

# 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

蔡美伶<sup>1</sup>, 胡 淼<sup>1,2</sup>, 戴 荣<sup>1</sup>, 陈 松<sup>1</sup>, 李齐良<sup>1</sup>, 周雪芳<sup>1</sup>, 魏一振<sup>1</sup>, 卢 畅<sup>1</sup>, 毕美华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 实验研究了 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体发射截面谱的温度特性, 并根据发射截面谱与激光波长的对应关系, 进一步研究了温度对 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 双频微片激光器输出光谱的影响。实验结果表明, 在所研究的温度范围内, 随着温度的升高, Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体发射截面谱的中心波长发生红移、峰值下降, 且均与温度呈准线性关系; 对应的双频微片激光器波长也随温度升高呈现线性红移, 但双频频差保持不变; 在晶体发射截面谱和激光波长的共同红移作用下, 双频激光分量的功率均衡度发生变化。

**关键词** 激光器; 功率均衡; 温控; 热致波长漂移; 发射截面谱; 激光光谱

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1101004

## Experimental Study of Emission Cross Section Spectra and Microchip Laser Spectra of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> Crystals

Cai Meiling<sup>1</sup>, Hu Miao<sup>1,2</sup>, Dai Rong<sup>1</sup>, Chen Song<sup>1</sup>, Li Qiliang<sup>1</sup>, Zhou Xuefang<sup>1</sup>,  
Wei Yizhen<sup>1</sup>, Lu Yang<sup>1</sup>, Bi Meihua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University,  
Shanghai 200240, China

**Abstract** The temperature characteristics of emission-cross section spectra of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> crystals are studied experimentally. According to the relationship between the emission cross section spectra and the laser wavelength, the influence of temperature on the output spectra of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> dual-frequency microchip laser wavelengths is further investigated. The experimental results show that, in the studied temperature range, the central wavelength of the emission-cross section spectra of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> crystals shows red-shift and the peak decline. Both of them are linearly related to the temperature. The wavelength of the corresponding dual-frequency microchip laser also shows a linear red shift with temperature increasing, but the double frequency difference remains unchanged. The power balance of the dual-frequency laser changes with the common red-shift of the crystal emission cross section spectrum and the laser wavelength.

**Key words** lasers; intensity balance; temperature control; thermal induced wavelength shift; emission cross section spectrum; laser spectrum

**OCIS codes** 140.3410; 140.3480; 140.3530; 140.6810

收稿日期: 2017-05-16; 收到修改稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705055); 浙江省公益技术研究工业项目(2016C31068)

作者简介: 蔡美伶(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事双频微片激光器方面的研究。E-mail: cai\_meiling@qq.com

导师简介: 胡 淼(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事大功率 LED 技术和激光技术方面的研究。

E-mail: miao\_hu@foxmail.com (通信联系人)

## 1 引 言

双频激光器因其在卫星激光测距<sup>[1-3]</sup>、全息干涉测量<sup>[4]</sup>、气象参数确定<sup>[5]</sup>和非线性光学频率转换<sup>[6]</sup>等方面的潜在应用而受到极大的关注。由于较大的发射截面和宽带抽运光吸收特性,掺钕(Nd)材料的激光增益介质是双频微腔激光器的理想增益介质材料,这也使其成为近些年双频激光器领域的重要研究对象。国内外众多科研团队对掺 Nd 双频微片激光器进行了研究,2005 年, Tani 等<sup>[7]</sup>采用双频 Nd:YVO<sub>4</sub>微片激光器实现了频差为 0.1 THz 的双频激光信号输出。2009 年, McKay 等<sup>[8]</sup>采用垂直模 Nd:YAG(YAG 表示钕铝石榴石)陶瓷激光器,获得了最大频差为 0.15 THz 的可调谐双频激光信号输出。在国内,2013 年,杨清等<sup>[9]</sup>采用非锁定双纵模 Nd:YVO<sub>4</sub>微片激光器获得线宽为 20 MHz、频差为 0.1~0.2 THz 可调的双频激光信号输出;2015 年, Huang 等<sup>[10]</sup>提出并成功实现了一种以新型键合 Nd:GdVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>晶体为激光介质的二极管端抽运固态激光器,在 1.06 μm 附近实现了中心波长分别为 1063.17 nm 和 1064.41 nm 的有效的 π 偏振双频激光输出;同年,胡森等<sup>[11]</sup>采用双纵模 Nd:YVO<sub>4</sub>微片激光器作为种子光源,通过行波放大器获得了功率为 2.38 W、频差为 47.7 GHz 的双频激光信号输出。作为优秀的掺 Nd 材料的激光增益介质, Nd:GdVO<sub>4</sub>与 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的光学性质相近,而热性能更加优秀。Nd:GdVO<sub>4</sub>较 Nd:YAG 晶体具有更高的斜效率,较 Nd:YVO<sub>4</sub>具有更好的热导系数<sup>[12-13]</sup>。考虑到晶体温度改变引起的晶体发射截面谱<sup>[14]</sup>和双频微片激光光谱的红移速率不同,会引起双频激光功率均衡变化<sup>[15]</sup>。基于此,本文详细研究了 Nd:GdVO<sub>4</sub>和 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在不同温度下的发射截面谱及其双频微片激光器的输出激光光谱,并进行各项参数的对比分析。论文的第二部分阐述了晶体发射截面谱随温度红移的原理和双频微片激光器的工作原理,第三部分展示了晶体荧光光谱和双频激光光谱的测量实验装置,第四部分分析了晶体发射截面谱和双频激光光谱随温度变化的实验结果。

## 2 理论基础

发射截面谱作为激光增益介质的重要特性之一,对双频微片激光器的输出功率均衡产生重要影响。在工作过程中,激光器热量在增益介质中积累,使增益介质的荧光光谱发生漂移。根据 Fuchtbauer-Ladenburg 公式<sup>[16]</sup>,荧光光谱随温度的变化直接影响激光发射截面谱。考虑发射截面谱与温度的关系,给出了温度依赖的 Fuchtbauer-Ladenburg (TF-L) 修正公式为

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

式中  $T$  为温度,  $\lambda$  为波长,  $\bar{\lambda}$  是平均发射波长,  $c$  是光速,  $n(T)$  是随温度变化的折射率,  $\tau_{rad}(T)$  是随温度变化的辐射寿命,  $I(\lambda, T)$  是荧光光谱。采用实验测得的不同温控条件下的荧光光谱,结合增益介质的辐射寿命和折射率,通过数值计算得到不同温控条件下的增益介质的发射截面谱。在已知发射截面谱的前提下, Schmitt 等<sup>[17]</sup>给出描述微腔激光器的光谱线的理论模型,并给出了发射截面谱内振荡模式个数的最大值:

$$\begin{cases} m = 2\Delta v_0 nL/c \\ d\lambda/dT = \lambda(\alpha_e + 1/n \times dn/dT) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  是中心波长,  $\alpha_e$  为热膨胀系数,  $dn/dT$  是热光系数,  $\Delta v_0$  是激光器的发射带宽,  $n$  为晶体的折射率,  $L$  为激光腔的几何长度。通过控制激光器的腔长  $L$ , 控制纵模间隔小于  $\Delta v_0$  且大于  $\Delta v_0/2$ , 可获得双纵模振荡输出。考虑到晶体的折射率  $n$  和尺寸会随热量在增益介质内积聚而改变, 而双频微腔激光器的谐振波长与谐振腔的光程相关, 因此温度的改变也将导致双频激光波长的漂移。漂移率由(2)式给出。

## 3 实验装置

为了研究增益介质的发射截面谱和双频激光波长的实验温度特性, 在不同温控条件下对增益介质进行荧光光谱和双频激光光谱进行测试。搭建的实验装置如图 1 所示, 抽运源为一个中心波长为 808 nm 的激光二极管(LD), 抽运光被耦合进一段芯径为 100 μm 的光纤后, 经由一个耦合效率为 85% 的梯度折射率(GRIN)透镜被会聚到晶体中心。GRIN 透镜和晶体的中心位于同一光轴上, LD 尾纤和 GRIN 透镜之间的

距离固定。输出光由 1:1 分光镜分成两部分,一部分进入光谱分析仪(OSA,型号:AQ6370B,日本横河电机株式会社)记录输出光谱;另一部分进入光功率计(型号:PM10X,美国相干公司)测量输出功率。

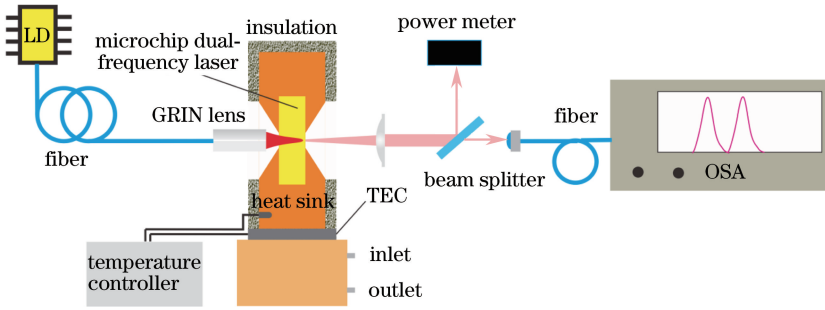


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

测量激光光谱所用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体均为双端镀膜,前端面镀有高反射膜(1064 nm)和增透膜(808 nm),后端面镀有反射膜(1064 nm 处反射率 R=90%),构成了一体化的谐振腔;测量荧光光谱则采用双端未镀膜 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体代替双端镀膜晶体。实验中使用的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体均为掺杂摩尔分数为 1%、尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm 的 a-cut 晶体。为了得到更好的热接触,晶体外部包覆一层 0.1 mm 厚的导热性能良好的钢箔,钢箔被放置在铝制底座内,通过半导体制冷器(TEC)温控器和水循环装置实现对晶体底座温度的精确控制。上述温控装置的温控范围为 -5~100 °C,精度为 0.1 °C。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 Nd:GdVO<sub>4</sub> 以及 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体发射截面谱的测量比较

考虑晶体表面温度  $T_c$  在 0~100 °C 范围内变化,掺 Nd 增益介质的折射率  $n(T)$  和辐射寿命  $\tau_{rad}(T)$  随温度的变化对发射截面谱造成的影响极小,故可以假定在所研究的温度范围内,Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的折射率  $n(T)$  和辐射寿命  $\tau_{rad}(T)$  为常数。因此,根据修正后的 TF-L 公式[(1)式]可知,Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射截面谱  $\sigma(\lambda, T)$  随温度的变化只与其对应温度下的荧光谱  $I(\lambda, T)$  有关。也就是说在某一特定热沉温度下,可以利用实验中测得的相同热沉温度下的荧光谱  $I(\lambda, T)$  计算得到掺 Nd 介质的发射截面谱  $\sigma(\lambda, T)$ 。因此,根据实验测得  $\pi$  偏振荧光光谱以及温度依赖的 TF-L 公式,Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的归一化发射截面谱分别为  $\sigma_1(\lambda, T) = \sigma_1(T) / \max[\sigma_1(\lambda, 0\text{ °C})]$  及  $\sigma_2(\lambda, T) = \sigma_2(T) / \max[\sigma_2(\lambda, 0\text{ °C})]$ 。

如图 2 所示,在 1060~1069 nm 波段内,Nd:GdVO<sub>4</sub> 发射截面谱主峰在 1063 nm 附近,Nd:YVO<sub>4</sub> 发射截面谱主峰在 1064 nm 附近。此外还可以看出,随着温度的增加,a-cut 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射截面谱的主峰中心波长  $\lambda_{\sigma_1}, \lambda_{\sigma_2}$  均发生红移,发射截面谱峰值  $\max[\sigma_1(T)]$  和  $\max[\sigma_2(T)]$  则降低。

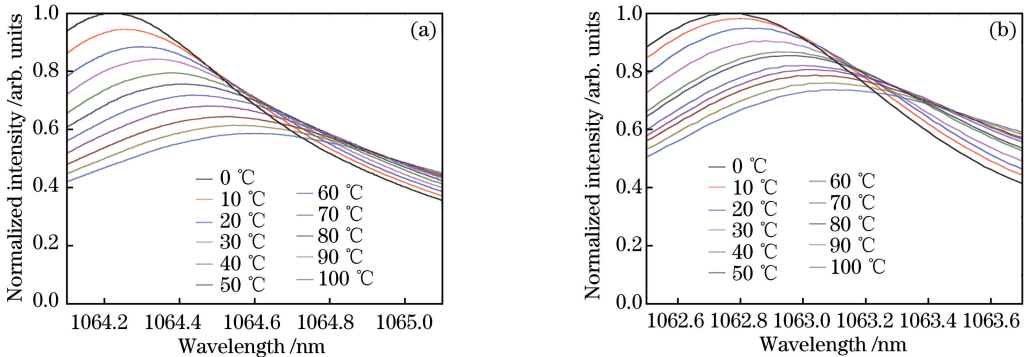


图 2  $T_c$  为 0~100 °C 时,归一化的(a) Nd:YVO<sub>4</sub> 和(b) Nd:GdVO<sub>4</sub> 的发射截面谱

Fig. 2 Normalized emission-cross section spectra of (a) Nd:YVO<sub>4</sub> and (b) Nd:GdVO<sub>4</sub> while the range of  $T_c$  is 0~100 °C

Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的发射截面谱 $\sigma(\lambda, T)$ 随温度增加而降低。

图3(a)和(b)分别给出了Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体发射截面谱的归一化峰值 $\sigma_{\text{eff}}$ (发射截面)与热沉温度 $T_c$ 的关系。定义归一化峰值 $\sigma_{\text{eff}} = \max[\sigma(T_c)]/\max[\sigma(0^\circ\text{C})]$ ,其中, $\max[\sigma(0^\circ\text{C})]$ 对应于热沉温度 $T_c = 0^\circ\text{C}$ 时发射截面谱的峰值。给定参数的Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的发射截面谱峰值 $\sigma_{\text{eff1}}$ 和 $\sigma_{\text{eff2}}$ 均与温度呈准线性关系, $\sigma_{\text{eff1}}(T)$ 和 $\sigma_{\text{eff2}}(T)$ 随温度升高的平均下降率分别为0.268%/°C,0.319%/°C。相较而言, $\sigma_{\text{eff2}}$ 比 $\sigma_{\text{eff1}}$ 受晶体热效应影响更大,下降更为明显。如图3(c)所示,热沉温度由0°C增加到100°C时,Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的发射截面谱的峰值波长 $\lambda_{\sigma_1}$ 和 $\lambda_{\sigma_2}$ 均向长波方向移动, $\lambda_{\sigma_1}$ 从1062.76 nm红移到1063.10 nm, $\lambda_{\sigma_2}$ 从1064.22 nm红移到1064.61 nm。通过线性拟合,得到 $\lambda_{\sigma_1}$ 和 $\lambda_{\sigma_2}$ 与热沉温度呈准直线变化,红移率分别为3.55 pm/°C和3.84 pm/°C。图3(c)还展示了Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的发射截面谱的半峰全宽(FWHM)的展宽效应,二者均与温度呈准线性关系,展宽率分别为0.59 pm/°C和7.86 pm/°C,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体发射截面谱的半峰全宽的展宽率几乎为Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的14倍。

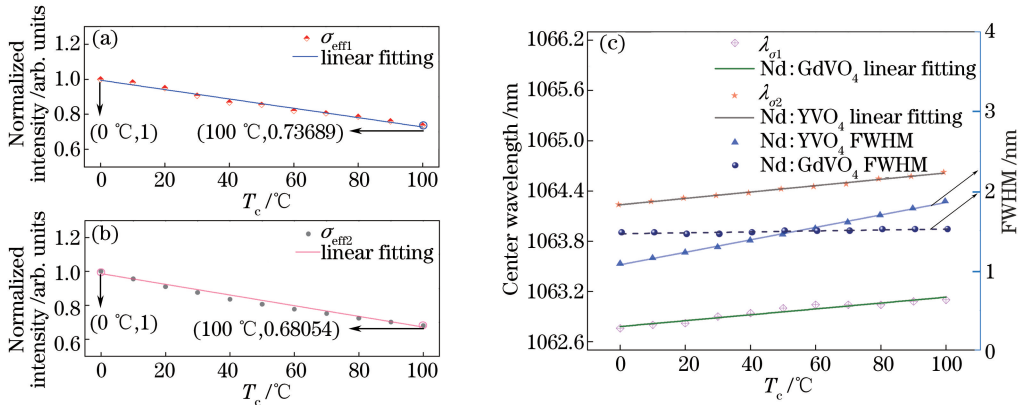


图3 (a) Nd:GdVO<sub>4</sub>和(b) Nd:YVO<sub>4</sub>的归一化发射截面谱的峰值随温度的变化;(c)中心波长和半峰全宽随温度的变化

Fig. 3 Variation of the normalized emission-cross section spectra peak power of (a) Nd:GdVO<sub>4</sub> and (b) Nd:YVO<sub>4</sub> with temperature; variation of central wavelength and FWHM with temperature

#### 4.2 Nd:GdVO<sub>4</sub>以及Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出激光光谱测量比较

采用实验装置如图1所示,固定抽运电流为14.5 A,控制热沉温度在0~100°C范围变化,依次将晶体换为同尺寸的双端镀膜Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,每5°C记录输出光谱。图4(a)和(b)分别为Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器归一化频谱图。实验结果显示,随着温度的升高,Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器受晶体热效应影响,中心波长均向右红移,并发生跳模现象。Nd:GdVO<sub>4</sub>双频激光器在 $T_c = 0^\circ\text{C}$ 时,输出激光为三纵模,波长分别为 $\lambda_1$ (左峰中心波长)、 $\lambda_0$ (中间峰中心波长)、 $\lambda_{-1}$ (右峰中心波长)。随着温度的逐步升高, $\lambda_{-1}$ 由于模式竞争<sup>[18]</sup>逐渐减弱,最终在 $T_c = 15^\circ\text{C}$ 时消失; $\lambda_1$ 和 $\lambda_0$ 向长波方向漂移, $\lambda_0$ 最终在 $T_c = 80^\circ\text{C}$ 时消失,激光输出单纵模。在0~100°C的温控范围内,当热沉温度 $T_c$ 小于35°C时,Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出激光波长为 $\lambda'_0$ (左峰中心波长)和 $\lambda'_{-1}$ (右峰中心波长)的两个纵模,两者在激光谐振腔内形成稳定振荡;当热沉温度 $T_c$ 被控制在35°C时,另一波长为 $\lambda'_{-1}$ 的纵模在激光谐振腔内开始振荡,此时激光器出现三纵模激光振荡;当热沉温度 $T_c$ 高于35°C时,波长为 $\lambda'_{-1}$ 的纵模漂出激光器的增益带宽,仅有波长为 $\lambda'_0$ 和 $\lambda'_{-1}$ 的两个纵模在激光谐振腔内形成稳定振荡。同时,由于温度升高,激光器阈值的增大以及发射截面谱峰值的降低导致Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出光谱功率逐渐降低。

图5(a)和(b)给出了Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出激光中心波长与温度的关系。可以看出Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的热效应导致双频激光器输出激光波长与温度呈准线性红移关系。如图5(a)所示,当热沉温度 $T_c$ 从0°C变化到15°C的过程中,Nd:GdVO<sub>4</sub>双频激光器波长 $\lambda_{-1}$ 从1063.24 nm漂移到1063.32 nm,漂移率为5.44 pm/°C; $T_c$ 温度从0°C增加至70°C过程中,波长 $\lambda_0$ 从1062.99 nm漂移到1063.59 nm,漂移率为7.83 pm/°C;波长 $\lambda_1$ 在实验温度范围内(0~100°C)均在发射截面谱的增益带宽内,波长 $\lambda_1$ 从1062.78 nm漂移到1063.52 nm,漂移率为7.31 pm/°C。如图5(b)所示,在热沉温度 $T_c$ 从

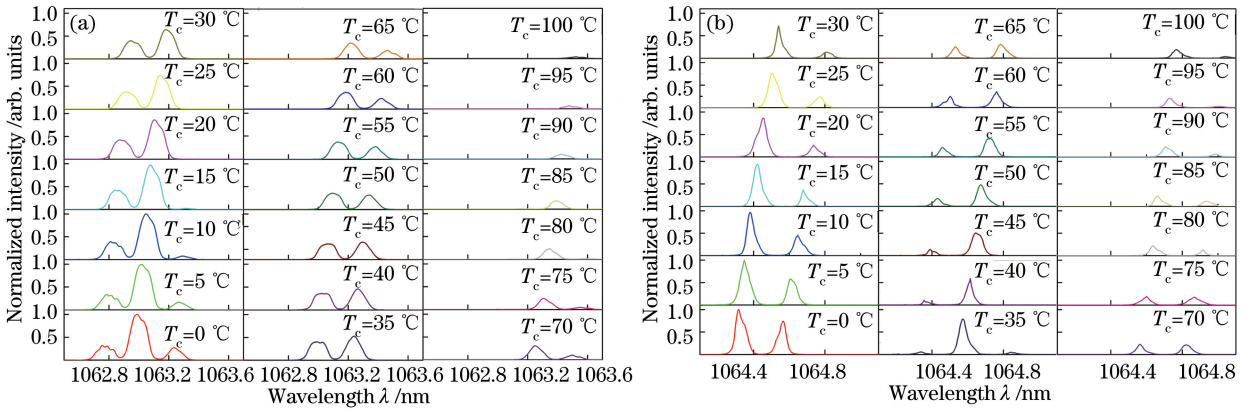


图 4 (a) Nd:GdVO<sub>4</sub>和(b) Nd:YVO<sub>4</sub>双频微片激光器的归一化频谱

Fig. 4 Normalized spectra of (a) Nd:GdVO<sub>4</sub> and (b) Nd:YVO<sub>4</sub> dual-frequency microchip lasers

0 °C变化到 35 °C的过程中,Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器波长  $\lambda'_1$ 从 1064.53 nm 漂移到 1064.84 nm;同样地,在热沉温度  $T_c$ 从 35 °C变化到 95 °C的过程中,波长  $\lambda'_{-1}$ 从 1064.34 nm 漂移到 1064.73 nm;在热沉温度  $T_c$ 从 0 °C变化到 100 °C的过程中,波长  $\lambda'_0$ 从 1064.28 nm 漂移到 1065.01 nm。在所研究的温控范围内,三个激光模式的峰值波长  $\lambda'_1$ 、 $\lambda'_0$ 和  $\lambda'_{-1}$ 随着热沉温度  $T_c$ 的升高均出现线性红移,它们的红移速率分别为 7.96, 7.40, 6.75 pm/°C。

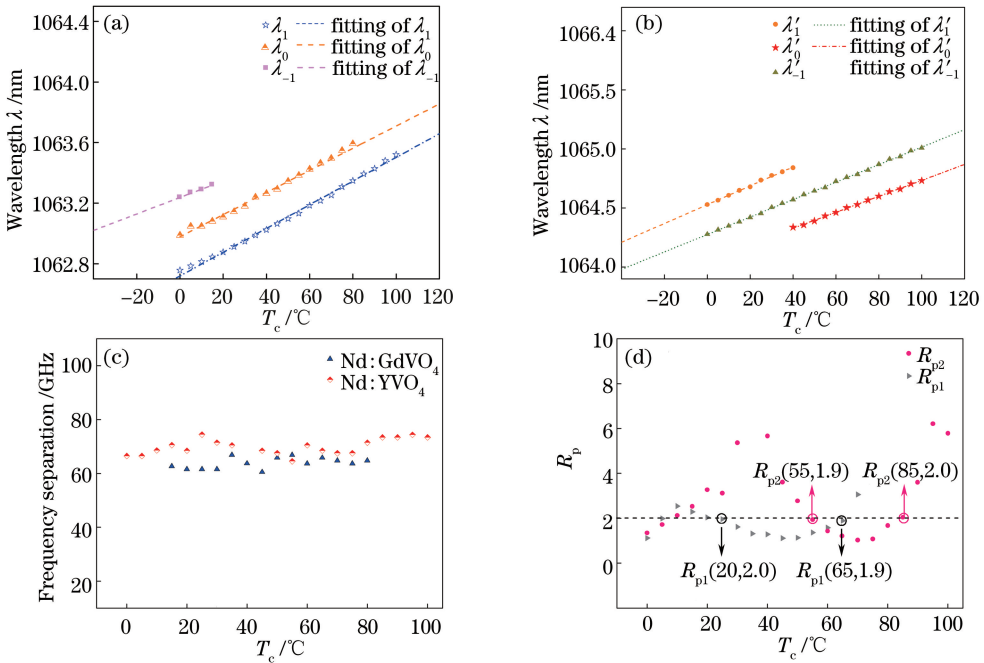


图 5 (a) Nd:GdVO<sub>4</sub>和(b) Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出激光波长随温度的变化;双频激光器的 (c)输出频差和(d)功率均衡度  $R_p$ 随温度的变化

Fig. 5 Variation of output laser wavelength of (a) Nd:GdVO<sub>4</sub> and (b) Nd:YVO<sub>4</sub> dual-frequency laser with temperature; variation of (c) output frequency difference and (d) intensity balance ratio  $R_p$  of dual-frequency laser with temperature

图 5(c)所示为 Nd:GdVO<sub>4</sub>和 Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器输出激光频差随温度的变化。随着温度的升高,两种激光器的频差变化均较小。Nd:GdVO<sub>4</sub>双频激光器的频差约为 64 GHz,变化范围不超过  $\pm 3.5$  GHz;Nd:YVO<sub>4</sub>双频激光器的频差约为 70 GHz,变化范围为 66.5~74.3 GHz。定义功率均衡度  $R_p$ 为输出激光中较大峰值功率与较小峰值功率的比值,即  $R_p = \max(P_R, P_L) / \min(P_R, P_L)$ ,其中  $P_R$ 为输出光谱的右峰峰值功率, $P_L$ 为输出光谱的左峰峰值功率。 $R_p$ 越接近 1 说明输出激光功率均衡度越好。如图 5(d)所示,随着温度上升两种激光器输出激光的功率均衡度均发生改变,其中 Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器输

出激光的功率均衡度  $R_{p1}$  随温度升高改变平缓,  $R_{p1}$  均在  $(1, 2]$  区间内的温度范围为  $20 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 而 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出激光的功率均衡度  $R_{p2}$  随温度升高变化剧烈, 其值在热沉温度处于  $55 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内连续处于  $(1, 2]$  的区间内。Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体发射中心波长的热致漂移率与其对应激光波长的热致漂移率不同步, 是导致双频激光器输出双频激光的功率均衡度发生变化的主要原因, 其中 Nd:GdVO<sub>4</sub> 双频激光器输出功率均衡度受温度影响较小。本研究结果对复合介质的双频激光器的频差调谐机制和功率均衡机制有较大帮助。

## 5 结 论

通过控制热沉温度, 对 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射截面谱进行研究, 发现 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射截面谱中心波长随温度升高呈线性红移, 而发射截面谱峰值则线性下降。对双频激光器光谱的研究则发现, 随着温度的升高 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 双频激光器输出频差保持不变, 但功率均衡度发生变化。Nd:GdVO<sub>4</sub> 双频激光器输出功率均衡度受温度影响较小, 而且具有更广的可工作温度区间。

## 参 考 文 献

- [1] Hamel C, Bondu F, Loas G, *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] 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.
- [3] 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.
- [4] Wang S, Gao Z, Li G, *et al.* Continual mechanical vibration trajectory tracking based on electro-optical heterodyne interferometry[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7799-7810.
- [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] Tani M, Morikawa O, Matsuura S, *et al.* Generation of terahertz radiation by photomixing with dual- and multiple-mode lasers[J]. Semiconductor Science & Technology, 2005, 20(7): S151.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Hu M, Zheng Y Y, Cai J, *et al.* CW dual-frequency MOPA laser with frequency separation of 45 GHz[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9881-9889.
- [12] Cao H, Feng G, Fan T, *et al.* Comparison of thermal effects of Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal slab by laser diode end-pumped[J]. Infrared & Laser Engineering, 2011, 40(12): 2365-2369.
- [13] Turri G, Janssen H P, Cornacchia F, *et al.* Temperature-dependent stimulated emission cross section in Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(11): 2084-2088.
- [14] Hu Miao, Zhang Yu, Gong Xuren, *et al.* The investigation of power equalization in a dual-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser[J]. Optoelectronics • Laser, 2016, 27(2): 145-149.  
胡淼, 张瑜, 巩续仁, 等. 双频 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片激光器功率均衡研究[J]. 光电子 • 激光, 2016, 27(2): 145-149.
- [15] 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.
- [16] Délen X, Balembois F, 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.
- [17] Schmitt N P, Peuser P, Heinemann S, *et al.* A model describing the single and multiple line spectra of tunable microcrystal lasers[J]. Optical and Quantum Electronics, 1993, 25(8): 527-544.
- [18] Hu Miao, Sun Xiao, Li Qiliang, *et al.* The investigation of mode competition in a dual-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702009.
- 胡淼, 孙晓, 李齐良, 等. Nd:YVO<sub>4</sub>双频微片激光器的模式竞争研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702009.