cavity[J]. *Optics Communication*, 1988, 68:55-57.
- [5] ZHANG S L, LU M, WU M X, *et al.* Laser frequency split by an electron-optical element in its cavity[J]. *Optics Communication*, 1993, 96(4): 245-248.
- [6] ZHANG S L, HE W K. Laser split by rotating an intracavity, tilt cut crystal quartz plate around its surface normal axis[J]. *Optics Communications*, 1993, 97(3): 210-214.
- [7] ZHANG S L, WU M X, JIN G F. Birefringence tuning double frequency He-Ne laser[J]. *Applied Optics*, 1990, 29:1265-1267.
- [8] JIN Y Y, ZHANG S L, LI Y, *et al.* Zeeman birefringence dual frequency laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2001, 18(4): 533-536.
- [9] ROPARS G, FLOCH A L. Polarization control mechanisms in vectorial bistable lasers for one-frequency systems[J]. *Physical Review A*, 1992, (1): 623-640.
- [10] HOLZAPFEL W, NEUSCHAEFER-RUBE S, KOBUSCH M. High-resolution, very broadband force measurements by solid-state laser transducers [J]. *Measurement*, 2000, 28: 277-291.
- [11] 倪志波, 宋连科, 刘建革等. 单轴晶体双折射率随温度变化的双光路测量[J]. *激光技术*, 2007, 31(4): 358-363.
NI ZH B, SONG L K, LIU J P, *et al.* Measurement of birefringence of a single axis crystal varying with temperature based on double light paths[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 358-363. (in Chinese)
- [12] 赵媛媛. LD 泵浦内腔倍频双频固体激光技术的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 41-48.
ZHAO Y Y. *Study of LD-pumped Intracavity*

- frequency-doubled dual-frequency solid-state Laser technique* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006:41-48. (in Chinese)
- [13] 焦明星, 刑俊红, 刘芸等. 双腔大频差双频全固态激光器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11):2784-2789
JIAO M X, XING J H, LIU Y, *et al.*. Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid state laser with large frequency difference[J]. *Chinese Journal of lasers*, 2010, 37(11): 2784-2789. (in Chinese)
- [14] 龙兴武, 肖光宗, 张斌. 一种新型的高精度激光加速度计[J]. 光学学报, 2010, 30(11):3227-3232.
LONG X W, XIAO G Z, ZHANG B. A novel high-precision laser accelerometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11):3227-3232. (in Chinese)
- [15] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 214-215.
LAN X J. *Laser Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2009:214-215. (in Chinese)
- [16] 周炳琨, 高以智, 陈调嵘等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:24-64.
ZHOU B K, GAO Y ZH, CHEN T R, *et al.*. *Theory of Lasers* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:24-64. (in Chinese)
- [17] 吕可诚, 巴恩旭, 张春平. 内腔双纵模 He-Ne 激光器偏振方向的竞争效应[J]. 光学学报, 1984, 4(1): 44-49.
LU K CH, BA EN X, ZHANG CH P. Competition effect of polarization in two-mode internal mirror He-Ne lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, 4(1):44-49. (in Chinese)

作者简介:



肖光宗(1983—),男,湖北襄阳人,博士研究生,2005年于武汉大学获得理学学士学位,2007年于国防科技大学获得工学硕士学位,目前主要从事新型激光器技术及其在惯性技术中的应用方面的研究。E-mail: xiaoguangzong@163.com, Tel:13319523320。



张斌(1970—),男,湖南长沙人,副教授,1993年于国防科技大学获得工学硕士学位,主要从事新型激光器技术及激光陀螺等方面的研究。E-mail: kd208zb@sina.com

导师简介:



龙兴武(1958—),男,湖南湘潭人,博士,教授,1984年于华中科技大学获得工学硕士学位,1993年于国防科技大学获得工学博士学位,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com