

引用格式: XIA Meng-ying, HU Miao, ZHOU Hui-min, *et al.* Experimental Research on Power-balanced Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> Dual-wavelength Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0414003

夏梦莹,胡森,周慧敏,等.Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器的功率均衡实验研究[J].光子学报,2020,**49**(4):0414003

# Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器的 功率均衡实验研究

夏梦莹,胡森,周慧敏,钱正丰,周雪芳,杨国伟,卢旻,毕美华

(杭州电子科技大学 通信工程学院,杭州 310018)

**摘 要:**实验研究了 Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器在不同抽运功率条件下,通过调节热沉温度达到功率均衡时的输出特性.实验结果表明:对于 Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器,当提高抽运功率,需要重新降低热沉温度达到功率均衡输出,降温幅度与抽运功率增加之比为 11.23 °C/W.与此同时,随着抽运功率和热沉温度的变化,双波长激光器的中心波长会出现小幅度的漂移,左峰波长随抽运功率增加的蓝移速率为 0.056 nm/W,右峰波长随抽运功率增加的蓝移速率为 0.054 nm/W.实验还发现功率均衡条件下激光器的输出总功率随抽运功率的增加而增加,拟合斜效率为 8.7%,当抽运功率为 5.58 W 时,输出最大总功率达到 115.7 mW.

**关键词:**太赫兹波;双波长激光器;组合晶体;功率均衡

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0414003

## Experimental Research on Power-balanced Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> Dual-wavelength Laser

XIA Meng-ying, HU Miao, ZHOU Hui-min, QIAN Zheng-feng, ZHOU Xue-fang,  
YANG Guo-wei, LU Yang, BI Mei-hua

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

**Abstract:** The output characteristics of the power-balanced Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> Dual-Wavelength Laser (DWL) under different pumping conditions is investigated experimentally. The experimental results show for power-balanced Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> DWL, the heat sink temperature needs reduce when the pumping power increases, and the ratio of temperature decreasing versus pumping power increasing is 11.23 °C/W. With the change of pumping power and heat sink temperature, the DWL wavelengths shift slightly. When the pumping power increases, the DWL left wavelength blue-shifting rate is 0.056 nm/W, and the right wavelength one is 0.054 nm/W. The result also found that the output power of the power-balanced DWL increases with the pumping power increasing. The fitted slope efficiency is 8.7%. When the pumping power is 5.58 W, the maximum output power reaches 115.7 mW.

**Key words:** Terahertz wave; Dual-wavelength laser; Combined crystal; Power balance

**OCIS Codes:** 140.3410; 140.3530; 140.3600; 140.6810

## 0 引言

太赫兹波<sup>[1-4]</sup> (THz) 是介于微波和红外之间的电磁波,波长在 3 μm 到 300 μm 之间,频率为

基金项目:国家自然科学基金(No.61705055),2020 年度浙江省重点研发计划项目(No.2019C01G1121168)

第一作者:夏梦莹(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为双频激光器. Email:1123987903@qq.com

导师(通讯作者):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

收稿日期:2019-12-29;录用日期:2020-02-08

0.1~10 THz. THz 波不仅拥有和光波相同的直进性,而且还具有与电波相类似的吸收性,具有低量子能量、大带宽和良好的穿透性<sup>[2-3]</sup>等特点.当前 THz 波在生物医学诊断<sup>[4-7]</sup>、复合材料无损检查<sup>[8-9]</sup>、宽带通讯<sup>[10]</sup>、隐藏武器监测<sup>[11-13]</sup>、全息技术<sup>[14-15]</sup>、三维成像<sup>[16-17]</sup>和国防军事<sup>[18]</sup>等领域都有广泛的应用前景.在产生 THz 波信号的多种方法中,基于激光二极管(Laser Diode, LD)抽运的固体双频激光器输出信号外差拍频是一种简单而有效的方法.2015 年,邢俊红等<sup>[19]</sup>利用偏振分光棱镜将激光谐振腔分成正交的直线腔和直角腔,设计出一种大频差可调谐的 Nd:YAG 双频激光器,输出频差的调谐区间为 11.4~168.6 GHz,但是未达到拍频产生 THz 波的频率要求.同年, HUANG Y J 等<sup>[20]</sup>提出将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体进行键合来实现紧凑高效双波长激光器(Dual Wavelength Laser, DWL).该激光器同时输出中心波长在 1 063 nm 和 1 064 nm 附近的激光,频差高达 0.32 THz.考虑到双波长激光器不同波长的功率比是影响拍频效率的重要指标,探究双波长激光器的功率均衡机制成了亟待解决的问题.2018 年, LIANG H C 等<sup>[21]</sup>通过控制抽运光束在 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体中的纵向位置,对双波长对应峰值的功率比进行调节,调节幅度在 0.6 至 1.78 之间.2019 年,麦克马斯特大学的 MOHAMED M 等<sup>[22]</sup>提出了以 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体为增益介质的端面抽运 DPSS 激光器,该激光器实现了双波长,三波长和四波长的激光发射.在双波长发射操作中,获得了中心波长在 1 062.4 nm( $\pi$  偏振方向)和 1 063.7 nm( $\sigma$  偏振方向)附近的功率均衡激光信号输出,频差达到 0.35 THz.

在前人研究的基础上,本文选取 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体作为激光器的增益介质,利用热致增益介质发射谱的漂移效应,通过改变抽运功率和热沉温度实现在不同抽运功率下的双波长激光功率均衡输出,并进一步探究功率均衡的双波长激光器的频差、输出总功率和抽运功率之间的关系.

## 1 实验原理

实验采用的组合晶体由 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体前后胶合而成.前端晶体为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,设计厚度为 1 mm;后端晶体为 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,设计厚度为 5 mm.考虑到 Nd:YVO<sub>4</sub> 的发射截面较大,将其设计地较薄是为了让后端晶体能够获得更多的抽运能量.因为抽运光在穿过汇聚透镜后瑞利距离变短,此时若前端晶体厚度过大,抽运光的发散和消耗会导致进入后端晶体的抽运功率不足以达到激光阈值而无法产生激光.后端晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub> 尺寸设计的较长是为了增加增益介质的有效长度.

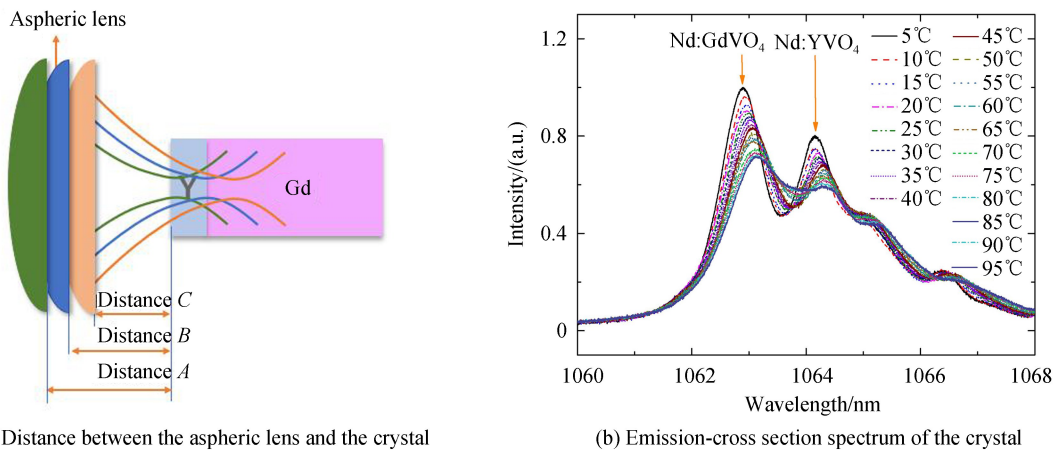


图 1 非球面透镜和组合晶体前端面的最佳距离处组合晶体发射截面谱示意图

Fig.1 The emission cross-section spectrum of the crystal in best distance between aspheric lens and the crystal

除了前后晶体的尺寸,前后晶体对抽运光的吸收效率也是影响实验结果的重要因素.决定前后晶体吸收效率的关键在抽运光在组合晶体中的汇聚位置,如图 1(a)所示.本次实验通过调节非球面透镜和组合晶体前端面的距离来改变抽运光在组合晶体中的汇聚位置.从图中可以看出当非球面透镜和组合晶体前端面之间的距离为 A 时,抽运光的汇聚点位于组合晶体的前部.此时抽运光集中在前端晶体,虽然后端晶体的晶体较厚,但很难获取足够的抽运功率达到出光阈值;当非球面透镜和组合晶体前端面之间的距离为 B 时,抽运光的汇聚点位于组合晶体胶合面附近.此时抽运功率能够充分被前后晶体有效吸收,使得两个晶体都能获得足

够的抽运功率.当非球面透镜和组合晶体前端面之间的距离为  $C$  时,抽运光的汇聚点位于组合晶体的后部,此时抽运光集中在后端晶体.由于前端晶体本身就比较薄,此时前端晶体的抽运功率吸收较少,导致输出功率较小,甚至不能达到前端晶体的激光阈值.因此实验开始前先将抽运光汇聚于  $B$  距离处,实现了功率均衡粗调.

与此同时,为了更直观地分析 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器的输出特性.实验前对组合晶体的荧光谱进行了测量,并且利用温度依赖的 Fuchtbauer-Ladenburg 公式<sup>[23]</sup> 获得发射截面谱为

$$\sigma(\lambda, T) = \frac{(\bar{\lambda})^4}{8\pi cn(T)^2 \tau_{\text{rad}}(T)} \frac{I(\lambda, T)}{\int I(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $\sigma(\lambda, T)$  为晶体的发射谱,  $I(\lambda, T)$  为晶体的荧光谱,  $\bar{\lambda}$  为平均发射波长,  $c$  为真空中的光速,  $n(T)$  为折射率,  $\tau_{\text{rad}}(T)$  为晶体的辐射寿命.考虑到掺钕晶体的折射率和辐射寿命随温度的变化对发射截面谱的影响极小,通过实验获得荧光光谱,可求解得到不同热沉温度组合晶体发射截面谱.如图 1(b) 所示,组合晶体的发射截面谱在 1 063 nm( $\pi$  偏振方向)和 1 064 nm( $\sigma$  偏振方向)附近存在着两个明显的发射谱峰.调节热沉温度会影响 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体发射截面谱参数(幅值以及中心波长).温度升高会使 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体发射谱波长红移和发射谱幅值降低,发射谱幅值随着温控温度从 5 °C 变化到 95 °C 过程中, Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的下降速率为 0.31%/°C, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的下降速率为 0.23%/°C.当晶体发射谱幅值降低,则对应波长的输出激光功率也会降低.本文所提出的 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体正是利用了温度变化对两种晶体发射谱影响的差异性,实现了双频激光器的功率均衡输出.

## 2 实验研究与分析

实验装置如图 2(a) 所示,实验采用中心波长为 808 nm,尾纤芯径为 400  $\mu\text{m}$  的 LD 作为抽运源.输出的抽运光通过光纤耦合激光准直器(低损耗耦合)及其后端的非球面透镜聚焦到组合晶体中.组合晶体由标准大气压下掺杂浓度为 1.0% 的 A-cut Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体胶合而成.其中 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm, Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的前端面镀有两层介质膜分别是反射中心波长为 1 064 nm 的全反射膜(High Reflection, HR)和 808 nm 的增透膜(Antireflection, AR), Nd:GdVO<sub>4</sub> 的后端面镀有 1 064 nm 的增透膜(AR),胶合部分两端面均镀有 1 064 nm 增透膜(AR)和 808 nm 的增透膜(AR).组合晶体后方的平面反射与组合晶体前端面形成激光谐振腔,其表面镀有 1 064 nm 高反射膜( $R=0.95$ )和 808 nm 全反射膜(HR).在实验过程中,组合晶体的热透镜与输出镜形成了近似平凹腔,当抽运功率和热沉温度变化时,腔模体积也随之变化.为了更快更稳定地实现对晶体温度的控制,在晶体外部包裹 0.1 mm 厚的钢膜,放置于可稳定夹持的铜制热沉模块中.铜制热沉模块由 TEC 制冷/制热单元,TEC 温控器单元以及水冷机(特域 CW-300)组成,温控精度可达 0.1 °C.输出的双波长激光由两面 45° 全反射镜反射进入光纤耦合器,并利用光谱分析仪(AQ6370B,日本横河电机株式会社,精

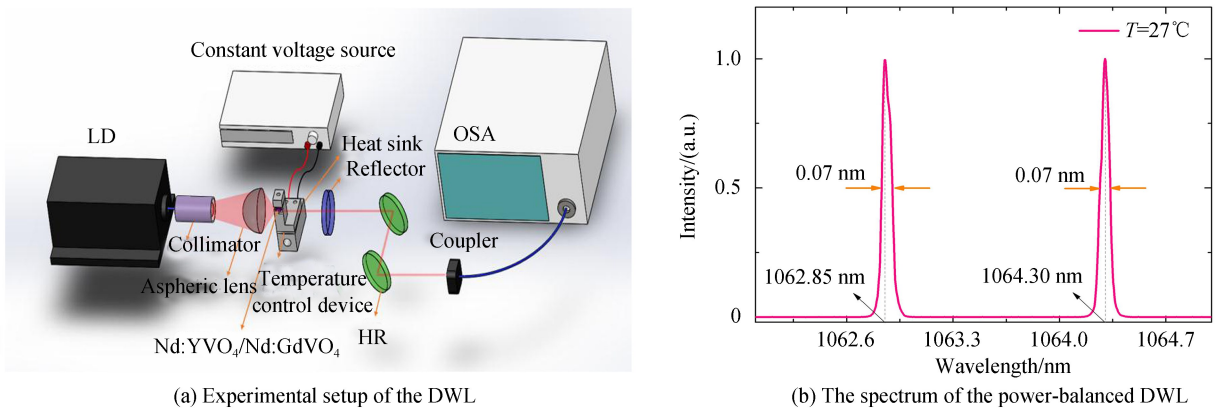


图 2 双波长激光器实验装置图及输出光谱特性

Fig.2 Experimental setup of the DWL and the output spectrum of the power-balanced DWL

度 0.01 nm)观察各阶段激光光谱记录实验数据。

实验探究 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体双波长激光器在不同抽运功率下达到功率均衡状态时,抽运功率与发射波中心波长、热沉温度、频差以及输出总功率等参数之间的关系.固定抽运功率为 4.4 W,调整抽运光汇聚点到合适的位置,改变热沉温度,使双波长激光信号达到功率均衡,此时测得热沉温度为 27 °C,输出光谱特性如图 2(b)所示.双波长激光输出的光谱线宽的测量值为 0.07 nm,通过光谱仪数据插值分别为 0.069 nm 和 0.067 nm,两者较为接近,因此光谱峰值与各波长的输出功率大致成正比。

实验过程中,始终保持抽运光束垂直位置不变,通过改变 LD 抽运功率从 4.4 W 逐步增加至 5.6 W,每改变一次抽运功率,都通过调节热沉温度使双频激光器达到功率均衡状态 10 分钟后记录下热沉温度、输出光谱图以及输出总功率.如图 3(a)是抽运功率从 4.4 W 到 5.6 W 功率均衡下的归一化激光光谱图.从图中可以发现,激光信号在 1 063 nm ( $\pi$  偏振方向,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体)和 1 064 nm 和 1 064 nm ( $\sigma$  偏振方向,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体)附近出现波峰,随着抽运功率从 4.4 W 逐渐增加至 5.6 W,功率均衡下的短波中心波长与长波中心波长在整体上向短波长方向漂移,但两者的频差较稳定.随着抽运功率的增加,归一化峰值功率整体上呈线性增加的状态。

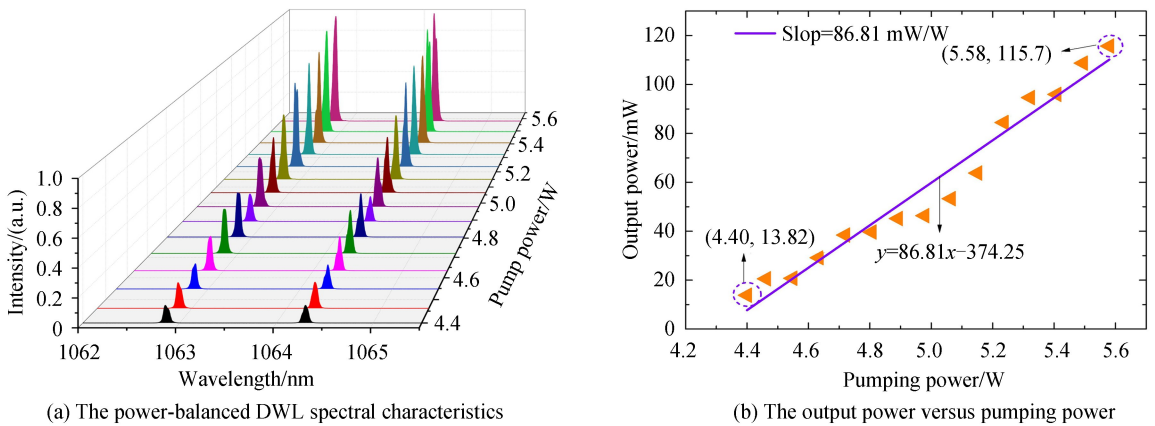


图 3 功率均衡双波长激光器的输出特性

Fig.3 The output characteristics of the power-balanced DWL

对于双波长激光器而言,除了稳定的频差,输出总功率也是体现激光器性能的一项重要指标.图 3(b)是不同抽运功率下达到功率均衡状态时,双波长激光器输出总功率的变化趋势.从图中不难看出,功率均衡的双波长激光器的输出总功率随抽运功率的增加而增加,这与光谱图中峰值功率的变化趋势相似.当抽运功率为 4.4 W 时,输出总功率为 13.82 mW,随着抽运功率的持续增加,当抽运功率达到 5.58 W 时,输出总功率达到 115.7 mW.对不同抽运功率下的输出总功率进行拟合,可以发现输出总功率的拟合斜效率为 8.7%;即抽运功率每增加 1 W,输出总功率增加 87 mW.从中可以看出,在尽可能保证功率均衡的情况下,抽运功率的增加会极大地提高双波长激光器的输出总功率,这为后续研究大功率双波长激光器的装置设计提供了数据基础。

图 4 为功率均衡时热沉温度、中心波长与抽运功率之间的变化关系示意图.其中热沉温度随抽运功率的变化如图 4(a)所示,可以看出,增加抽运功率,激光器均衡时的热沉温度逐渐减小,整体变化大致呈线性关系.在实验过程中,抽运功率从 4.4 W 增加到 5.6 W,对应激光器热沉温度从 24.35 °C 降低到 10.87 °C.经过线性拟合后得到直线斜率为 -11.23 °C/W,即抽运功率每增加 1 W,则需要通过降低 11.23 °C 的热沉温度来使得双频激光器重新达到功率均衡.这是因为随着抽运功率的增加,组合晶体内部的能量不断汇聚,导致晶体内部的温度不断增加,此时通过降低热沉温度从而减小晶体内部的热沉积,进而利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自身不同的温控特性使得双波长激光器达到功率均衡状态。

中心波长随抽运功率的变化如图 4(b)所示,可以看出,随着抽运功率从 4.4 W 增加至 5.6 W,激光器的短波中心波长从 1 062.85 nm 逐渐减小到 1 062.80 nm,长波中心波长从 1 064.30 nm 逐渐减小到 1 064.23 nm.经过线性拟合可以发现双频中心波长随抽运功率变化整体上呈线性:短波的拟合直线斜率为 -0.056 nm/W,长波的拟合直线斜率为 -0.054 nm/W;即抽运功率每增加 1 W,短波长的中心波长蓝移

0.056 nm,长波长的中心波长蓝移 0.054 nm.图 4 中,线性拟合反应实验数据的整体趋势,实验数据与拟合线的偏离主要由晶体热透镜变化造成的腔模变动引起.

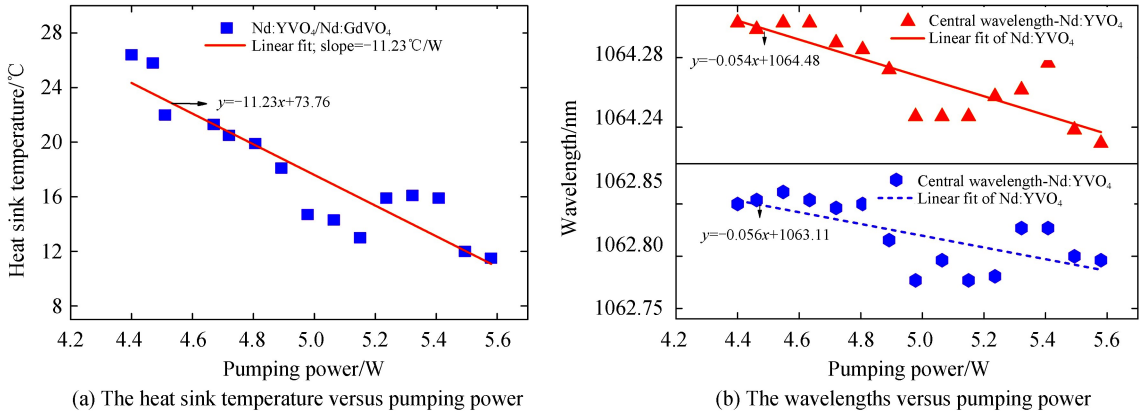


图 4 功率均衡时热沉温度、中心波长随抽运功率的变化

Fig.4 The relationship among the power-balanced DWL heat sink temperature, wavelength and pumping power

为更好地探究抽运功率对频差变化的影响,对不同抽运功率下的输出频差进行拟合.图 5 是抽运功率与频差变化趋势图.可以看出,随着抽运功率从 4.4 W 增加到 5.6 W,双频激光器达到功率均衡时的频差在 385 GHz 上下浮动,浮动范围在 380.20 GHz 到 391.45 GHz 之间,可以发现功率均衡下的输出频差受抽运功率的影响较小.

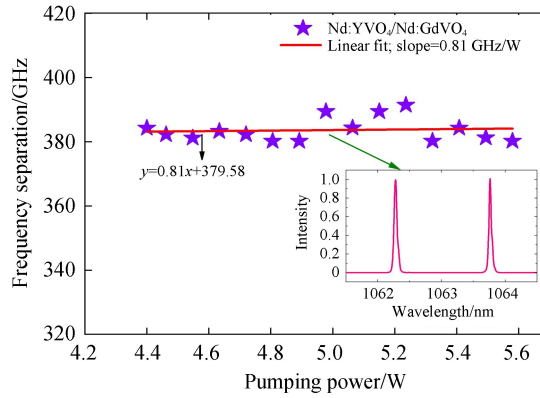


图 5 功率均衡时双波长激光器频差随抽运功率的变化

Fig.5 The power-balanced DWL frequency separation versus pumping power

### 3 结论

Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体双波长激光器,采用改变抽运功率和热沉温度使其达到功率均衡的同时可以获得稳定的 380 GHz 以上的频差以及较大的输出总功率,为后续拍频产生稳定的更大功率的太赫兹信号输出奠定基础.实验中为了减小抽运功率增加所带来的热效应,采用降低热沉温度的方法使双波长激光器达到功率均衡.实验发现功率均衡的 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 双波长激光器的输出总功率随抽运功率的增加而增加.这为后续探究功率均衡条件下高效拍频产生稳定的更大功率的太赫兹信号提供一种新思路.

### 参考文献

- [1] TONOUCHI I, MASAYOSH I. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [2] KONG Yu-wei, LI Qi-liang, YIN Tao-ce, et al. Widely tunable multi-wavelength laser operating at 2  $\mu$ m band based on four wave mixing[J]. *Journal of HangZhou DianZi University (Natural Science)*, 2019, **39**(3): 15-20.  
孔玉微, 李齐良, 尹韬策, 等. 2  $\mu$ m 波段基于四波混频宽可调的多波长激光器[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2019, **39**(3): 15-20.
- [3] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, **10**(10): 3211-3221.
- [4] MAO Li, LIU Yu, TIAN Hui-yan, et al. Discussion on the safety of terahertz technology in biomedical application[J].

- International Journal of Laboratory Medicine*, 2018, **39**(1): 74-76.
- 毛莉, 刘羽, 田晖艳, 等. 太赫兹技术在生物医学应用中的安全性探讨[J]. 国际检验医学杂志, 2018, **39**(1): 74-76.
- [5] RABBANI M, GHAFOURI-SHIRAZ H. Liquid crystalline polymer substrate based THz microstrip antenna arrays for medical applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, **16**: 1533-1536.
- [6] DUKA M V, DVORETSKAYA L N, BABELKIN N S, *et al.* Numerical and experimental studies of mechanisms underlying the effect of pulsed broadband terahertz radiation on nerve cells[J]. *Quantum Electronics*, 2014, **44**(8): 707-712.
- [7] ZAYTSEV K I, GAVDUSH A A, CHERNOMYRDIN N V, *et al.* Highly accurate in vivo terahertz spectroscopy of healthy skin: variation of refractive index and absorption coefficient along the human body[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(5): 817-827.
- [8] BALBEKIN N S, NOVOSELOV E V, PAVLOV P V, *et al.* Nondestructive monitoring of aircraft composites using terahertz radiation[C]. Saratov Fall Meeting 2014: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVI; Laser Physics and Photonics XVI; and Computational Biophysics. International Society for Optics and Photonics, 2015, 94882D.
- [9] KATO M, TRIPATHI S R, MURATE K, *et al.* Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6): 6425-6432.
- [10] KHALID N, AKAN O B. Experimental throughput analysis of Low-THz MIMO communication channel in 5G wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, **5**(6): 616-619.
- [11] KOWALSKI M, KASTEK M. Comparative studies of passive imaging in terahertz and mid-wavelength infrared ranges for object detection[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, **11**(9): 2028-2035.
- [12] KOWALSKI M, KASTEK M, PALKA N, *et al.* Passive imaging of concealed objects in terahertz and long-wavelength infrared[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(17): 3826-3833.
- [13] GROSSMAN E, DIETLEIN C, ALALAUINAHO J, *et al.* Passive terahertz camera for standoff security screening. [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): 106-120.
- [14] PETROV N V, KULYA M S, TSYPKIN A N, *et al.* Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2016, **6**(3): 464-472.
- [15] HEIMBECK M, NG W, GOLISH D, *et al.* Terahertz digital holographic imaging of voids within visibly opaque dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, **5**(1): 110-116.
- [16] BALACEY H, RECUR B, PERRAUD J B, *et al.* Advanced processing sequence for 3-D THz Imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **6**(2): 191-198.
- [17] PERRAUD J B, OBATON A F, BOU-SLEIMAN J, *et al.* Terahertz imaging and tomography as efficient instruments for testing polymer additive manufacturing objects[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(13): 3462-3467.
- [18] YANG Guang-kun, YUAN Bing, XIE Dong-yan, *et al.* Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(4): 376-380.
- 杨光鲲, 袁斌, 谢东彦, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, **41**(4): 376-380.
- [19] XING Jun-hong, JIAO Ming-xing. Design and experimental study of tunable dual-frequency Nd: YAG laser with large frequency difference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(5): 143-148.
- 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**(5): 143-148.
- [20] 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.
- [21] LIANG H C, HUANG T L, CHANG F L, *et al.* Flexibly controlling the power ratio of dual-wavelength SESAM-Based Mode-Locked Lasers With Wedged-Bonded Nd: YVO<sub>4</sub>/Nd: GdVO<sub>4</sub> crystals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, **24**(5): 1-5.
- [22] MOHAMED M, ZHANG B, MA Q, *et al.* Efficient dual-wavelengths continuous mode lasers by End-Pumping of series Nd: YVO<sub>4</sub> and Nd: GdVO<sub>4</sub> crystals and speckle reduction study[J]. *Photonics*, 2019, **6**(2): 53-63.
- [23] XAVIER D, FRANÇOIS B, GEORGES P. Temperature dependence of the emission cross section of Nd: YVO<sub>4</sub> around 1064 nm and consequences on laser operation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, **28**(5): 972-976.