

# 双波长 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 激光器

方文兵<sup>1,2</sup>, 赵 斌<sup>3</sup>, 林海枫<sup>1,2</sup>, 陈玮冬<sup>1</sup>, 李丙轩<sup>1</sup>, 张 戈<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>福州大学化学与化工学院, 福建 福州 350108

**摘要** 研究了光纤耦合半导体激光器端面抽运 c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 晶体的激光性能。根据该晶体在 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>F<sub>11/2</sub> 能级跃迁的光谱特性及四能级激光系统的阈值条件, 理论计算了产生 1068 nm 和 1085 nm 的单、双波长激光的实验条件。实验研究了该晶体在自由运转条件下产生 1068 nm 和 1085 nm 单波长激光输出的性能, 并使用具有亚太赫兹自由光谱范围的法布里-珀罗标准具调节 1068 nm 和 1085 nm 两个激光振荡波长的增益竞争, 实现了 4.4 THz 频差的多瓦连续波双波长激光的稳定、均衡输出。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 双波长激光; 法布里-珀罗标准具; Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub>

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901008

## Dual-Wavelength Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> Laser

Fang Wenbing<sup>1,2</sup>, Zhao Bin<sup>3</sup>, Lin Haifeng<sup>1,2</sup>, Chen Weidong<sup>1</sup>, Li Bingxuan<sup>1</sup>, Zhang Ge<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** We study the laser performance of c-cut Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> crystal end-pumped by optical fiber coupled semiconductor laser. Based on the spectral characteristics of the <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>F<sub>11/2</sub> energy level transition and the threshold conditions of four-level laser system, the experimental conditions to generate single- and dual-wavelength laser at 1068 nm and 1085 nm are calculated theoretically. The output characteristics of the single-wavelength laser at 1068 nm and 1085 nm generated in free running of this crystal are studied experimentally, and an Fabry-Perot etalon with sub-terahertz free spectral range is used to adjust the gain competition of two laser oscillating wavelengths at 1068 nm and 1085 nm. The stabilized and balanced output of multi-watt continuous dual-wavelength emission with a frequency offset of 4.4 THz is realized.

**Key words** lasers; all-solid-state; dual-wavelength laser; Fabry-Perot etalon; Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub>

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.3530

## 1 引 言

双波长激光器已被广泛应用于许多前沿领域, 例如激光全息、激光雷达、激光光谱学研究和医疗仪器等<sup>[1-5]</sup>。更重要的是, 使用光电导天线和非线性光学晶体<sup>[6]</sup>对两个频率差为太赫兹波段的光学波长进行光学混频, 为产生相干太赫兹(THz)辐射提供了一种有效的方法。全固态双波长激光器已成功应用于研发紧凑型相干太赫兹光源<sup>[7-9]</sup>。随着紧凑型太赫兹光源的应用领域不断扩大, 越来越多的人开始意识到使用全固态

收稿日期: 2017-04-11; 收到修改稿日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11404332, 61575199)、福建省科技计划(2016H01010145, 2017H01010058)

作者简介: 方文兵(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态涡旋激光器方面的研究。E-mail: fwb@fjirsm.ac.cn

导师简介: 张 戈(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光、非线性光学材料及相关器件方面的研究。

E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn(通信联系人)

激光器直接产生双波长激光的重要性。

目前已有许多方法用于研究在全固态激光器中直接产生双波长激光振荡,主要包括使用腔内光谱选择元件(如啁啾体布拉格光栅<sup>[10]</sup>、棱镜对<sup>[11]</sup>、双折射滤波片<sup>[12]</sup>和法布里-珀罗标准具<sup>[13]</sup>)、双激光增益介质<sup>[14]</sup>、特殊镀膜的谐振腔镜<sup>[15]</sup>、激光增益介质的自然双折射<sup>[16]</sup>、低温发射<sup>[17]</sup>、腔镜失调<sup>[18]</sup>、重吸收损耗<sup>[19]</sup>及热透镜效应<sup>[20]</sup>等。

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$  能级跃迁为钕离子( $Nd^{3+}$ )掺杂的激光增益介质,尤其是钒酸盐晶体(包括  $Nd:YVO_4$ 、 $Nd:GdVO_4$  及  $Nd:LuVO_4$  晶体等)提供了许多尖锐的荧光发射谱线<sup>[21-23]</sup>。近年来,钕离子掺杂的钒酸盐混晶作为一种性能优异的激光晶体,既保留其掺杂钒酸盐晶体的优良光学物理特性,还能够通过变化混晶中的  $Y^{3+}$ 、 $Gd^{3+}$  及  $Lu^{3+}$  的比例改变其光谱特性,主要包括晶体的吸收和发射截面、吸收和荧光发射线宽及激光上能级寿命等<sup>[24]</sup>。在特定情况下, $La^{3+}$  能够占据  $RE^{3+}$  ( $RE^{3+}$  为  $Y^{3+}$ 、 $Gd^{3+}$  或  $Lu^{3+}$ ) 的格位形成具有无序结构的混晶,即  $Nd^{3+}:RE_{1-x}La_xVO_4$ <sup>[25-27]</sup>。基于  $La^{3+}$  掺杂的钕钒酸盐混晶的连续、调 Q 脉冲及锁模等激光性能方面开展的研究已经有相关报导<sup>[28-35]</sup>,但目前尚未见使用  $La^{3+}$  掺杂的钕钒酸盐混晶产生高功率双波长激光的相关研究。

使用 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体作为激光增益介质,构建紧凑的直线型法布里-珀罗谐振腔产生双波长激光振荡。相较 a 切晶体而言,c 切钕钒酸盐晶体的  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$  能级跃迁具有更宽的荧光发射带宽和更丰富的荧光发射谱线。这些优点使 c 切钕钒酸盐晶体更有利于作为产生双波长激光振荡的激光增益介质<sup>[36-38]</sup>。

本文首先研究 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体的光谱特性,分析其用作双波长激光增益介质的可行性。随后开展了基于该晶体的半导体端面抽运全固态激光器在 1068 nm 和 1085 nm 单波长运转下的激光性能研究。最后开展了基于该晶体的半导体端面抽运全固态双波长激光运转的研究,两个振荡波长的偏差为 4.4 THz。光混频需要两个具有相同输出功率的双波长激光以获得最佳转换效率<sup>[18]</sup>,因此双波长激光器研究中最具挑战的问题是如何管理双波长的增益竞争。使用具有亚太赫兹自由光谱范围的法布里-珀罗标准具调节 1068 nm 和 1085 nm 两个激光振荡波长的增益竞争,实现 3.8 W 双波长激光的均衡输出。

## 2 光谱性能研究

首先研究 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体的室温荧光吸收和发射光谱。图 1(a)是实验测量的 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体在 780~910 nm 波长范围内的吸收光谱(光谱测量分辨率为 0.1 nm),其中最强吸收峰的中心波长为 810 nm (半峰全宽为 9.7 nm)。相较  $Nd:LuVO_4$  晶体(吸收峰为 809 nm,半峰全宽为 8 nm<sup>[39]</sup>), $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体吸收峰有一定的展宽和漂移,这主要是由于  $La^{3+}$  的掺杂引起了晶格部分畸变<sup>[40]</sup>。图 1(b)是实验测量的 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$  跃迁的荧光发射光谱,分辨率为 0.1 nm。发射光谱在 1050~1100 nm 范围有两个主要的荧光发射带,分别位于 1060 nm 和 1080 nm。其中,1060 nm 发射带对应了三条荧光发射谱线,分别为 1062.3,1065.6,1067.9 nm;而 1085 nm 发射带则由两

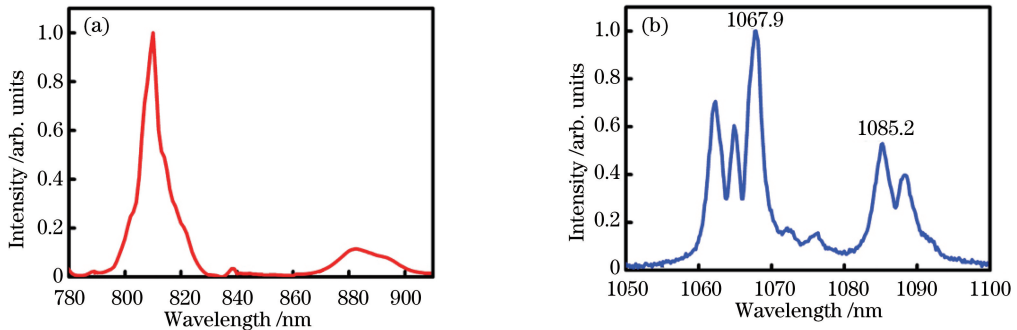


图 1 c 切  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  晶体的(a)室温吸收光谱和(b)  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$  能级跃迁的室温荧光发射光谱

Fig. 1 (a) Room-temperature absorption spectrum and (b) fluorescence emission spectrum for the

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$  energy level transition of c-cut  $Nd:Lu_{0.99}La_{0.01}VO_4$  crystal

条发射谱线 1085.2 nm 和 1088.3 nm 组成。由图 1(b)可知,该晶体在 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{11/2}$ 跃迁的荧光发射谱线强度相差不大,只要在谐振腔内引入特定的光谱损耗,控制跃迁谱线间的增益竞争关系,就可能实现稳定的双波长运转。

### 3 实验装置

激光实验装置如图 2 所示。实验使用提拉法生长的钕离子原子数分数为 0.27% 的 c 切  $\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  混晶作为激光增益介质。由于 c 切钕离子掺杂正钒酸盐晶体的吸收截面远小于 a 切晶体,因此采用 19 mm 长 c 切  $\text{Nd}:\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  混晶以增加有效的抽运吸收。晶体的两个端面(3 mm×3 mm)抛光并镀激光增透膜(增透膜波长范围 800~1100 nm)。晶体包裹铜箔后放入铜块进行散热,铜块由半导体温控仪控温并维持在 293 K。激光器的抽运光源是波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器,光纤的数值孔径为 0.22,芯径为 200  $\mu\text{m}$ 。抽运光经过一对耦合透镜组准直并聚焦到激光晶体内部,焦点位置的抽运光直径为 375  $\mu\text{m}$ (抽运光的共焦参数为 15 mm)。凹平激光谐振腔由一个曲率半径为 100 mm 的平凹谐振腔全反镜和一个具有特定部分反射率的输出耦合镜片组成。谐振腔全反镜的镀膜参数对抽运波长高透(透射率  $T > 98\%$ ),对激光波长高反射(反射率  $R > 99.9\%$ )。激光谐振腔的总腔长为 25 mm。激光发射光谱由 0.1 nm 光谱分辨率的海洋光谱仪进行测量。

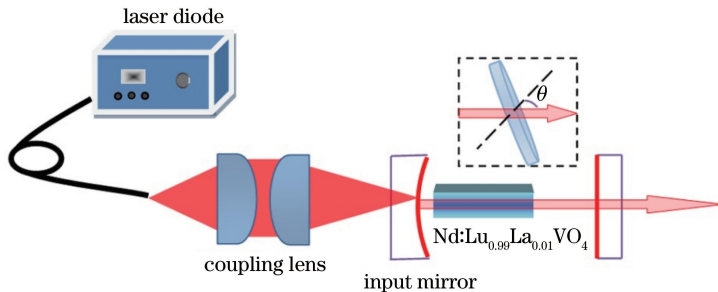


图 2  $\text{Nd}:\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  激光器实验装置

Fig. 2 Experimental configuration of  $\text{Nd}:\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  laser

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 1068 nm 单波长激光运转

使用 1050~1100 nm 波段透射率为 20% 的输出耦合镜片研究激光器自由运转条件下的连续波振荡性能。实验测量的激光输出功率曲线如图 3(a)所示。激光振荡阈值为 1.42 W,当注入抽运功率为 20 W 时,实验产生的最大激光输出功率为 5.3 W,相应的激光斜效率为 28.7%,光-光转换效率为 26.5%。图 3(a)中近线性的功率传递特性表明,热效应并未显著影响激光性能。因此,可以通过优化输出耦合镜在激光波段的反射率,获得更高输出功率的激光振荡。图 3(b)是在最大输出功率时测量的激光发射光谱。激光发射的中

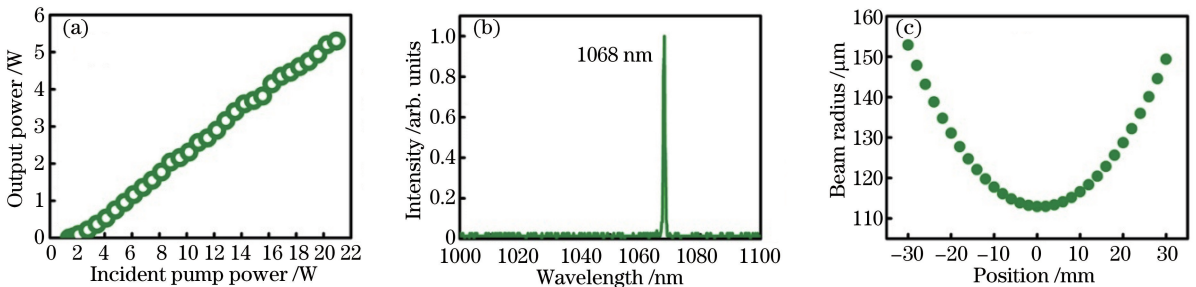


图 3  $\text{Nd}:\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  激光器自由运转状态下的(a)功率变化特征,(b)激光发射谱和(c)测量的 1068 nm 激光的光束质量

Fig. 3 (a) Power variation characteristics and (b) laser emission spectrum of  $\text{Nd}:\text{Lu}_{0.99}\text{La}_{0.01}\text{VO}_4$  laser under free running;

(c) measured beam quality for 1068 nm laser

心波长为 1068 nm(半峰全宽为 0.15 nm)。实验结果表明,c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 混晶在激光器自由运转条件下,激光振荡波长和荧光发射谱线的最强峰一致。实验测量的远场强度分布表明,其在整个抽运功率范围内是光束质量因子  $M^2$  小于 1.3 的近高斯分布,如图 3(c)所示。

#### 4.2 1085 nm 单波长激光运转

研究 c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 混晶的 1085 nm 单波长运转激光性能。相同的光学谐振腔条件下,激光振荡波长主要由激光增益介质荧光谱线的受激发射截面和波长相关的腔损决定。由图 1(a)可知,该晶体在 1068 nm 谱线的荧光发射截面比 1085 nm 处强 2 倍左右(四能级激光跃迁谱线的荧光发射截面与荧光强度直接相关),因此要实现 1085 nm 单波长激光输出,必须完全抑制激光器在 1060 nm 处的激光振荡。实验主要使用具有特殊光学镀膜的输出耦合镜片抑制具有强荧光增益的 1068 nm 波段,该镜片在 1085 nm 和 1068 nm 的光学反射率分别为 86.3%和 67%。实验腔设计与 4.1 节完全一致,腔长为 25 mm。实验测量的激光输出功率曲线如图 4(a)所示,当抽运注入功率为 20 W 时,实现了 4.79 W 1085 nm 单波长连续波激光输出。相应的激光斜效率为 29.4%,光-光转换效率为 24%。实验结果表明,在整个抽运功率范围内,输出功率曲线近似成线性增加,热效应未能显著影响激光输出性能。测量输出激光光谱中心波长为 1085 nm(半峰全宽为 0.18 nm),并且在整个抽运功率段未见任何 1068 nm 波段的寄生振荡。实验测量的远场强度分布表明,输出激光在整个抽运功率范围内是光束质量因子  $M^2$  小于 1.2 的近高斯分布,如图 4(c)所示。

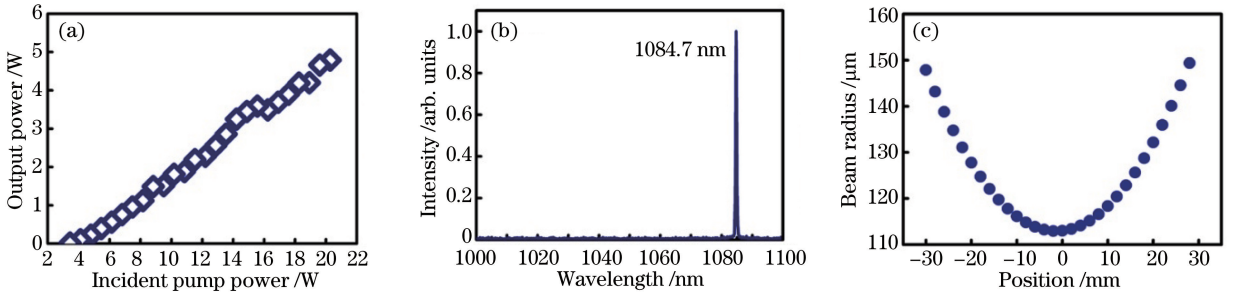


图 4 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 运转在 1085 nm 时的(a)功率变化特征,(b)激光发射谱和(c)测量的 1085 nm 激光的光束质量

Fig. 4 (a) Power variation characteristics and (b) laser emission spectrum of Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> laser operation at 1085 nm; (c) measured beam quality for 1085 nm laser

根据四能级双波长激光振荡的阈值条件,对 c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 混晶激光器进行理论研究,使用具有特殊反射率镀膜的输出耦合镜片,抑制 1068 nm 激光振荡,实现 1085 nm 单波长运转的耦合率条件。由于 1068 nm 和 1085 nm 两个激光振荡波长共享同一激光上能级,其阈值比  $\gamma$  计算公式为<sup>[23]</sup>

$$\gamma = \frac{P_{th,2}}{P_{th,1}} = \frac{\ln(1/R_2) + L_2}{\ln(1/R_1) + L_1} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (1)$$

式中下标 1 和 2 分别代表 1068 nm 和 1085 nm 两个共享同一激光上能级的跃迁谱线; $P_{th}$ 、 $R$ 、 $L$  和  $\sigma$  分别表示激光振荡的阈值抽运功率、输出耦合镜的反射率、腔损和受激发射截面。 $\gamma$  小于 1 时,1085 nm 优先产生激光振荡,因为它的阈值最低。根据晶体参数和腔参数,有  $\sigma_1/\sigma_2 \approx 2$ ,  $L_1 \approx 0.006$ ,  $L_2 \approx 0.005$ (根据 Findlay-Clay 法<sup>[41]</sup>估算),  $R_1 = 67\%$  和  $R_2 = 86.3\%$ 。给出上述参数,理论计算得到  $\gamma = 0.74$ ,满足产生 1085 nm 单波长激光运转的选择条件。该计算结果较好地符合实验观测结果。

#### 4.3 1068 nm 和 1085 nm 双波长激光运转

根据四能级连续双波长激光运转的阈值条件<sup>[21]</sup>,可以得出

$$\left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + L_1 \right] \sigma_2 = \left[ \ln\left(\frac{1}{R_2}\right) + L_2 \right] \sigma_1. \quad (2)$$

代入 c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 混晶在 1068 nm 和 1085 nm 的荧光发射光谱参数,(2)式可写为

$$\left[ \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) + L_1 \right] = 2 \left[ \ln\left(\frac{1}{R_2}\right) + L_2 \right]. \quad (3)$$

由(3)式可知,需要在谐振腔内引入与跃迁波长相关的谐振腔损耗以管理激光器在 1068 nm 和 1085 nm 的增益竞争,获得稳定、有效的双波长激光输出。法布里-珀罗标准具作为一种有效的光谱选择元件,能够有

效地管理激光器不同跃迁谱线的增益竞争,获得稳定、有效的双波长激光输出<sup>[23]</sup>。

实验中使用一个厚度为 120  $\mu\text{m}$  的未镀膜玻璃标准具(自由光谱范围为 0.83 THz)作为光谱选择元件,用于管理谐振腔内 1068 nm 和 1085 nm 激光跃迁谱线的增益竞争,以实现稳定、均衡的双波长激光输出。双波长激光实验采用 4.2 节谐振腔设计,使用相同的抽运注入镜和输出耦合镜。在激光晶体与输出耦合镜之间插入玻璃标准具,双波长激光谐振腔总长度为 25 mm。

实验过程中,通过精细调整标准具的角度,最终可以获得 1068 nm 和 1085 nm 的双波长激光直接振荡输出。光谱仪测量此时的激光振荡中心波长分别为 1068 nm 和 1085 nm。该双波长对应的频率差为 4.4 THz,该频差在相干太赫兹光源方面具有重要应用价值。图 5 为测量的双波长激光在不同抽运功率下的发射光谱。实验观测发现,当标准具的角度调整到特定位置,稳定、均衡的双波长激光运转能够维持到抽运注入功率为 19 W。实验结果表明,120  $\mu\text{m}$  的未镀膜玻璃标准具提供了一种有效的光谱选择损耗,通过管理激光器跃迁谱线的增益竞争,可以有效地实现稳定、均衡的双波长激光振荡。实验测量输出的双波长激光线宽约为 0.1 nm。

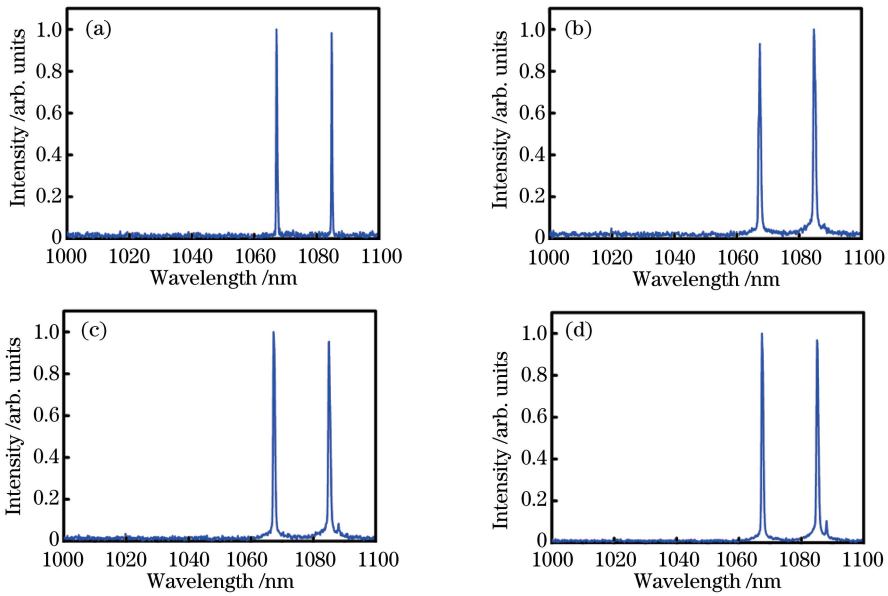


图 5 不同注入抽运功率下的双波长激光发射光谱。(a)  $P = P_{th}$ ; (b)  $P = 5.5 \text{ W}$ ; (c)  $P = 12.2 \text{ W}$ ; (d)  $P = 19 \text{ W}$

Fig. 5 Emission spectra of dual-wavelength laser with different injected pump powers.

(a)  $P = P_{th}$ ; (b)  $P = 5.5 \text{ W}$ ; (c)  $P = 12.2 \text{ W}$ ; (d)  $P = 19 \text{ W}$

实验测量的双波长 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 激光器的输出功率曲线如图 6 所示。实验使用和参考文献[1, 42]类似的方案测量不同波长激光的输出功率,以评估双波长的功率均衡性。双波长激光的振荡阈值为 2.4 W。在 19 W 抽运注入功率下,最高产生 3.8 W 的双波长激光有效输出,相应的激光斜效率为 27%,光-

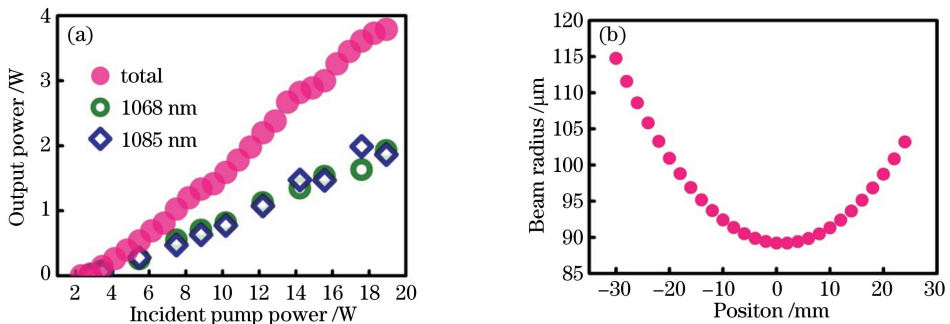


图 6 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 双波长激光器的(a)输出功率曲线和(b)测量的光束质量

Fig. 6 (a) Output power curves and (b) measured beam quality for dual-wavelength Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> laser

光转换效率为 20%。测量结果表明,标准具位置调整到特定优化位置,一旦建立双波长激光振荡,在实验抽运功率范围内双波长激光均能够实现稳定、均衡输出且无需在实验过程中重新调整标准具。实验测量可得在整个抽运功率范围内,双波长激光的功率均衡漂移度小于 17%。

实验观测输出双波长激光在整个抽运功率范围内是光束质量因子  $M^2$  小于 1.7 的近高斯分布,如图 6 (b)所示。

## 5 结 论

本文开展了基于 c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 晶体的室温荧光光谱和相应的激光性能研究。首先在自由运转条件下,实现 5.3 W 的 1068 nm 单波长激光输出;其次使用具有特殊镀膜反射率的输出耦合镜片在 1068 nm 强荧光增益谱线振荡,实现了 4.79 W 中心波长为 1085 nm 的单波长激光输出;最后使用自由光谱范围为 0.83 THz 的玻璃标准具作为光谱选择元件,用于管理谐振腔内 1068 nm 和 1085 nm 激光跃迁谱线的增益竞争,以实现稳定、均衡的 3.8 W 连续双波长激光输出,输出双波长的频率差为 4.4 THz。实验结果表明,c 切 Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> 晶体是一种有效产生双波长激光的高性能激光增益介质,有望在紧凑的全固态太赫兹光源中获得重要应用。

## 参 考 文 献

- [1] Weigi F. A generalized technique of two-wavelength, nondiffuse holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(1): 187-192.
- [2] Farley R W, Dao P D. Development of an intracavity-summed multiple-wavelength Nd-YAG laser for a rugged, solid-state sodium lidar system[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4269-4273.
- [3] Son S N, Song J J, Kang J U, *et al.* Simultaneous second harmonic generation of multiple wavelength laser outputs for medical sensing[J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 6125-6130.
- [4] Mu Zhiming, Yang Jichun, Dong Xiaoxi, *et al.* Research of pain stimulus induced by dual-wavelength infrared laser system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0104002.  
穆志明, 杨基春, 董晓曦, 等. 双波长红外激光诱发痛觉刺激研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0104002.
- [5] 娄书艳, 田 蕾, 杨淑兰, 等. 双波长染料激光治疗鲜红斑痣 108 例的疗效观察[J]. *中国激光医学杂志*, 2015, 24(6): 342-343.
- [6] Shi W, Ding Y J, Fernelius N, *et al.* Efficient, tunable, and coherent 0.18~5.27 THz source based on GaSe crystal [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(16): 1454-1456.
- [7] Zhao P, Ragam S, Ding Y J, *et al.* Compact and portable terahertz source by mixing two frequencies generated simultaneously by a single solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3979-3981.
- [8] 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): 1311006.
- [9] Willer U, Wilk R, Schippers W, *et al.* A novel THz source based on a two-color Nd:LSB microchip-laser and a LT-GaAsSb photomixer[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(1): 13-16.
- [10] Wang Feng, Bi Weihong, Fu Xinghu, *et al.* Dual-wavelength fiber laser based on Er<sup>3+</sup>-doped superimposed fiber gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0402002.  
王 枫, 毕卫红, 付兴虎, 等. 基于掺铒光纤重叠光栅的双波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0402002.
- [11] Luo C W, Yang Y Q, Mak I T, *et al.* A widely tunable dual-wavelength CW Ti:sapphire laser with collinear output [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3305-3309.
- [12] Akbari R, Zhao H T, Major A. High-power continuous-wave dual-wavelength operation of a diode-pumped Yb:KGW laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1601-1604.
- [13] Tzeng Y S, Huang Y J, Tang C Y, *et al.* High-power tunable single- and multi-wavelength diode-pumped Nd:YAP laser in the 4F<sub>3/2</sub> → 4I<sub>11/2</sub> transition[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26261-26268.
- [14] 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.
- [15] Zhuang W Z, Chang M T, Su K W, *et al.* High-power terahertz optical pulse generation with a dual-wavelength harmonically mode-locked Yb:YAG laser[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(7): 075803.
- [16] Huang Y J, Tang C Y, Lee W L, *et al.* Efficient passively Q-switched Nd:YLF TEM<sub>00</sub>-mode laser at 1053 nm:

- selection of polarization with birefringence[J]. Applied Physics B, 2012, 108(2): 313-317.
- [17] 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.
- [18] Pallas F, Herault E, Zhou J, *et al.* Stable dual-wavelength microlaser controlled by the output mirror tilt angle[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(24): 241113.
- [19] Zhao H, Major A. Orthogonally polarized dual-wavelength operation of a CW Yb:KGW laser induced by thermal lensing[C]. CLEO: Science and Innovations, 2013: CTh4I.2.
- [20] Alombert-Goget G, Brenier A, Guyot Y, *et al.* Thermally driven dual-frequency Q-switching of Nd:YGD<sub>2</sub>Sc<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>GaO<sub>12</sub> ceramic laser[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10792-10799.
- [21] Chen Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Applied Physics B, 2000, 70(4): 475-478.
- [22] Chen Y F, Ku M L, Su K W. High-power efficient tunable Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1083 nm[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2107-2109.
- [23] Huang Y P, Cho C Y, Huang Y J, *et al.* Orthogonally polarized dual-wavelength Nd:LuVO<sub>4</sub> laser at 1086 nm and 1089 nm[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 5644-5651.
- [24] Vlasov V I, Garnov S V, Zavartsev Y D, *et al.* New possibilities of neodymium-doped vanadate crystals as active media for diode-pumped lasers[J]. Quantum Electronics, 2007, 37(10): 938-940.
- [25] Ostroumov V G, Huber G, Zagumennyi A I, *et al.* Spectroscopic properties and lasing of Nd:Gd<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> crystals[J]. Optics Communications, 1996, 124(1/2): 63-68.
- [26] Xu H H, Han S, Yu H H, *et al.* Thermal, spectral and laser characteristics of Nd doped La<sub>0.05</sub>Lu<sub>0.95</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 387: 66-72.
- [27] Xu H H, Yu H H, Wang Z P, *et al.* Thermal and laser characteristics of Nd doped La<sub>0.11</sub>Y<sub>0.89</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16524-16531.
- [28] Zhuo Z, Li T, Li S G, *et al.* A new composite YVO<sub>4</sub>/Nd:Y<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>VO<sub>4</sub> crystal laser end-pumped with a fiber coupled diode array[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(6): 445-449.
- [29] Han S, Li X L, Xu H H, *et al.* Graphene Q-switched 0.9- $\mu$ m Nd:La<sub>0.11</sub>Y<sub>0.89</sub>VO<sub>4</sub> laser[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 011401.
- [30] Xu H H, Zhang H J, Yu H H, *et al.* Passive mode-locking performance of mixed Nd:La<sub>0.11</sub>Y<sub>0.89</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5350-5356.
- [31] Wang C Q, Zhang H J, Chow Y T, *et al.* Spectroscopic and laser properties of Nd:Gd<sub>0.8</sub>La<sub>0.2</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Optics and Laser Technology, 2001, 33(6): 439-442.
- [32] Han S, Xu H H, Zhao Y G, *et al.* The <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>  $\rightarrow$  <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> transition property of Nd:La<sub>0.05</sub>Lu<sub>0.95</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Laser Physics, 2013, 23(10): 105384.
- [33] Han S, Xu H H, Zhao Y G, *et al.* 1.34  $\mu$ m fluorescence and laser properties of Nd:La<sub>0.11</sub>Y<sub>0.89</sub>VO<sub>4</sub> crystal[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 66-70.
- [34] Wang Y, Zhao B, Zhuo Z, *et al.* Fluorescence spectrum, thermal properties, and continuous-wave laser performance of the mixed crystal Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub>[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 121404.
- [35] Huang G X, Zhao B, Yu Y Q, *et al.* Continuous-wave and Q-switched laser performance of Nd:Lu<sub>0.99</sub>La<sub>0.01</sub>VO<sub>4</sub> mixed crystals at 1.06  $\mu$ m[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5375-5377.
- [36] Shayeganrad G, Huang Y C, Mashhadi L. Tunable single and multiwavelength continuous-wave c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Applied Physics B, 2012, 108(1): 67-72.
- [37] Sirotkin A A, Garnov S V, Zagumennyi A I, *et al.* Diode-pumped two-frequency lasers based on c-cut vanadate crystals[J]. Quantum Electronics, 2009, 39(9): 802-806.
- [38] Sirotkin A A, Garnov S V, Zagumennyi A I, *et al.* New lasers based on c-cut vanadate crystals[J]. Laser Physics, 2009, 19(5): 1083-1091.
- [39] Zhao S R, Zhang H J, Lu Y B, *et al.* Spectroscopic characterization and laser performance of Nd:LuVO<sub>4</sub> single crystal[J]. Optical Materials, 2006, 28(8/9): 950-955.
- [40] Andreetta M R B, de Camargo A S S, Nunes L A O, *et al.* Transparent and inclusion-free RE<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>VO<sub>4</sub> (RE=Gd, Y) single crystal fibers grown by LHPG technique[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 291(1): 117-122.
- [41] Findlay D, Clay R A. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. Physics Letters, 1966, 20(3): 277-278.
- [42] Chen L, Wang Z, Zhuang S, *et al.* Dual-wavelength Nd:YAG crystal laser at 1074 and 1112 nm[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2554-2556.