

Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体双频激光器实验研究金涛^{1**}, 胡淼^{1,2***}, 李鹏^{2,3*}, 范红丹⁴, 韩宁¹, 冯冰¹, 欧军¹, 周雪芳¹, 杨国伟¹, 卢旻¹, 毕美华¹¹杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 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;⁴杭州电子科技大学学校办公室, 浙江 杭州 310018

摘要 实验研究了在一定抽运条件下, Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体双频激光器随温度变化的输出特性。在实验过程中, 设置抽运电流为 14.5 A, 以 5 °C 为间隔增加组合晶体的热沉温度, 当温度由 5 °C 升至 40 °C 时, 激光器实现了大于 310 GHz 的超大频差双频激光信号输出。实验结果发现: 输出双频激光信号的功率均与热沉温度呈负相关关系, 拟合出的左、右峰功率随热沉温度的变化率分别为 $-0.0190\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $-0.0082\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; 尤其当热沉温度为 32.36 °C 时, 双频激光器达到功率均衡状态。此外, 实验结果还发现输出双频激光信号的波长会随着热沉温度的上升发生线性红移, 其中左峰漂移速度为 $9.70\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 右峰漂移速度为 $6.12\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

关键词 激光器; 组合晶体; 频差; 功率均衡

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091407

Experimental Study of the Dual-Frequency Laser Based on the Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ Combined CrystalJin Tao^{1**}, Hu Miao^{1,2***}, Li Peng^{2,3*}, Fan Hongdan⁴,Han Ning¹, Feng Bing¹, Ou Jun¹, Zhou Xuefang¹, Yang Guowei¹, Lu Yang¹, Bi Meihua¹¹ College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;² State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China;³ Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;⁴ School Office, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract The output characteristics of the dual-frequency laser (DFL) based on the Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ combined crystal have been investigated experimentally. In the experiment, the pump current at 14.5 A is set, the heat sink temperature of the combined crystal rises from 5 °C to 40 °C with 5 °C intervals, and a DFL signal with super-large frequency difference up to 310 GHz is achieved. The experimental results show that the DFL signal power has a negative correlation with the heat sink temperature. The fitting rates of the left and right peaks power with heat sink temperature are $-0.0190\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ and $-0.0082\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively. The DFL reaches power balance at the heat sink temperature of 32.36 °C. In addition, the experiment also shows that the wavelengths of the DFL signal are red-shifted linearly with the heat sink temperature increasing. The measured red-shift rates of the left peak and right peak are $9.70\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ and $6.12\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively.

Key words lasers; combined crystal; frequency difference; power balance**OCIS codes** 140.3410; 140.3530; 140.3600; 140.6810

1 引言

近年来, 随着移动互联网的快速发展, 各种新型

无线通信业务迭出, 网络数据量呈现指数式增长, 有限的频谱资源变得越来越稀缺^[1-3]。与传统微波相比, 毫米波和亚毫米波信号以带宽大、波束窄、抗干

收稿日期: 2018-04-07; 修回日期: 2018-04-17; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61705055)、国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(SKLNBC2015G03)

* E-mail: myddp@126.com; ** E-mail: 760310293@qq.com; *** E-mail: miao_hu@foxmail.com

扰能力强和器件尺寸小等优点^[4]受到越来越广泛的关注;并在雷达^[5-6]、无线通信^[7]和仪器测量^[8-10]等领域展现出不可忽视的应用潜力。当前,由激光二极管(LD)抽运的双频微片激光器输出双频激光信号,并进行外差拍频的方法,是一种产生毫米波信号的有效方法^[11]。在常见的微片激光器中,掺钕离子的激光器凭借着其较大的增益带宽,已成为目前主流双频激光器的研究对象之一。如2008年,McKay等^[12]提出在两块1/4玻片之间插入高掺杂浓度Nd:YAG陶瓷片的双频激光器,获得了80~100 GHz频差可调的双频激光信号输出。2009年,Wang等^[13]采用Nd:YAG+MgO:LiNbO₃微片激光器获得了功率为20 mW,频差为3~4 GHz可调的双频激光信号输出。2014年,胡森等^[14]采用Nd:YVO₄双纵模双频微片激光器得到了频差超过80 GHz的双频激光信号输出。2017年,戴荣等^[15]进一步提出基于亚毫米厚度的Nd:YVO₄微片,获得了频差范围在106~123 GHz的双频激光信号输出。上述双频微片激光器的输出频差往往较小(一般小于150 GHz),2015年,Huang等^[16]设计了一种基于Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄扩散键合晶体激光器,并进一步通过光参量振荡器得到了对人眼安全的1.57 μm双频激光信号输出,频差高达320 GHz。

本文重新设计了一种基于Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体的双频激光器,它不仅高效地实现频差超过300 GHz的双频激光信号输出,还可进一步通过温度控制实现双频激光器的功率均衡输出,相比于文献^[16]中通过移动抽运点实现功率均衡的方式,温度控制具有更好的稳定性。这种基于组合晶体的双频激光器结构简单,且可以获得大频差、功率均衡度可调谐的双频激光信号输出,这对于外差光生毫米波技术的发展来说具有重要的意义。

2 理论分析及设计

实验中使用的Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体由前后两部分组成,如图1所示,图中AR和HR分别表示镀有增透膜和全反射膜。从图1中可以看到,组合晶体的前端部分(Nd:YVO₄晶体)相对较薄。这样设计是为了使足够多的抽运光能够入射到位于后端部分的Nd:GdVO₄晶体。因为抽运光经透镜会聚以后,瑞利范围较短,如果前端晶体厚度太大,那么进入后端晶体中的抽运光将会因发散和消耗等变得很小,达不到激光器的出光阈值,无法产生

激光。而另一方面,后端晶体尺寸设计得较长则是为了增加增益介质的有效长度,利于出光。

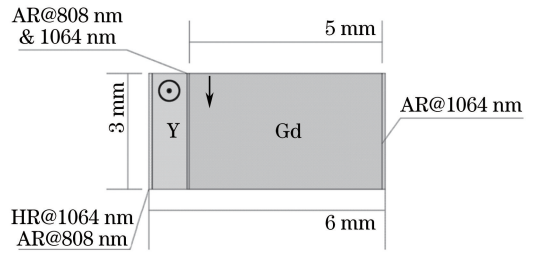


图1 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ combined crystal

Nd:YVO₄晶体和Nd:GdVO₄晶体在1060 nm左右都存在发射谱峰,本实验中均选取以π偏振输出的a轴切割晶体。实验开始前,在15℃的热沉温度下,分别检测了与后续实验中相同参数的两种单晶体的荧光谱,并根据Fuchtbauer-Ladenburg公式^[17],将所测得的荧光谱转化为激光发射谱。图2展示了初始温度T₀=15℃时,Nd:YVO₄晶体和Nd:GdVO₄晶体的发射谱图。从图中可以看出,当热沉温度为15℃时,Nd:YVO₄晶体和Nd:GdVO₄晶体各自都存在一个明显的发射谱峰,它们的中心分别位于1064.24 nm和1062.96 nm,两者之间的理论频差高达339.45 GHz。此外,考虑到实验中激光器腔长超过10 mm以上,激光器为多纵模输出,采用Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体恰好适合这种输出,由中心波长分别位于各自发射谱峰的单频

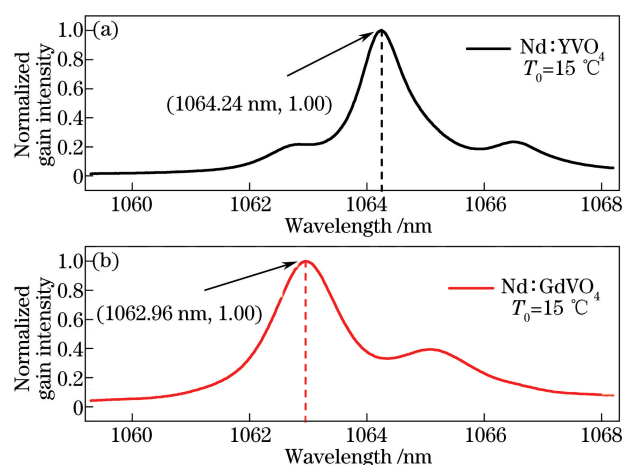


图2 不同晶体的发射谱。(a) Nd:YVO₄晶体发射谱;
(b) Nd:GdVO₄晶体发射谱

Fig. 2 Different crystals emission spectra. (a) Nd:YVO₄ crystal emission spectrum; (b) Nd:GdVO₄ crystal emission spectrum

激光信号组成双频激光信号,其频差远大于微片激光器纵模间隔所产生的双频激光信号。

另一方面,由于晶体具有发射谱随温度变化的特性,实验中调节 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合晶体热沉温度会使两种晶体的发射谱参数(包括幅度和波长)分别发生变化。根据文献[18],热沉温度的升高都会导致 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 晶体发射谱的波长红移、幅值降低。根据多模激光器的特性,当晶体发射谱红移,输出激光波长也会红移;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:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合晶体正是利用温度变化对两种晶体影响之间存在的差异,实现了双频激光器的功率均衡度可调谐。

3 实验研究

为了探究 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合晶体在特定抽运功率条件下的温度变化输出特性,实验中将抽运电流值固定为 14.5 A,对应 LD 输出功率为 5.4 W,同时控制热沉温度由 5 °C 开始均匀升至 40 °C,并以 5 °C 为间隔分别记录输出激光信号光谱,实验装置如图 3 所示。实验中使用输出中心波长为 808 nm 的 LD 作为抽运源,抽运光经尾纤及 GRIN 透镜会聚到激光增益介质,耦合光斑直径为

400 μm,然后在谐振腔完成受激放大,最终输出的激光信号通过带有耦合聚焦功能的准直器及多模光纤输入到光谱仪中。其中的激光增益介质是一块由 Nd:YVO₄ 晶体和 Nd:GdVO₄ 晶体组成的组合晶体。两种组成晶体的掺杂 Nd³⁺ 离子分数均为 1.0% 且都采用 *a* 轴切割,光轴垂直放置,同时位于前半部分的 Nd:YVO₄ 晶体的长度为 1 mm,后半部分 Nd:GdVO₄ 晶体的长度为 5 mm,组合晶体横截面尺寸则为 3 mm×3 mm。组合晶体轴向的各个端面分别镀膜,前端面镀有全反射膜(HR@1064 nm)和增透膜(AR@808 nm),后端面镀有增透膜(AR@1064 nm),中间组合起来的两个端面则均镀有增透膜(AR@808 nm&1064 nm)。在组合晶体后面则放置了镀有部分高反射膜(反射率 $R=90\%$ @1064 nm)和高反射膜(HR@808 nm)的平面反射镜,构成了法布里-珀罗(F-P)谐振腔。温控部分则通过在晶体外部包裹 0.1 mm 厚的铜膜并以夹持紧贴于热沉中的形式实现,借助置于热沉中的热敏电阻探头、TEC 温控器以及循环水冷装置,实现对晶体温度的控制,精度达 0.1 °C。另外,输出双频激光信号的光谱特性使用分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(OSA, *i* 型号为 AQ6370B,日本横河电机株式会社)进行测量。

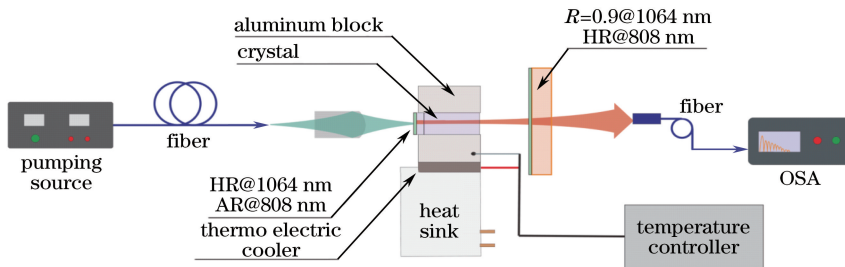


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup of the microchip laser

实验过程中固定抽运功率(抽运电流为 14.5 A),改变热沉温度,每 5 °C 记录一次 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合晶体输出的激光光谱,得到的光谱特性图如图 4 所示。

观察图 4 可以发现,在热沉温度从 5 °C 均匀升高到 40 °C 的过程中,输出的激光信号会出现左右两个频率峰值,波峰中心相差约为 1.2 nm,频差约为 310 GHz;同时随着温度的上升,其幅度都会明显减小,但减小的速率存在差异。

图 5(a)描述了输出激光信号的左右峰值功率(已根据最大值进行归一化处理)随热沉温度的变化

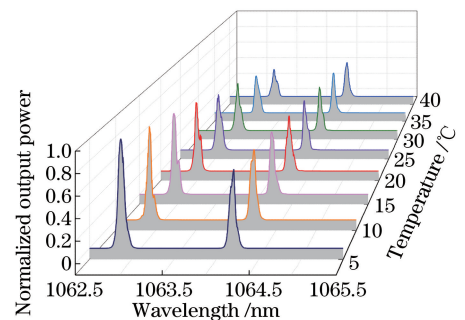
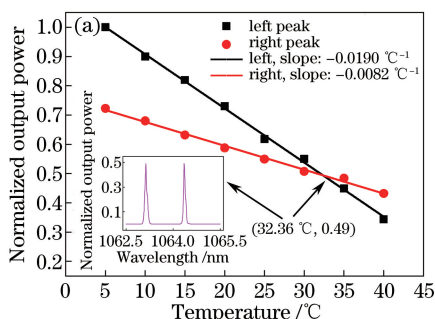


图 4 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合晶体光谱特性图

Fig. 4 Spectral characteristics of Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ combined crystal

情况。从图中可以看出,在整个变化过程中,左右峰的输出功率都与温度呈负相关关系。在温度均匀上升的过程中,左峰的输出功率从最大值下降到该值的34.34%,拟合直线的斜率为 $-0.0190\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;右峰的输出功率则从最大值的72.26%下降到该值的43.21%,拟合直线的斜率为 $-0.0082\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。值得注意的是,在温控过程中,由于左右峰值功率的减小速率不同,存



在功率均衡点。根据线性拟合的结果判断,均衡点位于 $32.36\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时的归一化输出功率皆为0.49。当位于功率均衡点时,双频激光信号左右峰的线宽分别为 0.086 nm 、 0.064 nm 。由于双频激光器为共腔谐振,因此双频相干性较高,经测量 1 h 频差稳定性小于 $\pm 3.0\%$ 。在功率均衡时,采用功率计对输出激光信号进行功率测量, 1 h 功率波动小于 $\pm 2.0\%$ 。

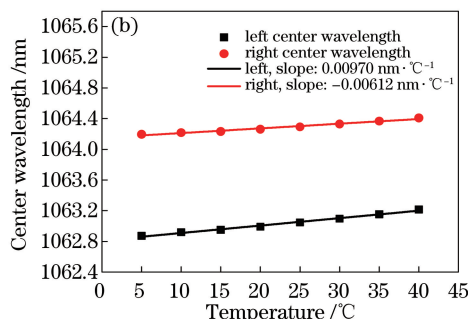


图5 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体。(a)归一化双频输出功率变化图;(b)中心波长变化

Fig. 5 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ combined crystal. (a) Normalized dual frequency output power change; (b) change of center wavelength

根据Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体激光器的输出光谱特性,可以发现随着热沉温度的升高,输出双频激光信号的左右峰中心波长都存在一定程度的红移,如图5(b)所示。在热沉温度从 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,Nd:GdVO₄晶体增益产生的左峰的中心波长由 1062.88 nm 增加到了 1063.22 nm ;Nd:YVO₄晶体增益产生的右峰的中心波长则从 1064.20 nm 红移到了 1064.40 nm ,频差始终保持在 310 GHz 以上。依据线性拟合的结果可知,左峰漂移速度为 $9.70\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$,右峰漂移速度为 $6.12\text{ pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$,而这也充分验证了该组合晶体激光器中Nd:YVO₄晶体和Nd:GdVO₄晶体部分的温度变化输出特性存在明显差异。

4 结 论

对于Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄组合晶体双频激光器而言,当保持一定的抽运功率时,可通过调节热沉温度来改变晶体的工作状态,实现Nd:YVO₄和Nd:GdVO₄晶体发射谱峰值的此消彼长,获得频差超过 310 GHz 且功率均衡度可调谐的双频激光信号输出。这种组合晶体激光器结构简单,又可以实现大频差、功率均衡的双频激光信号输出,是双频微片激光器设计的一种新思路,未来有望被应用于亚毫米波通信领域。

参 考 文 献

- [1] Li P P, Zheng N, Kang P C, *et al.* Overview and inspiration of global 5G spectrum researches [J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(6): 734-740.
李芃芃, 郑娜, 仇沛川, 等. 全球5G频谱研究概述及启迪[J]. 电讯技术, 2017, 57(6): 734-740.
- [2] Liu G P. Research on development strategy of radio spectrum resource management[D]. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2016: 1-6.
刘国平. 无线电频谱资源管理发展策略研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2016: 1-6.
- [3] Xi Y J. Radio spectrum resources [J]. GNSS World of China, 2002, 27(5): 40-43.
希玉久. 无线电频谱资源[J]. 全球定位系统, 2002, 27(5): 40-43.
- [4] Huang Z J. Optical carried microwave/millimeter-wave transmission technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 1-3.
黄宗杰. 光载微波/毫米波传输技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-3.
- [5] Tonda-Goldstein S, Dolfi D, Monsterleet A, *et al.* Optical signal processing in Radar systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(2): 847-853.
- [6] Chen J, Zhu H, Xia W, *et al.* Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter

- [J]. Optics Express, 2017, 25(2): 560-572.
- [7] Huo J W. All-Optical frequency up and down-conversion for millimeter-wave over fiber systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011: 1-6.
霍际伟. 毫米波 ROF 系统中全光频率变换技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 1-6.
- [8] 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.
- [9] Rolland 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.
- [10] Pillet G, Morvan L, Ménager L, *et al.* Dual-frequency laser phase locked at 100 GHz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3824-3830.
- [11] Hu M, Zhang H, Zhang F, *et al.* Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204205.
胡森, 张慧, 张飞, 等. 用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204205.
- [12] McKay A, Dawes J M. Microwave generation using a dual-helicoidally-polarized ceramic microchip laser[C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics Jointly Held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, September 09-October 03, 2008, Gold Coast, Qld, Australia. New York: IEEE, 2008: 263-266.
- [13] Wang R Y, Li Y F. Dual-polarization spatial-hole burning-free microchip laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(17): 1214-1216.
- [14] Hu M, Huang Q F, Zhang H, *et al.* Spectral and frequency difference characteristics of the LD-pumped dual-frequency solid-state laser [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(3): 472-477.
胡森, 黄前锋, 张慧, 等. LD 抽运的双频固体激光器的光谱和频差特性研究[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(3): 472-477.
- [15] Dai R, Hu M, Cai M L, *et al.* Experimental study of thermally induced frequency difference tuning of Nd: YVO₄ microchip dual frequency lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0101003.
戴荣, 胡森, 蔡美伶, 等. Nd: YVO₄ 双频微片激光器的热致频差调谐实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101003.
- [16] Huang Y J, Cho H H, Su K W, *et al.* Exploring a diffusion-bonded Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ crystal for generating an efficient diode-end-pumped dual-spectral-band laser [C] // Advanced Solid State Lasers, October 04-09, 2015, Berlin, Germany. Washington: Optical Society of America, 2015: ATu1A.7.
- [17] 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): 972-976.
- [18] 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.