

# 大频差可调谐双频 Nd:YAG 激光器设计与实验研究

邢俊红 焦明星

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 为了产生大频差可调谐双频激光输出,利用偏振分光棱镜(PBS)的自然分光和起偏作用,将激光谐振腔分成正交的直线腔和直角腔,设计一种激光二极管端面抽运频差可调谐双频 Nd:YAG 激光器。该激光器的两个腔均采用双折射滤光片使 1064 nm 振荡激光的 p 和 s 偏振分量分别以单纵模振荡输出。理论分析双折射滤光片的选模原理和双频激光同时振荡原理,实验研究 1064 nm Nd:YAG 激光单纵模振荡特性和调频特性。实验观察到的 1064 nm 双频激光的频差调谐范围为 11.4~168.6 GHz,其最大频差达到 Nd:YAG 的荧光线宽。这种大频差可调谐 1064 nm 双频 Nd:YAG 激光器可广泛应用于激光干涉测量和激光光谱学等领域。

**关键词** 激光光学; 双频激光器; Nd:YAG 激光器; 双折射滤光片; 频差调谐

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051402

## Design and Experimental Study of Tunable Dual-Frequency Nd:YAG Laser with Large Frequency Difference

Xing Junhong Jiao Mingxing

School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** In order to obtain the tunable dual-frequency laser with large frequency difference, a laser diode end-pumped dual-frequency Nd:YAG laser with tunable frequency difference has been designed, using the light splitting and polarizing functions of the polarizing beam splitter (PBS) to form perpendicular straight and right angle standing-wave cavities. Both cavities employ birefringent filters acting as laser axial mode selectors. The p- and s-component of 1064 nm laser light can therefore be forced to oscillate simultaneously in single longitudinal mode. The principles of single longitudinal mode selection by birefringent filter and the simultaneous oscillation of the dual-frequency laser have been theoretically analyzed, and the characteristics of Nd:YAG laser with single longitudinal mode oscillation at 1064 nm and frequency difference tuning have been investigated experimentally. It has been observed experimentally that the frequency difference of the dual-frequency laser at 1064 nm is tunable in a range from 11.4 GHz to 168.6 GHz, the maximum frequency difference has reached the fluorescence line width of Nd:YAG. Such a dual-frequency Nd:YAG laser can be used for laser interferometric measurement, laser spectroscopy and other fields.

**Key words** laser optics; dual-frequency laser; Nd:YAG laser; birefringent filter; frequency difference tuning

**OCIS codes** 140.3480; 140.3530; 140.3580; 140.3600

## 1 引言

可调谐双频激光器被广泛应用于干涉测量、微波光电子和激光雷达等领域。自 1997 年 Brunel 等<sup>[1]</sup>初次实现固体双频激光器的频差可调谐输出以来,可调谐双频 Nd:YAG 激光技术发展迅速,并取得了一系列重要研究成果<sup>[2-14]</sup>。其中双折射双频激光器具有结构简单、易于集成等优点,成为双频激光器的研究重点和发展主流。双折射双频激光器是在保证激光器以单纵模振荡的条件下,利用一些物理效应,如塞曼效应、光弹效应、电光和热光效应等使单纵模产生分裂,从而获得正交偏振双频激光同时振荡输出,这种双频激光器输

收稿日期: 2014-11-03; 收到修改稿日期: 2014-12-24; 网络出版日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51175421, 61205135)

作者简介: 邢俊红(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光技术及器件等方面的研究。E-mail: xjh3729@xaut.edu.cn

导师简介: 焦明星(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术等方面的研究。E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn

出的最大频差为激光谐振腔的一个纵模间隔,频差调谐范围往往较小。文献[14]报道了本课题组设计的一种双腔双频全固态 Nd:YAG 激光器,以偏振分光棱镜(PBS)和半波片组成的双折射滤光片作为激光纵模选择元件,两个驻波谐振腔(直线腔和直角腔)共用双折射滤光片和激光介质,使 1064 nm 激光的 p 分量和 s 分量分别在直线腔和直角腔内同时以单纵模振荡。但该方案存在选模能力有限等不足之处,为进一步扩大频差调谐范围和简化结构,本文采用方解石晶片作为双折射晶体,与腔内偏振分光棱镜组成两个独立的双折射滤光片,在此基础上设计一种大频差可调谐 1064 nm 双频 Nd:YAG 激光器,实验获得的频差调谐范围为 11.4~168.6 GHz,可使双频激光的频差在激光晶体整个荧光范围内进行调谐。

## 2 双频 Nd:YAG 激光器设计方案

1064 nm 双频 Nd:YAG 激光器设计方案如图 1 所示。系统采用激光二极管(LD)作为抽运源,从 LD 尾纤 OF 出射的 808 nm 抽运光经自聚焦透镜 GL 会聚到 Nd:YAG 晶体的左端面,该面是曲率半径为 180 mm 的球面,镀有对 1064 nm 振荡激光高反、同时对 808 nm 抽运光增透的双色介质膜作为谐振腔的后反射镜;Nd:YAG 晶体的右端面镀 1064 nm 增透膜;沿 GL 的光轴并在 Nd:YAG 晶体的右侧依次设置 PBS 和方解石晶片 BOC<sub>1</sub>,在垂直于 GL 的光轴方向并与 PBS 相对应的位置设置方解石晶片 BOC<sub>2</sub>。BOC<sub>1</sub>和 BOC<sub>2</sub>在激光腔内的端面均镀有 1064 nm 增透介质膜,另一端面镀反射率均为 97.76%的介质膜,分别作为激光输出镜。这样 Nd:YAG 晶体左端面介质膜与 BOC<sub>1</sub>构成直线型驻波谐振腔(简称直线腔),Nd:YAG 晶体左端面介质膜与 BOC<sub>2</sub>构成直角型驻波谐振腔(简称直角腔),并且两个腔有各自选模元件 PBS-BOC。直线腔和直角腔输出 1064 nm 激光经平面反射镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>和 PBS<sub>1</sub>合光,实现同轴输出。

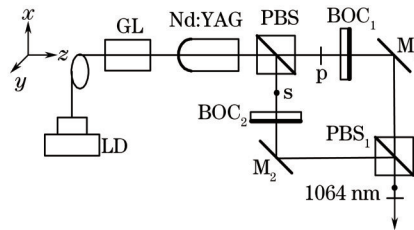


图 1 1064 nm 双频 Nd:YAG 激光系统

Fig.1 Scheme of dual-frequency Nd:YAG laser system at 1064 nm

## 3 设计原理

### 3.1 双频激光同时振荡原理

对于方解石晶体 BOC<sub>1</sub>和 BOC<sub>2</sub>,光波沿垂直于光轴的方向往返传播通过时,p 光和 s 光之间产生的相位差  $\delta_p$  和  $\delta_s$  为<sup>[15]</sup>

$$\delta_p = \delta_s = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n l, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为振荡激光波长;  $\Delta n$  和  $l$  分别为方解石晶体 BOC<sub>1</sub>和 BOC<sub>2</sub>的双折射率和几何长度。由(1)式可以推导出 PBS-BOC 的自由光谱范围(即相邻两透射极大峰的频率间隔) $R_{fs}$ 和损耗调制度(相邻两纵模的相位差)分别为

$$R_{fs} = \frac{c}{2\Delta n l}, \quad (2)$$

$$\Delta\delta = \frac{2\pi\Delta n l}{L}, \quad (3)$$

式中  $L$  为谐振腔的长度,  $\lambda = 1.064 \times 10^{-6}$  m,  $\Delta n = 0.16$ ,  $n_0 = 1.658$ , 激光谐振腔光学腔长  $L = 25$  mm。考虑到插入损耗和加工需要,实验中方解石晶片的厚度取 3 mm。由(2)式和(3)式可得  $R_{fs} = 312$  GHz,  $\Delta\delta = 3.28^\circ$ 。

由以上分析和计算可知,这种双折射滤光片的  $R_{fs}$  大于激光器的增益带宽  $\Delta\nu_{osc}$  (约 160 GHz),如图 2(a)、(c)所示,两个腔存在 p 模和 s 模两种纵模,如图 2(b)所示,并且相邻激光纵模在双折射滤光片透射峰处的损耗差别  $\Delta\delta$  足够大,这样 1064 nm 的 p 偏振分量和 s 偏振分量均以单纵模振荡输出,即直线腔和直角腔均输出 1064 nm 单频激光,如图 2(d)所示。

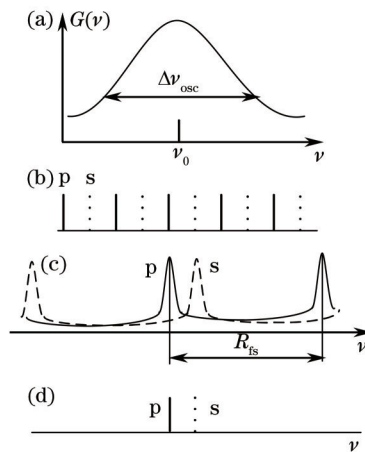


图2 双频激光振荡原理。(a) 增益曲线; (b) 激光腔频率梳; (c) 双折射滤光片透射率曲线; (d) 激光振荡模  
Fig.2 Oscillation principle of dual-frequency laser. (a) Gain curve; (b) frequency comb of laser cavity;  
(c) transmission curves of birefringent filter; (d) laser oscillating modes

### 3.2 频率调谐原理

由(2)式可知,微调  $\Delta n$  或  $l$ , 可调谐  $R_{fs}$  的大小, 使双折射滤光片的透射峰在频率轴上移动, 这样就可以选出不同的激光纵模, 实现频率调谐。

激光振荡频率  $\nu$  与  $R_{fs}$  的关系为

$$\nu = mR_{fs}, \quad (4)$$

式中  $m$  为正整数, 表示双折射滤光片透射峰的级次。对于 1064 nm 的激光,  $m \approx 900$ , 对(4)式求导得

$$\Delta\nu = m\Delta R_{fs}. \quad (5)$$

如要双折射滤光片的透射峰在激光晶体荧光线宽内移动, 即  $\Delta\nu = 150$  GHz, 则要使  $R_{fs}$  变化量为

$$\Delta R_{fs} = \frac{\Delta\nu}{m} \approx 0.16 \text{ GHz}. \quad (6)$$

光在方解石晶体中的传播路径如图3所示,  $\theta$  为入射角,  $\eta$  为折射光线和光轴的夹角,  $\varphi$  是入射面与光轴和法线  $N$  组成平面形成的夹角,  $\theta_1$  是折射角,  $k$  是折射光线波法线。光轴与方解石晶体入射面平行, 在入射面内, 往返通过晶体后产生的相位差为

$$\delta = \frac{4\pi\Delta nl}{\lambda} \cdot \frac{1}{\cos\theta_1}. \quad (7)$$

根据斯涅尔定律:

$$n_1 \sin\theta = n_2 \sin\theta_1, \quad (8)$$

式中  $n_1$  为空气的折射率,  $n_2 = n_0$ , 因此可得

$$R_{fs} = \frac{c}{2\Delta nl} \cos\left[\arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n_0}\right)\right]. \quad (9)$$

当  $\theta = 2.5^\circ$  时,  $\Delta R_{fs} \approx 0.16$  GHz, 即当方解石与腔轴的夹角调谐量为  $2.5^\circ$  时, 透射峰的移动量达到了激光晶体整个荧光线宽。

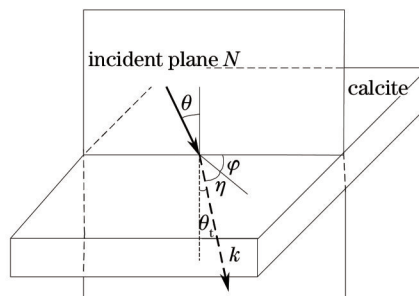


图3 光在方解石晶体中的传播路径  
Fig.3 Propagation path of light in calcite crystal

## 4 实验结果和分析

建立如图1所示激光实验系统, PBS的透光轴与方解石晶体光轴平行, 方解石晶体BOC<sub>1</sub>和BOC<sub>2</sub>的快轴(慢轴)与方解石晶体光轴夹角为45°, 此时双折射滤光片的对比度  $D = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{1}{1 - \sin^2(2\varphi)} = \sec^2(2\varphi)$  最大, 对次峰的抑制能力最强<sup>[15]</sup>。

实验所用LD的最大功率为2 W, LD尾纤的芯径为100 μm, 数值孔径NA=0.22; 自聚焦透镜GL的尺寸为φ2.6 mm×6.5 mm, 数值孔径NA=0.6; Nd:YAG晶体的尺寸为3 mm×3 mm×5 mm(通光长度为5 mm); PBS和PBS<sub>1</sub>的尺寸均为5 mm×5 mm×5 mm, p光透射率和s光反射率分别为95%和99%; BOC<sub>1</sub>和BOC<sub>2</sub>的尺寸均为φ12 mm×3 mm; 直线腔和直角腔的光学长度约为25 mm。

### 4.1 单腔振荡特性

图1所示的激光系统中, 在BOC<sub>2</sub>与PBS之间插入挡光板, 可以抑制直角腔的激光振荡, 而只让直线腔起振。同理, 在BOC<sub>1</sub>和PBS之间插入挡光板, 可以只让直角腔起振。实验测得直线腔的功率阈值为483 mW, 当Nd:YAG晶体的端面抽运功率为850 mW时, 从BOC<sub>1</sub>输出的1064 nm激光功率为36 mW。直角腔的功率阈值为386 mW, 当Nd:YAG晶体的端面抽运功率为850 mW时, 从BOC<sub>2</sub>输出的1064 nm激光功率为49 mW。直角腔输出功率大于直线腔输出功率的原因是PBS对s光的反射率小于对p光的透射率, 直角腔的损耗小于直线腔, 因而其功率阈值也较小。

#### 4.1.1 横模特性

微调自聚焦透镜与Nd:YAG左端面之间的距离, 使振荡激光与抽运光模式匹配良好, 激光器输出的激光光斑为规则的圆形。用电荷耦合元件(CCD)相机分别采集直线腔和直角腔的光斑图像, 经数字图像处理获得的激光光斑三维能量分布如图4所示。可见, 两个腔输出激光的光束对称性都很好, 光强按高斯规律分布, 可以认为输出的激光横模均为基横模。

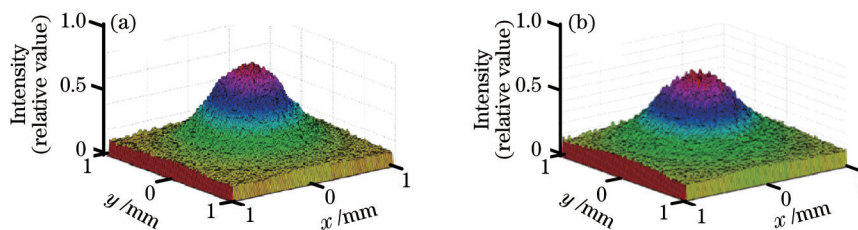


图4 激光横模光斑3D能量分布图。(a) 直线腔; (b) 直角腔

Fig.4 3D energy distribution of laser transverse mode pattern. (a) Linear cavity; (b) right angle cavity

#### 4.1.2 选模特性

实验采用自由光谱范围为3.75 GHz的法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪观测1064 nm激光的输出模式, 激光器振荡模谱如图5所示。在锯齿波信号的一个上升沿中, 同一个纵模被扫描了两次, 由F-P扫描干涉仪的原理可知, 激光谐振腔实现了单纵模振荡, 说明由PBS和BOC组成的双折射滤光片具有较强的激光单纵模选择能力, 直线腔和直角腔均以单纵模振荡。

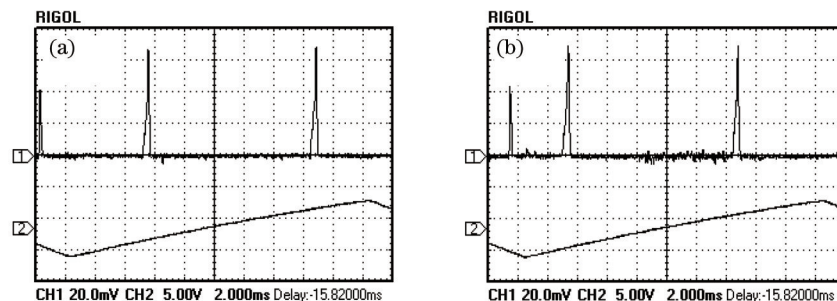


图5 激光振荡模谱。(a) 直线腔; (b) 直角腔

Fig.5 Oscillating mode patterns. (a) Linear cavity; (b) right angle cavity

#### 4.1.3 偏振特性

实验采用旋转格兰-泰勒棱镜法检验激光器输出激光的偏振状态<sup>[15]</sup>。图6为激光透射率T随格兰-泰勒

棱镜转角的变化曲线。可以看出,直线腔透过格兰-泰勒棱镜的功率随转角呈正弦曲线变化,而直角腔透过格兰-泰勒棱镜的功率随转角呈余弦规律变化,周期均为  $180^\circ$ ,与马吕斯定律相符。说明直线腔和直角腔输出的  $1064\text{ nm}$  单频激光均为线偏振光,并且分别是偏振方向正交的 p 光和 s 光。

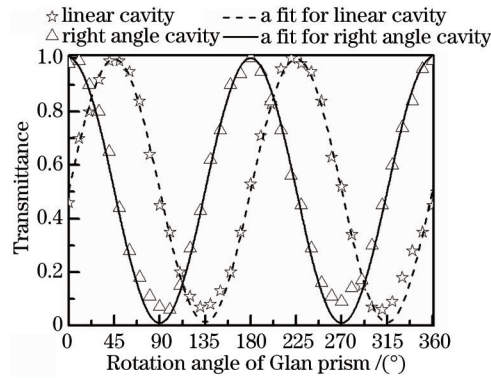


图6 激光透射率与格兰棱镜转角的关系

Fig.6 Dependence of laser transmittance on the rotation angle of Glan prism

#### 4.2 双腔同时振荡特性

移去挡光板,使直线腔和直角腔同时振荡输出。图7所示为用 F-P 扫描干涉仪观测到的  $1064\text{ nm}$  双频激光的输出模式,可见两个腔均以单纵模振荡。用挡光板遮挡在输出镜后,很容易区分 p 光和 s 光。

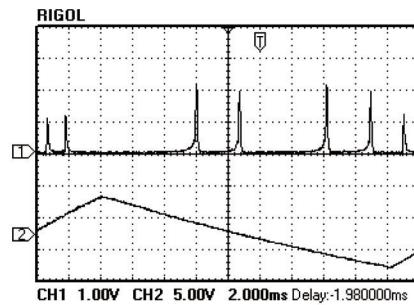


图7 双腔同时振荡模谱

Fig.7 Mode patterns of simultaneous dual-frequency oscillation

为测量  $1064\text{ nm}$  双腔双频激光的波长调谐量(频差调谐量),将经  $\text{PBS}_1$  合光后同轴输出的正交线偏振双频激光耦合进 AQ6317C 型光谱分析仪测量其振荡光谱。通过微调方解石晶片与腔轴的夹角,实验获得两个

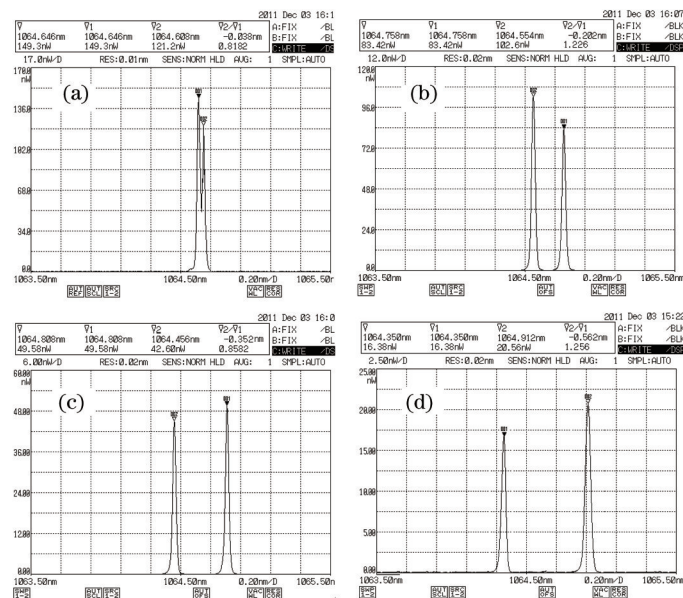


图8 双频激光光谱。(a)  $\Delta\lambda = 0.038\text{ nm}$ ; (b)  $\Delta\lambda = 0.202\text{ nm}$ ; (c)  $\Delta\lambda = 0.352\text{ nm}$ ; (d)  $\Delta\lambda = 0.562\text{ nm}$

Fig.8 Spectra of dual-frequency laser. (a)  $\Delta\lambda = 0.038\text{ nm}$ ; (b)  $\Delta\lambda = 0.202\text{ nm}$ ; (c)  $\Delta\lambda = 0.352\text{ nm}$ ; (d)  $\Delta\lambda = 0.562\text{ nm}$

腔的波长调谐范围为 0.038~0.562 nm, 对应频差调谐范围为 11.4~168.6 GHz。图 8 为几个典型双频光谱图。其中, 较短波长的光波为直线腔输出激光, 较长波长的光波为直角腔输出的激光。

## 5 结 论

采用 PBS 和方解石晶片 BOC 组成的新型双折射滤光片作为激光纵模选择元件, 将其置于 LD 抽运谐振腔内, 获得了 1064 nm 激光 p 分量和 s 分量分别在直线腔和直角腔内同时以单纵模振荡输出。通过调谐方解石与腔轴的夹角, 可以实现双频激光的频差调谐。实验结果表明, 1064 nm 双频激光的频差调谐范围为 11.4~168.6 GHz, 最大频差达到 Nd:YAG 的荧光 linewidth。

## 参 考 文 献

- 1 M Brunel, F Bretenaker, A Le Floch, *et al.*. Tunable optical microwave source using spatially resolved laser eigenstates[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(5): 384-386.
- 2 M Brunel, O Emilf, F Bretenaker, *et al.*. Tunable two frequency lasers for lifetime measurements[J]. *Opt Rev*, 1997, 4(5): 550-552.
- 3 M Brunel, F Bretenaker, S Blanc, *et al.*. High-spectral purity RF beat note generated by a two-frequency solid-state laser in a dual thermooptic and electrooptic phase-locked loop[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(3): 870-872.
- 4 M Brunel, A Amon, M Vallet. Dual-polarization microchip laser at 1.53  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(18): 2418-2420.
- 5 A Rrolland, L Frein, M Vallet, *et al.*. 40-GHz photonic synthesizer using a dual-polarization picrolaser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(23): 1738-1740.
- 6 V G Gudelev, V V Mashho, N K Nikeenko, *et al.*. Diode-pumped cw tunable two-frequency YAG:Nd<sup>3+</sup> laser with coupled resonators[J]. *Appl Phys*, 2003, 76(3): 249-252.
- 7 J Le Gouet, L Morvan, M Alouini, *et al.*. Dual-frequency single-axis laser using a lead lanthanum zirconate tantanate (PLZT) birefringent etalon for millimeter wave generation: Beyond the standard limit of tunability[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(9): 1090-1092.
- 8 A McKay, P Dekker, D W Coutts, *et al.*. Enhanced self-heterodyne performance using a Nd-doped ceramic YAG laser[J]. *Opt Commun*, 2007, 272(2): 425-430.
- 9 A McKay, J M Dawes. Tunable terahertz signals using a helicoidally polarized ceramic microchip laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(7): 480-482.
- 10 Wu Xia, Yang Suhui, Chen Ying, *et al.*. Tunable two-frequency solid-state laser with coupled-cavity configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0314003.  
吴 霞, 杨苏辉, 陈 颖, 等. 耦合腔结构可调谐双频固体激光器的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0314003.
- 11 Jiao Mingxing, Zhang Shulian, Liang Jinwen. Birefringent dual-frequency Nd:YAG laser with large frequency-difference [J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(2): 100-102.  
焦明星, 张书练, 梁晋文. 大频差双折射双频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, 28(2): 100-102.
- 12 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Liu Yun, *et al.*. Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid-state laser with large frequency difference[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 367(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, 367(11): 2784-2789.
- 13 Li Lei, Zhao Changming, Zhang Peng, *et al.*. The study on diode-pumped two-frequency solid-state laser with tunable frequency difference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2663-2669.  
李 磊, 赵长明, 张 鹏, 等. 激光二极管抽运频差可调谐双频固体激光器的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(5): 2663-2669.
- 14 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.
- 15 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Liu Yun. Design and experimental study of electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser at 1064 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302007.  
焦明星, 邢俊红, 刘 芸. 电光可调谐 1064 nm 单频 Nd:YAG 激光器设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302007.

栏目编辑: 吴秀娟