

doi:10.3788/gzxb20184709.0914004

# 基于 Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 组合晶体的双波长 激光器实验研究

韩宁<sup>1</sup>, 胡森<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>2,3</sup>, 金涛<sup>1</sup>, 冯冰<sup>1</sup>, 欧军<sup>1</sup>, 周雪芳<sup>1</sup>, 杨国伟<sup>1</sup>, 卢旻<sup>1</sup>, 毕美华<sup>1</sup>

(1 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

(2 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

(3 防化研究院, 北京 102205)

**摘 要:** 设计了基于 Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 组合晶体的双波长激光器, 研究了双波长激光器的热效应以及双波长信号的频率差调谐特性. 实验中固定抽运功率, 调节组合晶体的温控温度从 5 °C 上升到 40 °C, 测得双波长信号的频率差从 351.11 GHz 下降到 316.14 GHz, 频率差与温控温度呈负线性关系, 斜率为 -0.95 GHz/°C. 对于实验结果, 从掺钕晶体发射谱的温度漂移特性角度进行了分析, 发现激光波长漂移由晶体发射谱随温度的漂移引起, 双波长信号的频率差变化则由不同晶体的温度漂移速率不同引起; 分析结果与双波长激光器频率差实验结果符合较好.

**关键词:** 双波长激光器; 抽运; 外差拍频; 激光调谐; 微波

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0914004-6

## Experimental Study on the Dual-wavelength Laser Based on the Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> Combined Crystal

HAN Ning<sup>1</sup>, HU Miao<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>2,3</sup>, JIN Tao<sup>1</sup>, FENG Bing<sup>1</sup>, OU Jun<sup>1</sup>,  
ZHOU Xue-fang<sup>1</sup>, YANG Guo-wei<sup>1</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, BI Mei-hua<sup>1</sup>

(1 College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(2 State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

(3 Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract:** A Dual-Wavelength Laser (DWL) based on the Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> combined crystal was presented. The thermal effect and the frequency-separation tuning mechanism of the DWL were investigated. In the experiments, with fixed pumping power, when the heat sink temperature of the combined crystal increased from 5 °C to 40 °C, the frequency separation of the DWL signal decreased from 351.1 GHz to 316.1 GHz, the frequency separation decreasing rate was measured as -0.95 GHz/°C. For the experimental results, it was found that the wavelength shifting of the DWL signal is mainly caused by the Emission Cross Section (ECS) spectra shifting of the laser crystals with the temperature varying, and the change of the frequency separation is caused by different ECS spectral shifting rates of the crystals. The analysis results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** Dual-wavelength lasers; Pumping; Heterodyning; Laser tuning; Microwave

**OCIS Codes:** 140.3518; 140.3530; 140.3600; 140.6810

基金项目: 国家自然科学基金(No.61705055), 国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(No.SKLNBC2015G03)资助

第一作者: 韩宁(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为双频激光器方面的研究. Email: 1083567948@qq.com

导 师: 胡森(1982-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为大功率 LED 技术、激光技术. Email: miao\_hu@foxmail.com

通讯作者: 李鹏(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光辐射测量. Email: lipeng@sklnbcpc.cn

收稿日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-05-25

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

## 0 引言

频率差在 0~10 THz 的双频/双波长激光信号在很多领域有潜在的应用,如光生微波/毫米波<sup>[1-6]</sup>、多普勒激光雷达<sup>[7-10]</sup>和光生太赫兹波等<sup>[11-16]</sup>.近年来,国内外对双频/双波长激光器的增益介质材料研究较多.目前可用于双频/双波长激光器的增益介质主要包括:Nd:YAG 晶体,Nd:YLF 晶体,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,Er:Yb:glass 玻璃和掺 Yb 离子晶体等.2009 年,MCKAY Aaron 等利用垂直腔 Nd:YAG 微片激光器,通过电控腔内 LiTaO<sub>3</sub> 晶体调整光学腔长,获得最大频率差为 0.15 THz 的可调谐双频激光信号输出<sup>[17]</sup>.2011 年,ZHAO Pu 等利用两块 Nd:YLF 晶体构成 Y 型腔,获得 1 047 nm 和 1 053 nm 双波长信号输出,频率差为 1.64 THz<sup>[13-14]</sup>.2012 年,胡森等采用亚毫米厚度的双掺杂 Nd<sup>3+</sup>:Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体,实现了频率差为 85 GHz 的同步双频脉冲序列输出<sup>[18]</sup>.2015 年,HUANG Y J 等<sup>[19]</sup>利用由 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体构成双波长激光器,并通过非线性晶体 KTP 参量振荡,获得自调 Q 双波长激光脉冲输出,激光波长分别为 1 570.36 nm 和 1 572.55 nm,频率差达 320 GHz.2016 年,ROLLAND Antoine 等采用 Er:Yb:glass 双轴共腔双频激光器,通过倾斜标准具和电控腔内 LiNbO<sub>3</sub> 晶体实现了频率差粗调谐和细调谐<sup>[1,12,20]</sup>,获得线宽小于 30 kHz、频率差在 0~1.0 THz 可调谐的双频激光信号输出.

上述双频/双波长激光器采用了不同的增益介质,获得了不同频率差的双频/双波长激光信号.本文提出基于两掺钕介质(Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub>)组合晶体的可调谐双波长激光器,其工作原理是采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的发射峰直接选取双频波长,利用发射峰的热致漂移特性实现频率差调谐功能,进一步发展了 HUANG Y J 的实验装置.这种基于组合晶体的双波长激光器结构简单,且可获得大频差的可调谐双波长信号输出,对于外差光生毫米波技术的发展来说具有重要的意义.

## 1 实验装置

本实验使用的 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体如图 1 (a)所示.Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体均为 a-cut 切割,Nd<sup>3+</sup> 离子掺杂浓度均为 1.0 at.%,横截面尺寸均为 3 mm×3 mm;前端 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体厚度为 1 mm,后端 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体厚度为 5 mm.组合晶体的四个端面分别镀膜,前端抽运光入射面镀高反射膜(HR@1 064 nm)和增透膜(AR@808 nm),后端激光出射面镀增透膜(AR@1 064 nm),结合部分两个端面都镀增透膜(AR@808 nm & 1 064 nm).前端 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体部分 1 mm 厚度的设计目的是为了使抽运光能够穿过 Nd:YVO<sub>4</sub> 入射到后端 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体;考虑 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的发射截面相对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体较小,因此为了使双波长信号均衡输出,设计后端 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体相对前端 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体较厚,为 5 mm.如图 1 右边(b)所示,为组合晶体在室温 20 °C 下的  $\pi$ -偏振分量的发射谱,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体分别在 1 064.14 nm 和 1 062.85 nm 处贡献了相近的光谱强度,此时组合晶体的发射谱频率差为 343.75 GHz.

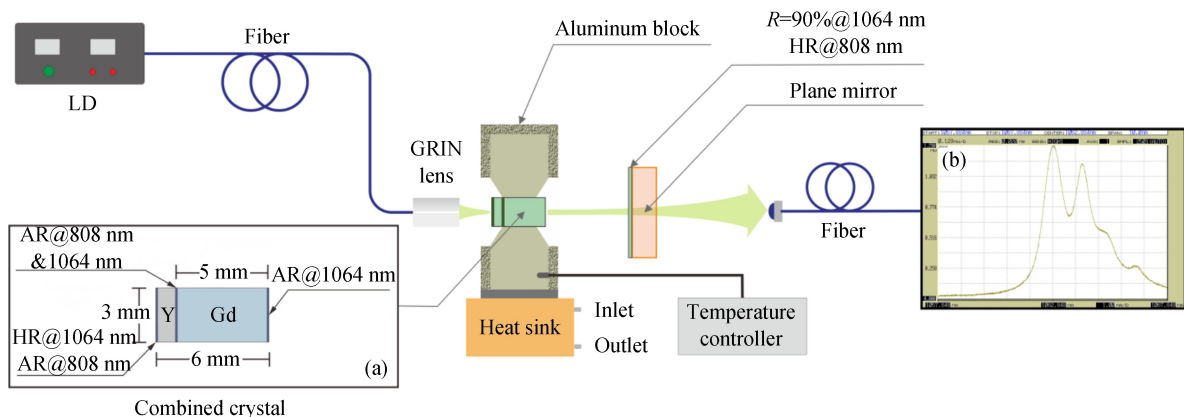


图 1 实验装置

Fig.1 The experimental setup

图 1 为组合晶体作为增益介质的双波长激光器示意图.其中抽运源选用中心波长为 808 nm 的激光二极管

管(LD),尾纤输出的抽运光经过 GRIN 透镜,耦合到组合晶体中心.在组合晶体后面放置有一块部分反射镜( $R=90\% @ 1\ 064\ \text{nm}$ ),两者构成 F-P 谐振腔.为了对组合晶体进行精密温控,在晶体外部包裹 0.1 mm 厚的钢膜,使晶体和热沉充分热接触.热沉外部连接 TEC 温控,采用水循环装置对 TEC 进行散热,最终实现的温控精度为 0.1 °C.输出的双波长激光信号通过多模光纤耦合到分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(AQ6370B,日本横河电机株式会社)进行测量.

## 2 实验结果分析

### 2.1 激光谱和晶体发射谱输出特性分析

在双波长激光实验过程中,固定 LD 的抽运功率为 3.0 W,调整组合晶体的温控温度,等待组合晶体达到热稳定状态,当 10 分钟光谱稳定性优于 98%之后,用光谱分析仪记录各温度条件下的双波长激光谱.分析双波长信号与温控温度的关系;并依据频率差—波长差的计算公式: $\Delta\nu = c/\lambda_1 - c/\lambda_2$ ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别是信号的左、右两个频率峰的中心波长),计算激光谱频率差与温控温度的关系.如图 2 所示,分别是温控温度为 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C 和 40 °C 时双波长信号的激光谱.

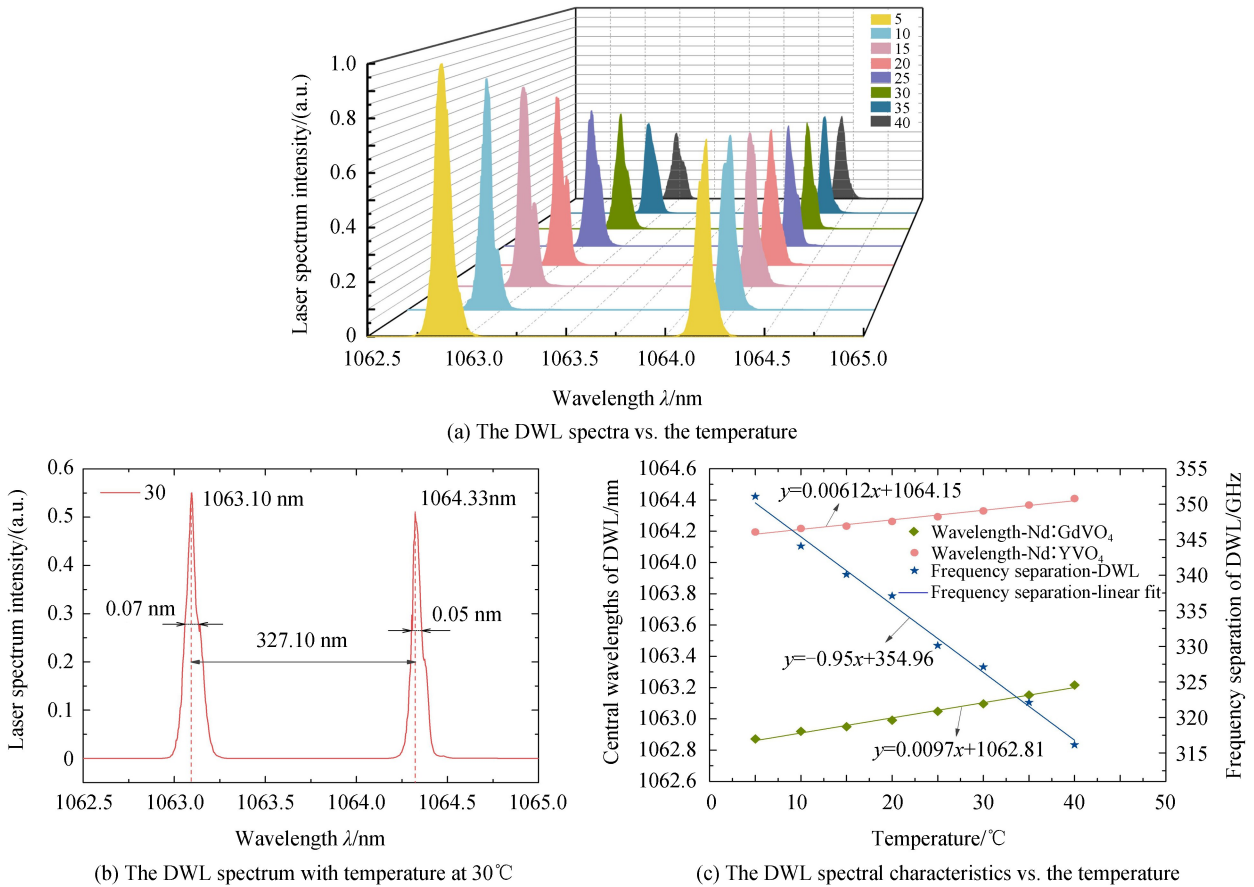


图 2 双波长激光器的输出光谱特性

Fig.2 The spectral characteristics of the DWL

从图 2(a)中可知,双波长信号在 1 063 nm 和 1 064 nm 附近出现两个波峰,随着温控温度的增加,左峰与右峰均向长波方向漂移,输出双波长信号的总功率均呈整体下降趋势.如图 2(b)所示,当温控温度为 30 °C 时,双波长左峰的中心波长为 1 063.10 nm,右峰的中心波长为 1 064.33 nm,波峰中心相差约为 1.23 nm,计算频率差为 327.10 GHz,此时双波长信号左右峰的线宽分别约为 0.07 nm、0.05 nm.根据图 2(c),当温控温度从 5 °C 变化到 40 °C 时,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体产生的激光信号中心波长从 1 062.87 nm 红移到 1 063.21 nm,中心波长随温控温度的漂移为近似线性,漂移率为 9.70 pm/°C;Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体产生激光信号中心波长从 1 064.20 nm 红移到了 1 064.41 nm,中心波长随温控温度的漂移也近似为线性,漂移率为 6.12 pm/°C.双波

长信号的频率差从 351.11 GHz 减少到 316.14 GHz,斜率约为  $-0.95 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ .实验结果表明,激光波长与温控温度呈准线性关系,左右峰中心波长随温度的漂移率不同,导致双波长信号的频率差随温控温度的上升而下降.

## 2.2 发射谱与激光谱频率差分析

讨论双波长信号的频率差随温控温度变化的原理.考虑本实验中激光纵模间隔相对于发射谱宽度很小,因此组合晶体发射谱中心波长决定了输出的激光波长.即在组合晶体发射谱的峰值处,激光阈值最低,最容易辐射对应波长的激光信号.而根据参考文献<sup>[21-22]</sup>,掺钕介质的发射谱的中心波长随温度变化会发生漂移,因此在本实验中 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的发射谱中心波长随温度的漂移特性不同将引起双波长信号的频率差的变化.根据上述原理,采用实验所用的参数,通过有限元方法对 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体的双波长激光器进行热分析建模.考虑在进行组合晶体发射谱特性测量实验时,由于抽运光的吸收较小,其量子亏损在组合晶体内部产生热沉积可以忽略,因此 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心温度、Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体中心温度与温控温度三者相等,并无温差.而在双波长激光器稳定运行时,抽运光吸收所产生的热效应较为严重.通过仿真可知,激光稳定运行时组合晶体的中心温度与温控温度呈正相关线性关系.代入实验参数进行仿真计算,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心温度与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体中心温度的温差为 24.3 °C,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体中心温度与温控温度的温差为 23.7 °C,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心温度与温控温度的温差为 52 °C.即在双波长激光实验中,当温控温度在 5 °C~40 °C 变化时,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的中心温度为 28.7 °C~63.7 °C,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心温度为 57 °C~92 °C.

首先对组合晶体的发射谱进行测量.固定 LD 抽运功率为 3.0 W,当温控温度在 5 °C~95 °C 时,等待组合晶体达到热稳定状态,当 10 分钟光谱稳定性优于 98% 之后,采用光谱分析仪记录下的组合晶体的发射谱.组合晶体的发射谱中心波长与温控温度之间的关系,如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,随着温控温度从 5 °C 变化到 95 °C 过程中,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的发射谱中心波长从 1 062.90 nm 漂移到 1 063.09 nm,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体发射谱中心波长从 1 064.13 nm 漂移到 1 064.39 nm;图中(a)、(b)分别为温控温度为 5 °C 和 85 °C 时的发射谱图.图 3 中虚线框中所示的分别为 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在 57 °C~92 °C 和 28.7 °C~63.7 °C 范围附近发射谱的中心波长.

为了分析激光谱与发射谱之间的联系,从中心波长与频率差两方面,比较了双波长激光器和组合晶体的输出特性.如图 4 所示,根据热仿真结果,当双波长激光器在温控温度为 5 °C~40 °C 时,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体中心温度为 28.7 °C~63.7 °C,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心温度为 57 °C~92 °C.根据图 3 组合晶体的发射谱,将 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射谱中心波长随温度变化的点分别横向移动温度差 23.7 °C 和 52 °C,获得如图 4(a)所示的中心波长图.依据频率差—波长差公式计算得到发射谱频率差和激光谱频率差,与温控温度的关系,如图 4(b)所示.

图 4(a)分别展示了组合晶体发射谱中心波长和激光谱中心波长与温控温度的关系,从图中可以看出,组合晶体发射谱中心波长漂移与激光谱中心波长漂移总体上比较符合,略微的偏差是实验测量误差引起的.如图 4(b)所示,双波长信号频率差均随温控温度的上升而减小,与温控温度成负线性关系,频率差下降率为  $-0.95 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ .而发射谱频率差的改变也在激光信号频率差附近变化,当温控温度从 5 °C 变化到 40 °C 时,发射谱频率差从 357.68 GHz 逐渐下降到了 315.20 GHz,标准误差为 3.30 GHz,与双波长信号频率差符合较好.因此 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的发射谱随温度的漂移特性不同,引起了双波长信号频率差变化的结论得到了证实.

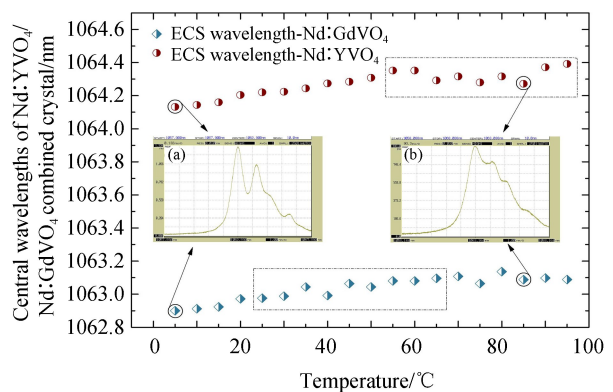


图 3 组合晶体发射谱与温控温度的关系

Fig.3 The ECS spectra of the combined crystal vs. the temperature

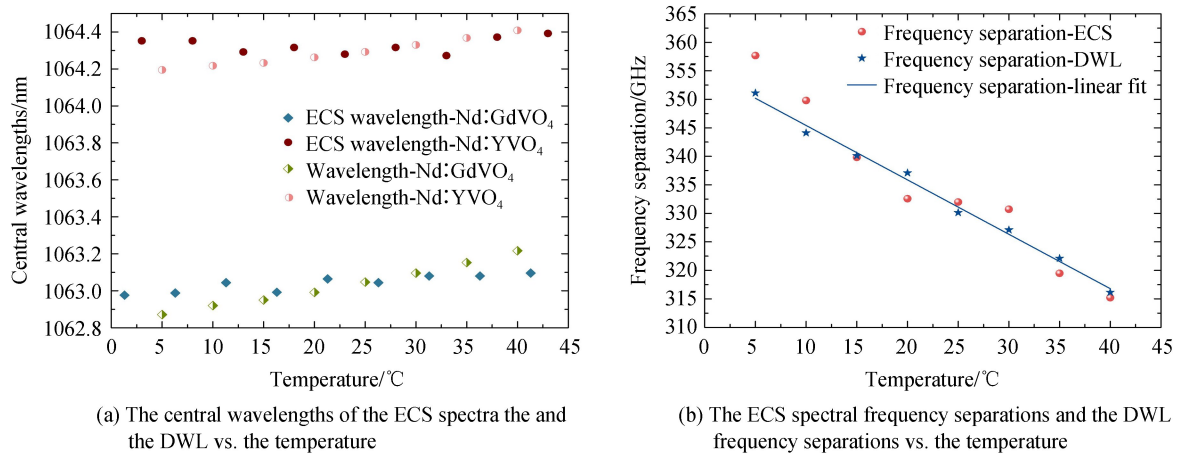


图4 组合晶体发射谱与激光谱输出特性的比较

Fig.4 The comparison between the ECS spectra and the DWL spectra

### 3 结论

以 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub>组合晶体作为增益介质的双波长激光器,通过调节热沉温控温度,实现了 310 GHz 以上的可调谐大频差双波长激光信号输出,调谐速率为 $-0.95 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ ,与温控温度呈负相关关系.对于这种双波长激光器,增益介质发射谱中心波长决定了输出激光波长;通过选择不同的增益介质材料可以获得不同频差的双频/双波长激光器,并通过温控实现可调谐的双频/双波长激光信号输出.这种双频激光器为拍频获得亚毫米波、太赫兹波输出提供了一种新思路.

#### 参考文献

- [1] DANION G, HAMEL C, FREIN L, *et al.* Dual frequency laser with two continuously and widely tunable frequencies for optical referencing of GHz to THz beatnotes[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 17673-17678.
- [2] PILLET G, MORVAN L, BRUNEL M, *et al.* Dual-frequency laser at  $1.5 \mu\text{m}$  for optical distribution and generation of high-purity microwave signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(15): 2764-2773.
- [3] ROLLAND A, FREIN L, VALLET M, *et al.* 40-GHz photonic synthesizer using a dual-polarization microlaser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**: 1738-1740.
- [4] ROLLAND A, BRUNEL M, LOAS G, *et al.* Beat note stabilization of a 10-60 GHz dual-polarization microlaser through optical down conversion[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(5): 4399-4404.
- [5] QIAO Y F, ZHENG S L, CHI H, *et al.* Electro-optically tunable microwave source based on composite-cavity microchip laser[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(27): 29090-29095.
- [6] PILLET G, MORVAN L, MENAGER L, *et al.* Dual-frequency laser phase locked at 100 GHz[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(20): 3824-3830.
- [7] TONDA G S, DOLFI D, MONSTERLEET A, *et al.* Optical signal processing in radar systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 847-853.
- [8] CHENG C H, LEE C W, LIN T W, *et al.* Dual-frequency laser Doppler velocimeter for speckle noise reduction and coherence enhancement[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20255-20265.
- [9] ZHENG Z, ZHAO C M, ZHANG H, *et al.* Phase noise reduction by using dual-frequency laser in coherent detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **80**: 169-175.
- [10] CHEN J, ZHU H, XIA W, *et al.* Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(2): 560-572.
- [11] HUANG Y J, TZENG Y S, TANG C Y, *et al.* Efficient high-power terahertz beating in a dual-wavelength synchronously mode-locked laser with dual gain media[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(6): 1477-1480.
- [12] ROLLAND A, DUCOUMAU G, DANION G, *et al.* Narrow linewidth tunable terahertz radiation by photomixing without servo-locking[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, **4**(2): 260-266.
- [13] ZHAO P, RAGAM S, DING Y J, *et al.* Power scalability and frequency agility of compact terahertz source based on frequency mixing from solid-state lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(13): 131106.
- [14] ZHAO P, RAGAM S, DING Y J, *et al.* Investigation of terahertz generation from passively Q-switched dual-frequency laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(24): 4818-4820.
- [15] CHO C Y, HUANG T L, WEN S M, *et al.* Nd:YLF laser at cryogenic temperature with orthogonally polarized

- simultaneous emission at 1047 nm and 1053 nm[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21): 25318-25323.
- [16] YE P, ZHU S, LI Z, *et al.* Passively Q-switched dual-wavelength green laser with an Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG/YAG composite crystal[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(5): 5179-5185.
- [17] MCKAY A, DAWES J M. Tunable terahertz signals using a helicoidally polarized ceramic microchip laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(7): 480-482.
- [18] HU M, AN R D, ZHANG H, *et al.* Experimental investigation of a novel microchip laser producing synchronized dual-frequency laser pulse with an 85 GHz interval[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, **10**(1): 015801.
- [19] HUANG Y J, CHO H H, SU K W, *et al.* Exploring a diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal for generating an efficient diode-end-pumped dual-spectral-band laser[C]. *Advanced Solid State Lasers*. 2015: ATu1A.7.
- [20] DANION G, ROLLAND A, BONDU F, *et al.* Investigation of the coupling between pump amplitude noise and differential phase noise in an Er, Yb: glass two-polarization dual-frequency solid-state laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, **33**(4): 589-593.
- [21] CAI Mei-ling, HU Miao, DAI Rong, *et al.* Experimental study of emission cross section spectra and microchip laser spectra of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> Crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(11): 1101004.  
蔡美伶, 胡淼, 戴荣, 等. Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体发射截面谱及微片激光器光谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, **44**(11): 1101004.
- [22] SATO Y, TAIRA T. Temperature dependencies of stimulated emission cross section for Nd-doped solid-state laser materials[J]. *Optical Materials Express*, 2012, **2**(8): 1076-1087.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61705055), the National Key Laboratory of Nuclear and Biochemical Disaster Protection Foundation of China (No.SKLNBC2015G03)

引用格式: HAN Ning, HU Miao, LI Peng, *et al.* Experimental Study on the Dual-wavelength Laser Based on the Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> Combined Crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0914004

韩宁, 胡淼, 李鹏, 等. 基于 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体的双波长激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2018, **47**(9): 0914004