

激光与光电子学进展

大范围频差可调谐 Y 型腔双波长激光器 实验研究

周慧敏, 胡淼*, 夏梦莹, 胡喜明, 许蒙蒙, 钱正丰, 毕美华, 卢旸

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 设计了一种基于 Nd:GdVO₄ 和 Nd:YVO₄ 晶体的 Y 型腔双波长激光器, 实现了大范围频差可调谐的双波长激光信号输出。通过独立调节激光器两晶体的热沉温度, 控制热沉温度差从 -50 °C 升高到 30 °C, 测得双波长频差从 270.13 GHz 增加至 379.75 GHz。通过调节两晶体对应的抽运功率, 进一步实现双波长功率均衡, 最终获得了功率均衡状态下频差调谐范围为 266.05~379.75 GHz, 输出功率为 230 mW 的双波长激光信号。

关键词 激光器; 双波长激光器; 频差调谐; 功率均衡; Y 型腔

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714007

Experimental Study of Y-Cavity Dual-Wavelength Laser with Wide Tunable Frequency Separation Range

Zhou Huimin, Hu Miao*, Xia Mengying, Hu Ximing, Xu Mengmeng, Qian Zhengfeng, Bi Meihua, Lu Yang

College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract A Y-cavity dual-wavelength laser based on Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ crystals is designed, and the dual-wavelength laser signal with a wide tunable frequency separation range is experimentally realized. By independently adjusting the heat sink temperatures of the two crystals and controlling the temperature difference from -50 °C to 30 °C, the measured dual-wavelength frequency separation increases from 270.13 GHz to 379.75 GHz. Furthermore, the dual-wavelength power balance is realized by adjusting the pump powers of the two crystals. Finally, the dual-wavelength laser signal is obtained, which has a tunable frequency separation range of 266.05–379.75 GHz and an output power of 230 mW.

Key words lasers; dual-wavelength laser; frequency separation tuning; power balance; Y-cavity

OCIS codes 140.3530; 140.3298; 140.3600; 140.6810

1 引言

频率在 0.1~10 THz 频段的电磁波称为太赫兹波, 其在生物医学^[1-2]、国防军事^[3]、通信^[4-5]和工业检测^[6]等领域得到广泛应用。目前, 太赫兹波的产生

方法正成为人们的研究热点。利用强相干的双波长激光信号进行光外差拍频是产生太赫兹波的一种重要途径, 所产生的太赫兹波具有线宽窄、噪声低等优点^[7-9]。相对于使用双激光器直接拍频产生太赫兹波的方法, Y 型腔激光器输出的双波长激

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61705055)、2020年度浙江省重点研发计划项目(2019C01G1121168)

*E-mail: miao_hu@foxmail.com

光具有更好的相干性^[10-11]。掺钕晶体因为较大的受激发射截面(ECS)和较宽的吸收截面谱等而被广泛用作双波长激光器的增益介质。2009年, McKay等^[12]使用Nd:YAG晶体作为激光器的增益介质,获得了频差可调谐双波长激光信号,但是最大频差小于150 GHz,仍在亚太赫兹频差的下限附近。研究者设计了基于双Nd:YLF晶体的Y型腔激光器,利用Y型腔激光器可单独调节抽运电流的优点,获得了中心波长为1047 nm和1053 nm的功率均衡双波长激光信号输出,频差为1.64 THz。Zhao等^[13-14]在Y型腔中通过插入声光调Q和被动调Q器件,获得了时间同步的双波长脉冲,但未能实现双波长信号的频差调谐。根据增益介质的热致增益谱中心波长漂移特性,柯一枝等^[15]设计了基于Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体的双波长激光器,通过改变组合晶体的热沉温度,实现了双波长信号在316.15~351.11 GHz范围内的频差调谐,并在32.3 °C时获得了功率均衡的双波长激光信号输出。由于组合晶体双波长激光器主要依靠各晶体热致增益谱中心波长漂移特性来实现频差调谐,因此组合晶体在共用一个热沉的前提下,实现的频差调谐范围较小,且不能在调谐范围内的任意频差点处实现功率均衡状态。设计一种功率均衡且大范围频差可调谐的双波长激光器成为有探索价值的课题。

本文提出了一种基于Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的Y型腔双波长激光器,利用Y型腔激光器独立调节晶体热沉温度和抽运功率的优点,同时实现了大范

围频差调谐和激光信号的功率均衡状态,并进一步探究了双波长与晶体温控温度、抽运功率之间的关系。这对于外差光生太赫兹波技术的发展具有重要意义。

2 实验原理与装置

根据增益介质发射谱的热致漂移特性^[16],对增益介质进行加热或制冷可以使对应输出激光的中心波长红移或蓝移。双波长激光器频差计算公式为 $\Delta\nu = c/\lambda_1 - c/\lambda_2$,其中 $\Delta\nu$ 是频差, λ_1 和 λ_2 分别是长、短波的中心波长,推导出 λ_1 和 λ_2 的独立漂移以实现频差调谐。以基于Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的双波长激光器为例,对Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的荧光谱进行独立测定,并利用Fuchtbauer-Ladenburg方程将荧光谱转换为发射截面谱^[17]。图1(a)给出了20 °C时Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的归一化发射截面谱,在相同温度下,两晶体的发射截面谱分别处于相对短波段和相对长波段。图1(b)给出了双晶体发射截面谱的温度特性曲线,其中分别以 $\lambda_{1ECS}(\text{Nd:GdVO}_4)$ 和 $\lambda_{2ECS}(\text{Nd:YVO}_4)$ 表示Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的受激发射截面的中心波长。随着热沉温度的升高,两晶体的发射截面谱中心波长都发生了红移。对于Y型腔双波长激光器而言,对Nd:GdVO₄晶体进行加热,并对Nd:YVO₄晶体进行制冷,长波和短波之间的波长差会变小,频差减小;对Nd:GdVO₄晶体进行制冷,并对Nd:YVO₄晶体进行加热,波长差变大,频差增大。通过这种双晶体的独立温控可实现双波长激光信号的大范围频差调谐。

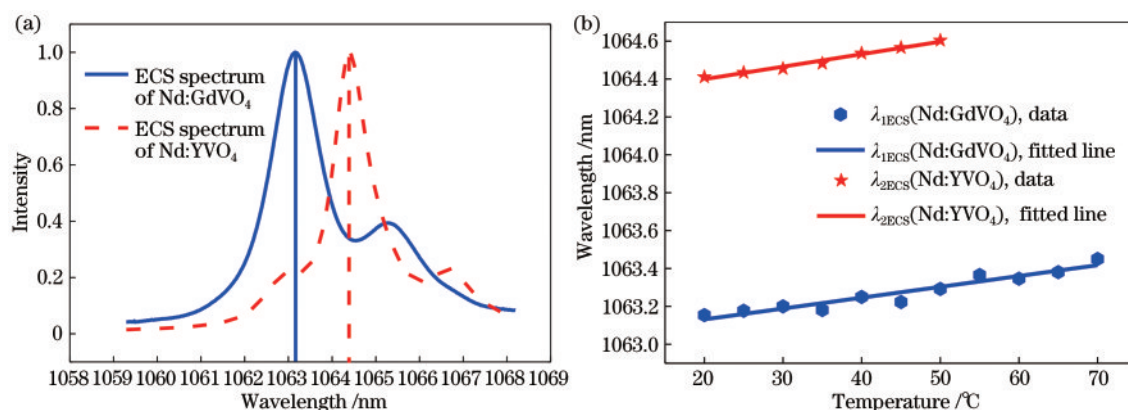


图1 Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的发射截面谱。(a)Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的归一化发射截面谱;(b)发射截面谱的温度特性曲线

Fig. 1 ECS spectra of Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ crystals. (a) Normalized ECS spectra of Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ crystals; (b) temperature characteristic curves of ECS spectra

考虑到激光晶体的发射截面谱红移会导致峰值减小^[18-19],因此在改变晶体温度实现频差调谐的

过程中,Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的输出激光功率会发生变化,需要进一步调整抽运功率以达到功

率均衡状态。为了实现晶体的热沉温度和抽运功率的独立调节,设计了Y型腔双波长激光器,图2给出了实验装置。两个半导体激光器产生中心波长为808 nm的抽运光,由尾纤直径为400 μm 的光纤输出,通过非球面透镜组会聚于晶体内。实验前测得不同抽运功率下抽运光中心波长10 min的稳定性高于98%,可以认为中心波长随抽运功率的变化而保持不变。激光晶体分别采用a-cut Nd:YVO₄晶体和a-cut Nd:GdVO₄晶体,尺寸分别为3 mm \times 3 mm \times 3 mm和3 mm \times 3 mm \times 5 mm。两晶体的前端面镀有1064 nm的高反射膜(High Reflection, HR)和808 nm的增透膜(Antireflection, AR),后端面镀有808 nm的高反射膜(HR)和1064 nm的高反射膜(AR)。Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体产生 σ 偏振和 π 偏振的光,通过布儒斯特偏振片合束,输出镜反射率为95%@1064 nm。两晶体外部包裹铝箔,热量通过热沉装置的半导体制冷片传递至水冷装置中进行散热。最终晶体热沉的温控精度为0.1 $^{\circ}\text{C}$,范围为20~100 $^{\circ}\text{C}$ 。利用精度为0.01 nm的光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)记录输出激光的光谱,通过光功率计记录输出功率。

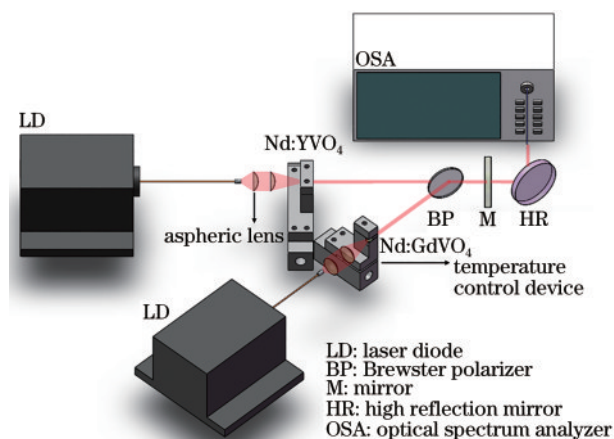


图2 Y型腔双波长激光器的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of Y-cavity dual-wavelength laser

3 实验研究与分析

分别设置Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体对应的抽运功率分别为9 W和7 W,热沉温度分别为20 $^{\circ}\text{C}$ 和50 $^{\circ}\text{C}$,此时双波长激光信号中长波(Nd:YVO₄)和短波(Nd:GdVO₄)的波长差达到最大,且功率均衡,图3(a)给出了该状态下的归一化双波长激光谱。光功率计测得总输出功率为230 mW,即Nd:YVO₄与Nd:GdVO₄晶体产生的激光输出功率均为115 mW。

逐步升高Nd:GdVO₄热沉温度,降低Nd:YVO₄热沉温度,待输出激光中心波长和峰值功率的稳定性优于95%后,用光谱分析仪记录双波长激光谱,直至Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体对应的热沉温度分别达到70 $^{\circ}\text{C}$ 和20 $^{\circ}\text{C}$,此时长、短波的波长差最小。图3(b)给出了长、短波中心波长随温度的变化规律,其中分别以 λ_1 (Nd:GdVO₄)和 λ_2 (Nd:YVO₄)表示Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的激光中心波长。可以看到,短波的中心波长从1063.15 nm红移至1063.45 nm,随温度的升高呈近似线性增加,斜率为6.05 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$;长波的中心波长从1064.59 nm蓝移至1064.47 nm,随温度的降低呈近似线性减小,斜率为3.36 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。激光谱的长、短波随温度的漂移速率不同,这是由于Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的发射截面谱随温度漂移的速率存在差异。将Nd:YVO₄与Nd:GdVO₄晶体热沉温度的差定义为相对温度 ΔT , $\Delta T = T_{\text{Nd:YVO}_4} - T_{\text{Nd:GdVO}_4}$ 。图3(c)给出了双波长激光输出频差随相对温度的变化规律,可以看到,随着相对温度从-50 $^{\circ}\text{C}$ 增加至30 $^{\circ}\text{C}$,频差从270.13 GHz升高到379.75 GHz。频差随相对温度的升高呈近似线性增加,斜率为1.359 GHz/ $^{\circ}\text{C}$,即相对温度每上升1 $^{\circ}\text{C}$,频差增加1.359 GHz。

在保持抽运功率不变的情况下,随着Nd:GdVO₄晶体热沉温度的升高,发射截面谱中心波长红移,谱峰值降低,短波激光功率减小;随着Nd:YVO₄晶体热沉温度的降低,发射截面谱中心波长蓝移,谱峰值升高,长波激光功率增大。在频差最小处,即 $\Delta T = -50$ $^{\circ}\text{C}$ 处,归一化双波长激光谱如图3(d)所示,可以看到,此时短波峰值功率小于长波。

当Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的相对温度发生改变时,单独调整晶体的抽运功率,使激光重新达到功率均衡状态,输出总功率保持不变。每次改变抽运功率后,激光的中心波长和峰值功率的稳定性优于95%后进行测量。图4给出了各波长激光保持输出功率不变时,晶体抽运功率与热沉温度之间的关系,其中分别以 P_1 (Nd:GdVO₄)和 P_2 (Nd:YVO₄)表示达到功率均衡时Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体所需的抽运功率。可以看到,随着Nd:GdVO₄温度从20 $^{\circ}\text{C}$ 升高至70 $^{\circ}\text{C}$,为了保持输出功率115 mW不变,实验所需的抽运功率呈近似线性减小,拟合直线斜率为-0.030 W/ $^{\circ}\text{C}$;而随着Nd:YVO₄温度从50 $^{\circ}\text{C}$ 降低到20 $^{\circ}\text{C}$,为了保持输出功率115 mW不变,实验所需抽运功率呈近似线性减小,拟合直线斜率

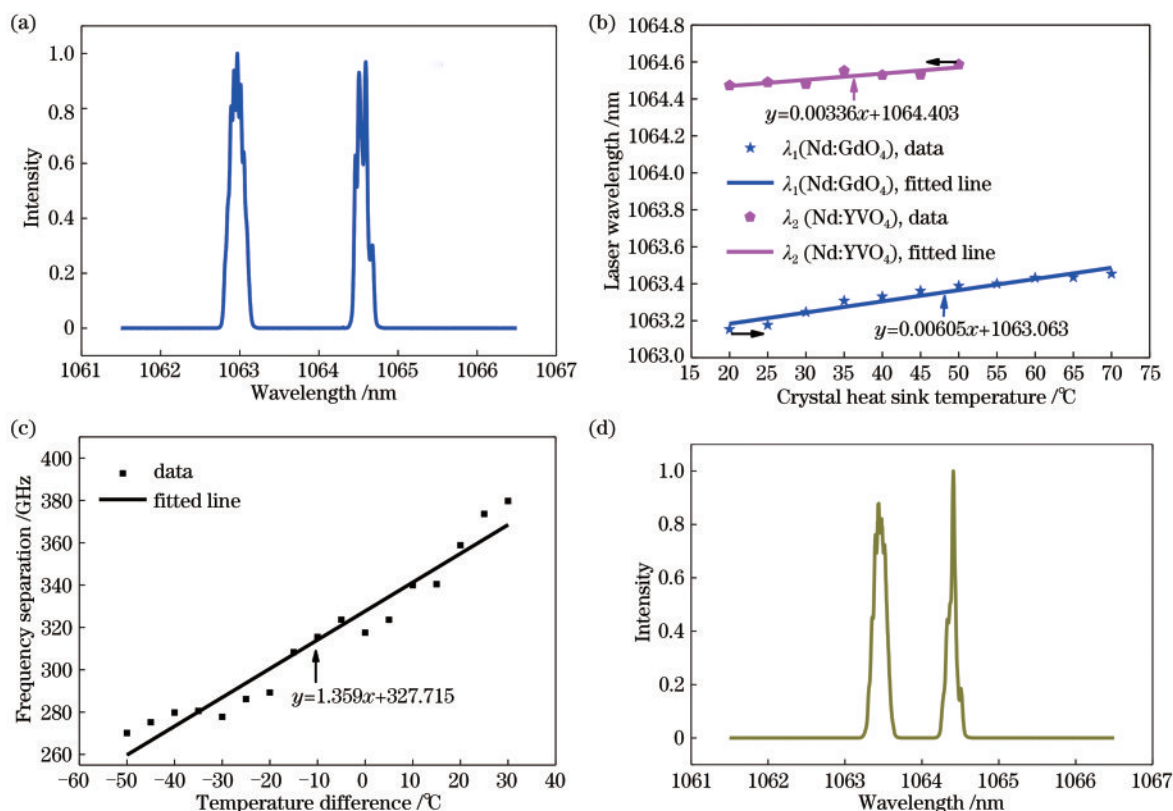


图 3 双波长激光的热致频移现象。(a) $\Delta T=30^\circ\text{C}$ 时的激光谱; (b) 双波长与热沉温度的关系; (c) 频差与温差的关系; (d) $\Delta T=-50^\circ\text{C}$ 时的激光谱

Fig. 3 Thermally induced frequency shift phenomenon of dual-wavelength laser. (a) Laser spectrum when $\Delta T=30^\circ\text{C}$; (b) dual-wavelength versus heat sink temperature; (c) frequency separation versus temperature difference; (d) laser spectrum when $\Delta T=-50^\circ\text{C}$

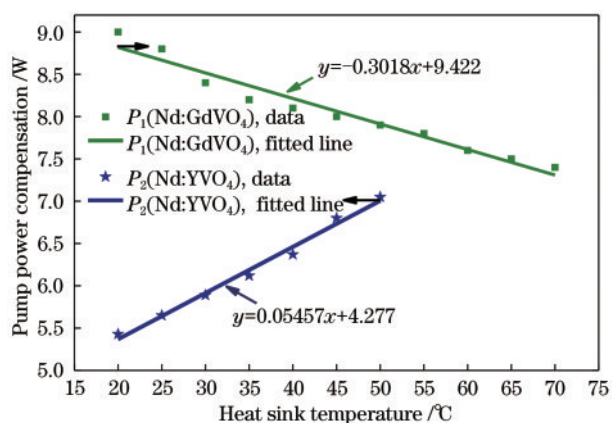


图 4 抽运功率补偿与热沉温度的关系

Fig. 4 Relationship between pump power compensation and heat sink temperature

为 $0.055\text{ W}/^\circ\text{C}$ 。随着热沉温度的变化, Nd:GdVO_4 晶体和 Nd:YVO_4 晶体所需的补偿抽运功率的变化趋势相反, 这是由于抽运功率减小会直接降低输出功率, 同时也会降低晶体温度, 而温度降低会增大发射谱峰值, 间接增加输出功率。 Nd:GdVO_4 晶体的

抽运功率从 9 W 降低至 7.5 W , 输出功率的间接增加量大于直接减少量, 因此输出功率的增加主要是由晶体温度降低引起的发射谱峰值增大所导致的; 而 Nd:YVO_4 晶体抽运功率从 7 W 降低至 5.5 W , 输出功率的直接减少量大于间接增加量, 因此功率的降低主要是由抽运功率对输出功率的增益减小所导致的。

实验同时发现, 抽运功率的改变会导致长波和短波的中心波长发生小范围漂移。图 5(a) 给出了 Nd:GdVO_4 和 Nd:YVO_4 晶体的抽运功率对长、短波中心波长的影响, 随着 Nd:YVO_4 对应抽运功率的减小, 长波发生蓝移, 且波长漂移量随温度的降低呈近似线性减小, 漂移率为 $0.012\text{ nm}/\text{W}$, 即抽运功率每降低 1 W , 长波蓝移 0.012 nm ; 随着 Nd:GdVO_4 对应抽运功率的减小, 短波发生蓝移, 波长漂移量随温度的降低呈近似线性减小, 漂移率为 $0.015\text{ nm}/\text{W}$, 即抽运功率每降低 1 W , 短波蓝移 0.015 nm 。随着抽运功率的减小, 晶体中心温度降低, 激光中心波长发生蓝移。

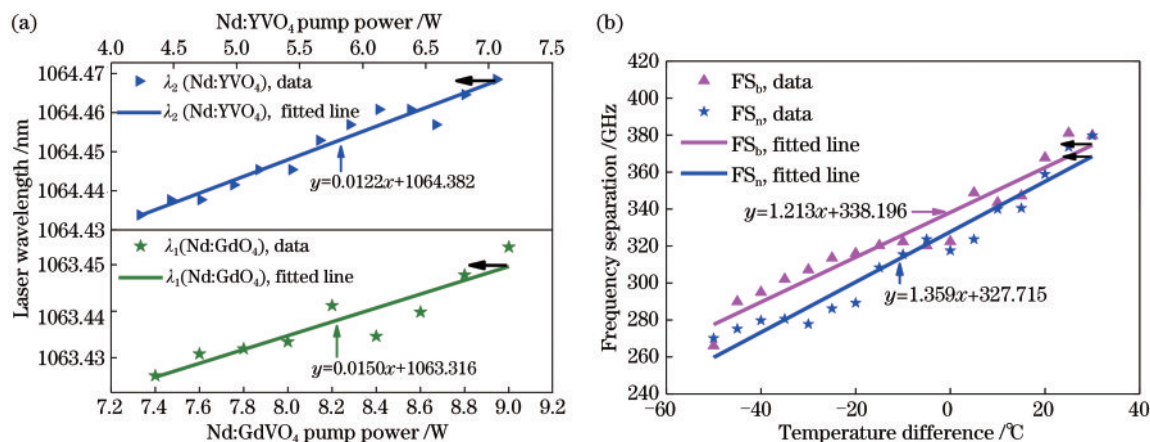


图5 抽运功率对双波长激光频差的影响。(a)激光波长与抽运功率的关系;(b)功率均衡和非功率均衡状态下的频差对比
Fig. 5 Influence of pump power on frequency difference of dual-wavelength laser. (a) Relationship between pump power and laser wavelength; (b) frequency separation comparison of power-balanced and non-power-balanced states

Nd:GdVO₄晶体热沉温度每升高1℃,短波红移6.05 pm,此时需要将抽运功率降低0.030 W,使双波长重新达到功率均衡,该过程使短波蓝移0.45 pm,即在达到功率均衡的情况下,热沉温度每升高1℃,短波红移5.6 pm。Nd:YVO₄晶体热沉温度每降低1℃,长波蓝移3.06 pm,此时需要将抽运功率降低0.055 W,使双波长重新达到功率均衡,该过程使长波继续蓝移0.66 pm,即在达到功率均衡的情况下,热沉温度每升高1℃,长波蓝移3.72 pm。图5(b)给出了功率均衡前后的频差关系,其中分别用FS_b和FS_n表示功率均衡状态和非功率均衡状态下的频差。可以看到,功率均衡时的频差略大于非功率均衡状态。计算得到温差引起的频差变化,即在非功率均衡状态下,相对温度每降低1℃,频差减小1.359 GHz;在功率均衡状态下,相对温度每降低1℃,频差减小1.213 GHz。

因此,当双波长激光达到最小频差时,长波波长为1064.47 nm,短波波长为1063.45 nm,频差为270.13 GHz,输出功率为230 mW;当频差达到最小且处于功率均衡的状态时,长波波长为1064.46 nm,短波波长为1063.45 nm,频差为266.05 GHz,输出功率为230 mW。

4 结 论

提出了一种基于Nd:GdVO₄和Nd:YVO₄晶体的Y型腔双波长激光器,在独立温控和独立抽运的前提下,输出了功率均衡状态下频差调谐范围为266.05~379.75 GHz的双波长激光,为后续拍频产生太赫兹波信号提供了稳定的信号源。在通过调

节抽运功率实现功率均衡的实验中发现,改变抽运功率会引起晶体内部温度变化,进而导致输出激光信号波长在小范围内发生漂移。综上所述,研究结果为频差调谐范围更大、输出功率更高的双波长激光的产生提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] Rabbani M S, 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.
- [2] Duka M V, Dvoretzkaya 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.
- [3] Grossman E, Dietlein C, Ala-Laurinaho J, et al. Passive terahertz camera for standoff security screening[J]. Applied Optics, 2010, 49(19): E106-E120.
- [4] Yang T, Ge J C, Zhou Y, et al. A terahertz wave modulation system based on optical modulation of the plasma frequency of a semiconductor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 0203005.
- [5] Kong Y W, Li Q L, Yin T C, et al. Widely tunable multi-wavelength laser operating at 2 μm band based on four wave mixing[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2019, 39(3): 15-20. 孔玉微, 李齐良, 尹韬策, 等. 2 μm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.
- [6] Wang X L, Fei Y, Li L J, et al. Detection of the spatiotemporal field of a single-shot terahertz pulse

- based on spectral holography [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(6): 064202.
- [7] Hamadou A, Thobel J L, Lamari S. Optical external efficiency of terahertz quantum cascade laser based on Čerenkov difference frequency generation [J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2019, 28(4): 1950036.
- [8] Wang Y H, Zhao C M, Cai Z T, et al. LD pumped 1061 nm/1064 nm dual-wavelength Nd: YAG microchip laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301002.
王永恒, 赵长明, 蔡子韬, 等. LD 泵浦 1061 nm/1064 nm 双波长 Nd: YAG 微片激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301002.
- [9] Takeuchi H, Yanagisawa J, Tsuruta S, et al. Frequency-tunable terahertz electromagnetic wave emitters based on undoped GaAs/n-type GaAs epitaxial layer structures utilizing sub-picosecond-range carrier-transport processes [J]. Journal of Luminescence, 2011, 131(3): 531-534.
- [10] Qu C B, Kang M Q, Xiang X J, et al. Theoretical study of 4.3 μm dual-wavelength pumped Dy: InF₃ high-energy mid-infrared fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0801003.
瞿崇兵, 康民强, 向祥军, 等. 双波长泵浦 4.3 μm Dy: InF₃ 高能中红外光纤激光理论研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0801003.
- [11] Zheng S H, Yang Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201001.
郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201001.
- [12] McKay A, Dawes J M. Tunable terahertz signals using a helicoidally polarized ceramic microchip laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(7): 480-482.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ke Y Z, Hu M, Li P, et al. Experimental study on the power balance mechanism of neodymium-doped dual-frequency microchip lasers [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(1): 1-6.
柯一枝, 胡森, 李鹏, 等. 掺钕双频微片激光器功率均衡实验研究 [J]. 光电子·激光, 2019, 30(1): 1-6.
- [16] Délen X, Balembois F, Georges P. Temperature dependence of the emission cross section of Nd: YVO₄ around 1064 nm and consequences on laser operation [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(5): 972.
- [17] Cai M L, Hu M, Dai R, et al. Experimental study of emission cross section spectra and microchip laser spectra of Nd: GdVO₄ and Nd: YVO₄ crystals [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1101004.
蔡美伶, 胡森, 戴荣, 等. Nd: GdVO₄ 和 Nd: YVO₄ 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.
- [18] Hu M, Zhang Y, Wei M, et al. Microchip dual-frequency laser with well-balanced intensity utilizing temperature control [J]. Optics Express, 2016, 24(20): 23383-23389.
- [19] Cao H, Feng G, Fan T, et al. Comparison of thermal effects of Nd: YAG, Nd: YVO₄ and Nd: GdVO₄ crystal slab by laser diode end-pumped [J]. Infrared & Laser Engineering, 2011, 40(12): 2365-2369.