

doi:10.3788/gzxb20154402.0214003

扭转模结构双腔双频 Nd : YAG 激光器

邢俊红, 焦明星

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院精密仪器系, 西安 710048)

摘要:为了产生频差可调谐 1 064 nm 双频激光输出,设计了一种扭转模结构双腔双频 Nd : YAG 激光器,其两个驻波谐振腔共用相同的 Nd : YAG 增益介质,以扭转模结构消弱增益空间烧孔效应,使 Nd : YAG 激光器的两个驻波腔均以单纵模振荡,从而获得正交线偏振 1 064 nm 双频激光输出.理论分析了扭转模结构激光单纵模选择原理和双频激光同时振荡原理,实验研究了双频激光振荡特性和频差调谐特性.研究表明:双频 Nd : YAG 激光器的两个谐振腔能够同时以线偏振单纵模稳定振荡输出,其频差大小可随激光腔长的改变而调谐,频差调谐范围可达 1 个纵模间隔,实验观察到的频差调谐范围为 0.3 GHz~3 GHz.

关键词:双频激光器; Nd : YAG 激光器;扭转模;单纵模选择;频差调谐

中图分类号:TN248; TN242

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0214003-6

Two-cavity Dual-frequency Nd : YAG Laser with a Twisted-mode Configuration

XING Jun-hong, JIAO Ming-xing

(Department of Precision Instruments, School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to produce the dual-frequency laser with tunable frequency-difference at 1 064 nm, a two-cavity dual-frequency Nd : YAG laser was designed using a twisted-mode configuration, the two standing-wave cavities of which share the same gain medium Nd : YAG, and the twisted-mode configuration reduced or even eliminated the spatial hole-burning effect of gain so that the single longitudinal mode can be oscillated in both standing-wave cavities of the Nd : YAG laser, thus the orthogonally and linearly polarized dual-frequency laser at 1 064 nm was obtained. The principles of both single longitudinal mode selection of the twisted-mode configuration and the simultaneous oscillation of the dual-frequency laser were theoretically analyzed, and the characteristics of dual-frequency laser oscillation and frequency difference tuning were investigated experimentally. The experimental results show that both cavities of the Nd : YAG laser can steadily oscillate in linearly polarized single longitudinal mode, and the frequency-difference can be tuned up to one longitudinal mode interval by changing the cavity length, the frequency-difference tuning range is 0.3 GHz to 3 GHz.

Key words: Dual-frequency laser; Nd : YAG laser; Twisted-mode; Single longitudinal mode selection; Frequency-difference tuning

OCIS Codes: 140.3480;140.3530;140.3570;140.3600;140.3580

基金项目:国家自然科学基金(No. 51175421, 61205135)、陕西省科技计划(No. 2011K09-14)和陕西省教育厅产业化培育项目(No. 2010JC12)资助

第一作者:邢俊红(1978-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为激光技术及器件. Email: xjh3729@xaut.edu.cn

导师(通讯作者):焦明星(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术. Email: jiaomx@xaut.edu.cn

收稿日期:2014-07-15; **录用日期:**2014-09-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

全固态双频激光器具有体积小、效率高、噪音小、单色性好和输出功率大等一系列优点,因此被广泛应用于激光干涉测量、激光传感、太赫兹波产生和激光雷达探测等领域,成为目前激光科技前沿领域中的重要研究方向之一. 固体激光器产生双频的方法是在保证激光器单纵模运转的情况下,利用双折射效应或偏振效应使单纵模激光产生分裂,从而获得正交线偏振双频激光输出^[1]. 其中激光单纵模的选择方法主要有双折射滤光片法^[2-3]、标准具法^[4]、短腔法^[5]、扭转模腔法^[6]和环形行波腔法^[7-8]等,扭转模腔单纵模激光器能够有效消弱增益的空间烧孔效应,获得较大的单纵模激光输出功率,且激光器结构易于集成,有利于频率稳定. 最早的扭转模腔是 A siegman 等^[9]于 1965 年提出的,此后该技术得到不断发展,并取得了一系列重要研究成果^[10-16]. 1994 年,上海光机所林岳明等^[17]采用扭转模腔实现 LD 泵浦连续波 Nd:YAG 激光器单频运转; 1999 年,北京理工大学赵长明等^[18]采用微失调扭转模腔实现双频激光振荡输出.

本文在分析扭转模腔选模原理的基础上,采用偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter Prism, PBSP)的分光特性,将激光谐振腔分成直线驻波腔和直角驻波腔,设计了一种扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器,两个驻波腔共用相同的 Nd:YAG 增益介质,从而实现正交线偏振双频激光同时振荡输出,并通过改变两个驻波腔的腔长,可以调谐双频激光的频差大小,频差调谐范围最大可达 1 个纵模间隔.

1 扭转模腔选模原理

扭转模腔单频 Nd:YAG 激光系统如图 1,假设 x 方向与纸面平行, y 方向与纸面垂直,谐振腔轴为 z 轴.

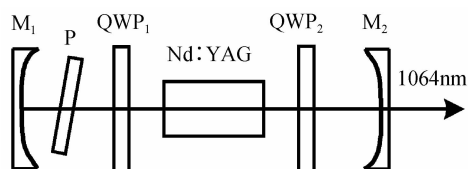


图 1 扭转模腔单频 Nd:YAG 激光系统

Fig. 1 Single frequency Nd:YAG laser using a twisted-mode cavity

在 M_1 和 M_2 两个腔镜组成的 Nd:YAG 激光谐振腔内放置一个起偏器 P,在 Nd:YAG 增益介质两端各放一个 $\lambda/4$ 波片 QWP_1 和 QWP_2 ,其快轴(慢轴)互相垂直^[8],并且 QWP_1 的快轴与偏振片 P 的偏振方向成 45° 夹角,构成扭转模腔. 偏振片 P 的偏振方向与 x 方向平行. 光在腔内振荡,首先经偏振片 P 变为沿 x 方向振动的线偏振光,即垂直线偏振光,其琼斯矢量为

$$E_1 = E_0 e^{ikz} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$, λ 为振荡激光的波长. 已知快轴与 x 轴成 45° 放置的 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$E_{1/4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

那么垂直线偏振光通过 $\lambda/4$ 波片 QWP_1 后,其琼斯矢量为

$$E_2 = E_0 e^{-ikz} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{-ikz} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{-i(kz+\pi/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,垂直线偏振光通过 QWP_1 后变成了左旋圆偏振光. 当光通过 $\lambda/4$ 波片 QWP_2 后,其琼斯矢量表示为

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{-i(kz+\pi/2)} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = E_0 e^{-i(kz+\pi/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

即左旋圆偏振光变成了水平线偏振光. 可见线偏振光的偏振方向与入射至 QWP_1 的线偏振光的偏振方向互相垂直.

光经腔镜 M_2 反射后再次通过 $\lambda/4$ 波片 QWP_2 ,这时其琼斯矢量表示为

$$E_4 = E_0 e^{-i(2kl-kz-\pi/2)} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{-i(2kl-kz-\pi/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, l 表示为谐振腔的光学长度. 可见,水平线偏振光变成了右旋圆偏振光,也就是说,在增益介质 Nd:YAG 中存在两个传播方向相反、旋向相反的圆偏振光. 将电场 E_2 和 E_4 叠加后,可得

$$E_5 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \left[e^{-i(kz+\pi/2)} + e^{-i(2kl-kz-\pi/2)} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \left[e^{-ikz} + e^{-i(2kl-kz-\pi)} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (6)$$

可见,传播方向相反、旋向相反的圆偏振光在晶体任意一个截面内的相位关系是确定的,即叠加成一个有确定方向的线偏振光. 同时,晶体不同截面内线偏振光的偏振方向每隔 λ 旋转一周,这样的光场形状就如同一个麻花状,因此称之为扭转模.

由式(6)可以获得增益介质 Nd:YAG 中光强的分布为

$$I = E_x^2 + E_y^2 = 4e_0^2 e^{-2ikl} \quad (7)$$

可以看出,增益介质中光强 I 的表达式不含位置坐标 z ,也就是说光强 I 的空间分布和位置 z 无关. 这样在激光增益介质中就形成了一个能量均匀分布的驻波场,不同的纵模要在相同区域内获得增益,就会产生互相抑制的竞争,即消除了空间烧孔效应,这样就保证

了均匀加宽 Nd:YAG 激光器以单纵模振荡输出^[9].

2 扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器

2.1 激光系统组成

基于扭转模结构的双腔双频 Nd:YAG 激光器如图 2. 从半导体激光二极管(LD)尾纤 OF 出射的 808nm 泵浦光经自聚焦透镜 GL 汇聚并入射至 Nd:YAG 晶体的左端面, Nd:YAG 晶体的两端各放置一个 $\lambda/4$ 波片 QWP₁ 和 QWP₂, QWP₁ 和 QWP₂ 的快轴互相垂直, 并且 QWP₁ 的快轴与 PBS₁ 的 P 光透光轴和 s 光透光轴的夹角均为 45°. QWP₁ 的左端面镀有对 1 064 nm 振荡激光高反、对 808 nm 泵浦光增透双色介质膜, 作为激光谐振腔的后反射镜. 沿自聚焦透镜 GL 的光轴在 QWP₂ 的右侧依次放置偏振分光棱镜 PBS₁ 和输出耦合镜 OC₁, 在 PBS₁ 反射光方向上放置输出耦合镜 OC₂. 这样 QWP₁ 的左端面介质膜与输出耦合镜 OC₁ 便构成了直线型驻波腔, 与 OC₂ 构成了直角型驻波腔. 为了减小腔内损耗, QWP₁ 的右端面、QWP₂ 和 PBS₁ 的两个端面均镀有 1 064 nm 增透膜.

由图 2 可见, QWP₁、QWP₂ 和 PBS₁ 构成扭转模结构, 可以消除增益的空间烧孔效应. 激光器的直线腔和直角腔共用 Nd:YAG 激光介质与扭转模结构, 均可以以线偏振单纵模振荡输出. 两路激光分别经反射镜 M₁ 和 M₂ 后由 PBS₂ 合光, 实现 1 064 nm 的正交偏振双频激光同轴输出. 输出耦合镜 OC₁ 和 OC₂ 分别粘在压电陶瓷 PZT₁ 和 PZT₂ 上, 当改变压电陶瓷上 PZT₁ 和 PZT₂ 的电压时, 直线腔和直角腔的腔长发生变化, 可以调谐双频激光的频差.

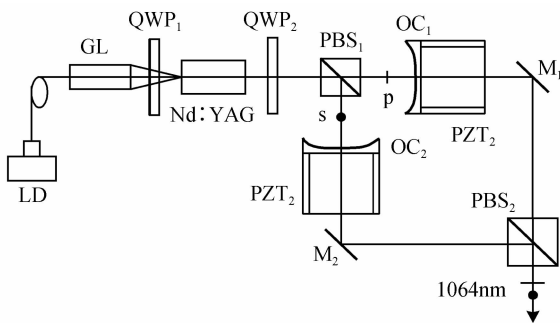


图 2 扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器
Fig. 2 Two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser using the twisted-mode configuration

2.2 双频激光同时振荡原理

由于图 2 中的激光器具有两个驻波谐振腔, 因此存在两组纵模频率梳, 如图 3(a)所示, 其中 q 和 q' 分别表示直线腔和直角腔的纵模序数. 扭转模腔消除了激光介质空间的增益烧孔效应, 不同纵模之间的竞争结果是靠近增益曲线中心频率 ν_0 的那个纵模获胜而形成激光振荡. 由图 3 可知, 直线腔和直角腔优先起振的

单纵模分别为 ν_q 和 $\nu_{q'}$, 其他纵模由于远离中心频率 ν_0 , 获得的增益较小而不能起振. 于是, 这种扭转模结构双腔 Nd:YAG 激光器就可实现正交线偏振双频激光输出, 如图 3(b).

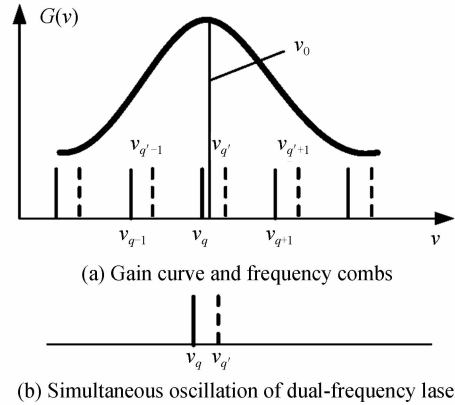


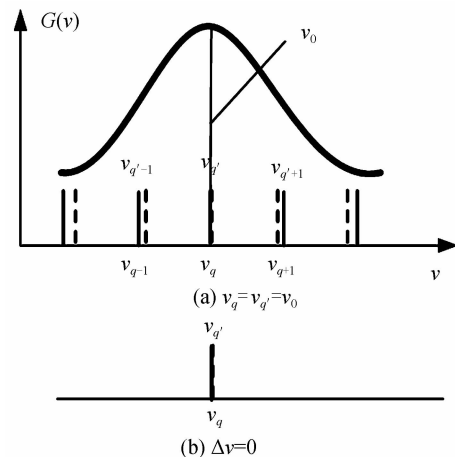
图 3 双频激光器振荡原理图

Fig. 3 Oscillation principle of dual-frequency laser

2.3 频差调谐原理

由激光原理可知, 激光器光学腔长每改变半个波长, 激光频率就会移动一个纵模间隔. 因此, 当改变加在 PZT 上的电压以微调腔长时, 可以调谐直线腔和直角腔的谐振频率.

假设直线腔和直角腔的纵模间隔分别为 $\Delta\nu_q$ 和 $\Delta\nu_{q'}$; 初始时 $\nu_q = \nu_{q'} = \nu_0$, 如图 4(a), 由 2.2 节分析可知, ν_q 和 $\nu_{q'}$ 优先起振, 即直线腔和直角腔的谐振频率分别为 ν_q 和 $\nu_{q'}$, 频差为 0, 处于频率简并状态, 如图 4(b). 通过增大直线腔的腔长, 使 ν_q 在频率轴上向左移动(频率变小); 同时, 通过减小直角腔腔长, 使 $\nu_{q'}$ 在频率轴上向右移动(频率变大), 这样双频激光的频差逐渐变大. 当 ν_q 在频率轴上向左移动 $\Delta\nu_q/2$, $\nu_{q'}$ 在频率轴上向右移动 $\Delta\nu_{q'}/2$ 时, 如图 4(c), 双频激光的频差达到最大(记作 $\Delta\nu_{\max}$), 如图 4(d). 如进一步调谐两谐振腔的腔长, 两个腔都将发生跳模现象, 频差减小. 可见, 这种双腔双频激光器的频差最小值为零, 频差最大值为 $(\Delta\nu_q + \Delta\nu_{q'})/2$.



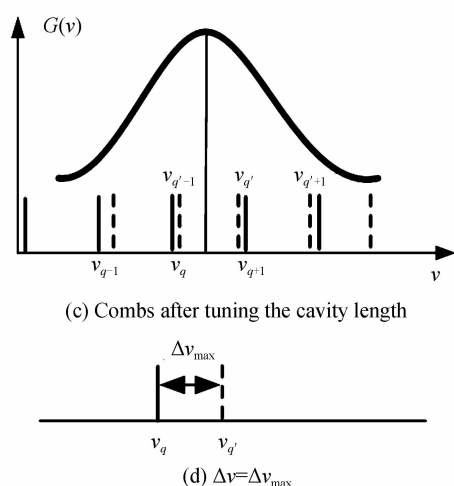


图4 频差调谐原理

Fig. 4 Tuning principle of frequency difference

3 实验研究及结果分析

LD泵浦1064 nm双腔双频Nd:YAG激光器实验系统如图2。LD最大出纤功率为2W；自聚焦透镜GL的节距为1/4，尺寸规格为 $\varnothing 2.6 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ ；两个1064 nm的 $\lambda/4$ 波片 QWP_1 和 QWP_2 为石英波片，其直径均为10 mm， QWP_1 左端面镀808 nm增透介质膜($T > 95\%$)和1064 nm高反膜(反射率 $R > 99.5\%$)，腔内一面(即右端面)镀808 nm和1064 nm双色增透介质膜(透过率 $T > 95\%$)，波片 QWP_2 两通光面均镀1064 nm增透介质膜(透过率 $T > 99.5\%$)；Nd:YAG晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ ，其通光长度为5.5 mm，原子掺杂浓度为1.1%，其左端面镀有对808 nm高透射($T > 95\%$)并对1064 nm全反射($R > 99.8\%$)的双色介质膜，其右端面镀有对1064 nm增透的介质膜；PBS尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ，它对p光透射率和对s光反射率分别为95%和99.9%；输出耦合镜OC的镜面直径10 mm，球面曲率半径为100 mm，球面镀有对1064 nm透过率为3.6%的介质膜。直线腔和直角腔的光学长度均约为50 mm，相应的纵模间隔都为3 GHz。

3.1 单腔单频激光振荡特性

在图2所示的激光系统中，在 OC_2 与 PBS_1 之间插入一挡光板以抑制直角腔的激光振荡，只让直线腔纵模起振。同理，在 OC_1 和 PBS_1 之间插入一挡光板以抑制直线腔的激光振荡，只让直角腔纵模起振。两个腔单独振荡时，实验测得直线腔和直角腔的阈值泵浦功率分别为190 mW和140 mW，当Nd:YAG晶体的端面泵浦功率为850 mW时，直线腔和直角腔输出功率分别为62 mW和75 mW。可见，直角腔的输出功率大于直线腔输出功率，并且其阈值泵浦功率也较小。这主要是

由于腔内 PBS_1 对s光的反射率大于对p光的透射率的缘故。

实验采用自由光谱范围为3.75 GHz的共焦扫描干涉仪观察激光的振荡模谱。直线腔和直角腔的振荡模谱如图5所示，可以看出，直线腔和直角腔均以单纵模振荡输出，说明扭转模腔具有有效的激光纵模选择能力。

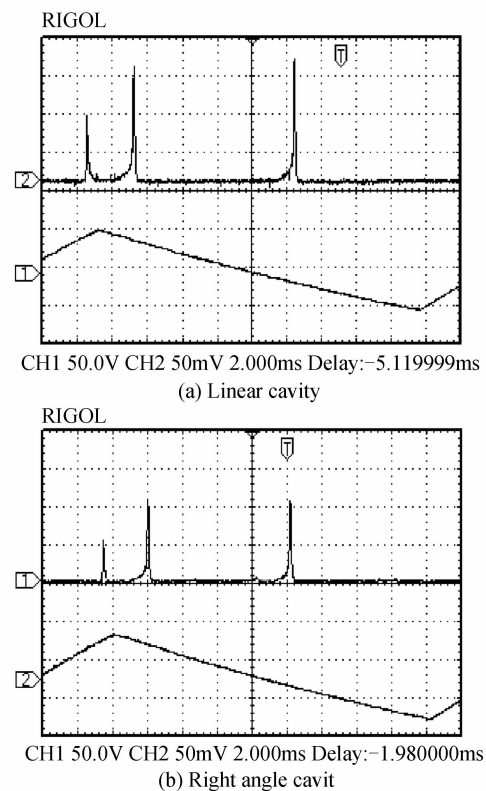


图5 激光振荡模谱

Fig. 5 Oscillating mode pattern

3.2 双腔双频激光同时振荡特性研究

在如图2所示扭转模结构双腔双频Nd:YAG激光系统中，当 QWP_1 和 QWP_2 的快轴互相垂直，并且 QWP_1 的快轴与 PBS_1 的P光透光轴和s光透光轴的夹角均为 45° 时，可使双腔同时以基横模单纵模振荡输出。当Nd:YAG晶体的端面泵浦功率为850 mW时，直线腔和直角腔输出总功率为53 mW。可见双腔同时振荡的输出功率小于单腔振荡时的输出功率，这是因为两个腔的损耗大于单腔的损耗。

3.2.1 频差调谐特性

在双腔同时以基横模单纵模振荡的情况下，将直线腔和直角腔输出的单纵模激光同时耦合进共焦扫描干涉仪，可以测得双腔同时振荡时的激光模谱，如图6所示，可以看出两个谐振腔的确均以单纵模振荡。当分别在输出耦合镜 OC_1 和 OC_2 后面用挡光板遮挡进入共焦扫描干涉仪的激光时，可以区分激光模谱图上的p光和s光。

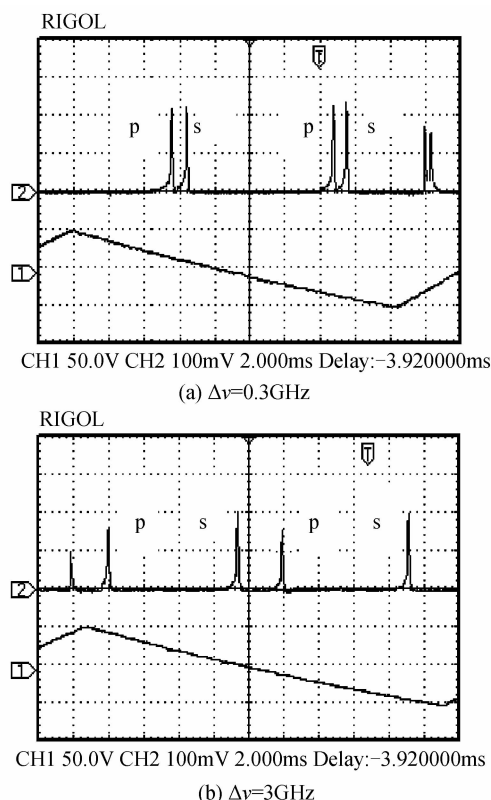


图6 双频激光振荡模谱

Fig. 6 Oscillating mode pattern of dual-frequency laser

调节 PZT₁ 的电压,使直线腔输出激光的模谱在频率轴上向左漂移,同时改变 PZT₂ 上的电压,使直角腔输出激光的模谱在频率轴上向右漂移,结果使双频激光的频差变大,如图 6(b),说明微调两个谐振腔的腔长的确能够调谐双频激光的频率和频差大小.在此基础上若再进一步调谐腔长,则两个腔内的振荡激光均将发生模式跳变,从而使频差变小.实验观察到的双频激光频差调谐范围为 0.3 GHz~3 GHz,最小频差接近于 0,最大频差约等于直线腔纵模间隔一半与直角腔纵模间隔一半的和.可见实验结果与 2.3 节理论分析一致.

3.2.2 偏振特性

为检验激光器输出激光的偏振状态,将格兰-泰勒棱镜置于精密旋转台上,在垂直于激光光轴的平面内旋转格兰棱镜.图 7 为激光透过率随格兰棱镜转角的变化曲线.可以看出,直线腔透过格兰棱镜的功率随转角呈正弦曲线变化,而直角腔透过格兰棱镜的功率随转角呈余弦规律变化,周期均为 180°,符合马吕斯定律,说明直线腔和直角腔输出的 1 064 nm 单频激光均为线偏振光,并且它们是偏振方向正交的 p 光和 s 光.

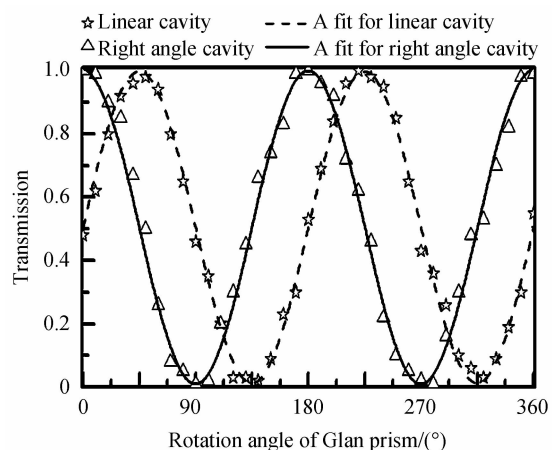


图7 激光透过率随格兰棱镜转角的关系

Fig. 7 Dependence of transmission of laser on the rotation angle of Glan prism

4 结论

本文在分析扭转模腔选模原理的基础上,采用 PBS 作为分光和起偏元件,设计了一种扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器,其两个谐振腔共用相同的激光增益介质,并同时以线偏振单纵模振荡输出.通过改变激光腔长,实现了双频激光的频差在 0.3 GHz~3 GHz 范围内连续调谐.这种连续可调谐双腔双频 Nd:YAG 激光器在激光干涉测量等领域具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] 焦明星,冯其波,王鸣,等. 激光传感与测量[M]. 北京:科学出版社,2014:120-121.
- [2] JIAO Ming-xing, XING Jun-hong, Liu Yun, *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.
焦明星,邢俊红,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.
- [3] WANG Jun-ying, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, *et al.* 1.12W single-frequency green laser adopting birefringent filter technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 321-324.
王军营,郑权,薛庆华,等. 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 321-324.
- [4] ZHANG Jing, LEI Hong-xiang, WANG Shao-kai, *et al.* All-solid-state single-frequency and intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with fold-cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(11): 971-973.
张靖,雷宏香,王少凯,等. 可调谐全固态折叠腔单频倍频 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(11): 971-973.
- [5] RROLLAND A, FREIN L, VALLET M, *et al.* 40-GHz photonic synthesizer using a dual-polarization microlaser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(23): 1738-1740.

- [6] DRAEGERT D A. Efficient single-longitudinal-mode Nd : YAG laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1972, **QE-8**(2): 235-239.
- [7] ZHENG Yao-hui, WANG Ya-jun, PENG Kun-chi. Single-end pumping single-frequency Nd : YVO₄/LBO laser with output power of 21.5W[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(6): 0602011.
郑耀辉,王雅君,彭堃墀. 输出功率为 21.5W 的单端抽运 Nd : YVO₄/LBO 单频激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602011.
- [8] ZHANG Jing, WANG Run-lin, MA Hong-liang, *et al.* Investigation of frequency tuning characteristics of LD-pumped single-frequency ring Nd : YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **30**(4): 473-477.
张靖,王润林,马红亮,等. LD 泵浦环形单频 Nd : YVO₄ 激光器的频率调谐特性研究[J]. *中国激光*, 2001, **30**(4): 473-477.
- [9] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. Twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(1): 142-143.
- [10] ADAMS C S, VORBERG J, MLYNEK J. Single-frequency operation of a diode-pumped lanthanum-neodymiumhexaaluminate laser by using a twisted-mode cavity[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(6): 420-422.
- [11] NAKAGAWA K, SHIMIZU Y, OHTSU M. High power diode-laser pumped twisted-mode Nd : YAG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**(4): 499-501.
- [12] FAN T Y, OCHOA J. Tunable single-frequency Yb : YAG laser with 1-W output power using twisted-mode technique [J]. *Photonics Technology Letters*, 1995, **7**: 1137-1138.
- [13] CHANG D I, GUY M J, HERNIKOV S V, *et al.* Single-frequency erbium fiber laser using the twisted-mode technique [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(19): 1786-1787.
- [14] POLYNKIN P, POLYNKIN A, MANSURIPUR M, *et al.* Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at 1.5 μ m by use of a twisted-mode technique[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(20): 2745-2747.
- [15] HAO E, TAN H, LI Te, *et al.* Single-frequency laser at 473 nm by use of twisted-mode technique [J]. *Optics Communications*, 2007, **270**: 327-331.
- [16] ZHANG Y, GAO C, GAO M, *et al.* A diode pumped tunable single-frequency Tm : YAG laser using twisted-mode technique[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, **7**(1): 17-20.
- [17] LIN Yue-ming, HE Hui-juan, LU Yu-tian. CW single-frequency operation of a diode laser-pumped Nd : YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 891-893.
林岳明,何慧娟,陆雨田. 激光二极管泵浦单频连续工作的 Nd : YAG 激光器[J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 891-893.
- [18] LU Cong-cong, ZHAO Chang-ming, WU Ke-ying. Investigation of two frequency laser in twisted-Mode cavity with fine detuning [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, **19**(3): 343-347.
卢葱葱,赵长明,吴克瑛. 利用微失调扭转模腔产生双频激光 [J]. *北京理工大学学报*, 1999, **19**(3): 343-347.