

# LD 泵浦 1061 nm/1064 nm 双波长 Nd:YAG 微片激光器

王永恒, 赵长明\*, 蔡子韬, 姚睿育

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 研制出一种 1061 nm 和 1064 nm 双波长连续输出的 Nd:YAG 微片激光器。通过对激光器输出端所镀膜系的透过率进行设计, 平衡了 1061 nm 和 1064 nm 激光的阈值泵浦功率; 以激光二极管(LD)作为泵浦源, 在室温下对 3 组不同厚度的工作物质分别进行了实验, 均得到了 1061 nm/1064 nm 双波长激光输出。采用在微片状晶体两端直接镀膜形成谐振腔的方式, 压缩了谐振腔的光学长度, 在双波长输出的同时实现了 1064 nm 波长下的多纵模输出。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 1061 nm/1064 nm 输出; 微片激光器; Nd:YAG

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301002

## LD Pumped 1061 nm/1064 nm Dual-Wavelength Nd:YAG Microchip Laser

Wang Yongheng, Zhao Changming\*, Cai Zitao, Yao Ruiyu

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** In this study, a 1061 nm/1064 nm dual-wavelength Nd:YAG microchip laser is developed. By designing the transmission curve of the thin film coating at the output end of the laser, the threshold pump powers of 1061 nm and 1064 nm lasers are balanced. Using diode lasers as pump source, three groups of working materials with different thickness are tested at room temperature, and the 1061 nm/1064 nm dual-wavelength outputs are observed. The optical length of the resonator is compressed by directly coating the two ends of the microchip crystal to form a resonator. Simultaneously, the multi-longitudinal mode output at a wavelength of 1064 nm wavelength is realized.

**Key words** lasers; solid-state laser; 1061 nm/1064 nm output; microchip laser; Nd:YAG

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.5680

## 1 引言

双波长激光器在光通信设备、激光雷达、产生太赫兹波段电磁波等领域具有广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。其中, 空间激光通信以激光束为信息载体, 相对于微波通信, 其频带更宽, 可以进行大数据量的信息传输; 作为载波的激光的发散角小, 方向性好, 有利于防止所传递的信息被拦截。将双波长激光器用于空间光通信设备中, 以其相近的两个波长和各个波长下产生的多个纵模作为空间激光通信的信道, 可以有效增加通信容量, 提高通信速率。

利用固体激光工作物质产生双波长激光输出的

常用方法有 4 种: 第 1 种是针对不同的目标波长确定不同的透过率, 并依照此透过率在激光器输出端镀膜<sup>[6-8]</sup>; 第 2 种是在谐振腔内插入光学元件, 通过调整元件的位置、角度等使谐振腔对目标波长具有不同的损耗<sup>[9]</sup>; 第 3 种是在同一个激光器中同时使用两个不同的输出镜, 对于目标波长而言是形成两个不同的谐振腔, 该方法适用于目标波长间隔为几十个 nm 或者更大的情况<sup>[10]</sup>; 第 4 种是采用端面共轴泵浦的方式, 利用一个泵浦源从端面同时泵浦两个共轴放置的不同种类的工作物质, 该方法可以避免在使用单一工作物质时双波长之间的竞争<sup>[11]</sup>。前两种方法适用于目标波长间隔为几或十几 nm 的

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60775018)

\* E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

情况。2014年, Wang等<sup>[12]</sup>以Nd:YAG晶体为工作物质,在输出镜上镀Fabry-Perot带通介质膜,以获得对目标波长的不同透过率,以808 nm的半导体激光器为泵浦源,在2.1 W的阈值泵浦功率下获得了1064 nm/1074 nm的双波长激光输出。2016年, Wang等<sup>[13]</sup>运用相同的方法,通过改变Fabry-Perot带通介质膜的中心波长,在8.44 W的阈值泵浦功率下获得了1052 nm/1064 nm的双波长激光输出。2016年, Lin等<sup>[14]</sup>以Nd:YAG晶体为工作物质,在谐振腔内插入一个YAG材质的标准具,通过调整标准具的角度,以808 nm的半导体激光器作为泵浦源,在2.54 W的阈值泵浦功率下获得了1064 nm/1078 nm的激光输出。2017年, Liu等<sup>[15]</sup>利用端面共轴泵浦的方式,以803 nm的半导体激光器为泵浦源,同时泵浦共轴的Nd:YAG晶体和Nd:YLF晶体,获得了1064 nm/1053 nm的双波长输出。但是,采用结构紧凑的微片激光器,在室温下以较低阈值泵浦功率同时获得1061 nm/1064 nm的双波长激光输出,且在1064 nm波长下产生多个纵模输出的研究却鲜有报道,而且很少有关于工作物质长度对激光器双波长输出情况的影响的实验研究。

本文所设计的激光器采用Nd:YAG微片晶体作为工作物质,在晶体两端直接镀膜形成谐振腔。激光器输出端所镀的膜系经过专门设计,在较低透过率下使1061 nm和1064 nm间存在较大的透过率差,从而在室温下实现了较低阈值功率下的双波长输出,并在1064 nm下获得了两个频率间隔较大的纵模。此外,本文还通过实验研究了晶体厚度对1061 nm/1064 nm双波长输出的影响,为进一步设计和改进双波长固体激光器提供了参考。

## 2 基本原理

Nd:YAG激光器为四能级系统,其激光上能级 $^4F_{3/2}$ 有 $R_1$ 和 $R_2$ 两个分量,其中: $R_2$ 与激光下能级 $^4I_{11/2}$ 的 $Y_3$ 分量间的跃迁产生波长为1064.14 nm的激光, $R_1$ 与 $^4I_{11/2}$ 的 $Y_1$ 分量间的跃迁产生波长为1061.5 nm的激光。对于激光二极管(LD)泵浦的固体激光器,其阈值泵浦功率为

$$P_{th,i} = \frac{L_i - \ln R_i}{2l\eta_i} \frac{h\nu_p}{\sigma_i\tau_i} \int S_i(r, z)r_{pi}(r, z)dV, \quad (1)$$

式中:下标 $i$ 表示不同波长的相关参量, $i=0$ 时代表1064 nm, $i=1$ 时代表1061 nm; $L_i$ 表示除了输出

损耗外激光器的损耗; $R_i$ 表示输出端对目标波长的反射率; $l$ 表示谐振腔的长度; $\eta_i$ 为量子效率; $h$ 为普朗克常数; $\nu_p$ 为泵浦光的频率; $\sigma_i$ 为受激发射截面的面积, $\sigma_0 = 4.58 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , $\sigma_1 = 2.28 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ <sup>[16]</sup>;  $\tau_i$ 为上能级的荧光寿命, $\tau_0 = \tau_1 = 230 \mu\text{s}$ ;  $S_i(r, z)$ 为归一化的腔内模式强度,对于同一个激光器有 $S_0(r, z) = S_1(r, z)$ ;  $r_{pi}(r, z)$ 为归一化的泵浦光强度在工作物质中的分布,同样地, $r_{p0}(r, z) = r_{p1}(r, z)$ 。令 $P_{th,0} = P_{th,1}$ ,可得

$$\frac{L_0 - \ln R_0}{\eta_0\sigma_0} = \frac{L_1 - \ln R_1}{\eta_1\sigma_1}. \quad (2)$$

整理后得,当阈值泵浦功率相等时,两个目标波长对应的输出端反射率的关系为

$$R_0 = \exp\{-[\ln(1/R_1) + L_1] \frac{\eta_0\sigma_0}{\eta_1\sigma_1} + L_0\}. \quad (3)$$

另外,对于LD泵浦的固体激光器,其输出功率可表示为

$$P_{out,i} = \frac{1}{2}AT_i I_{s,i} \left( \frac{2g_{0,i}l}{L_i + T_i} - 1 \right), \quad (4)$$

式中: $I_{s,i} = \frac{h\nu_i}{\sigma_i\tau_i}$ 为不同目标波长对应的饱和光强, $\nu_i$ 为目标波长的频率; $A$ 为激光束的有效截面积; $T_i$ 为输出端对目标波长的透过率; $g_{0,i}$ 为目标波长的小信号增益系数; $l$ 为工作物质长度。在激光器的主要损耗为输出损耗,即 $T_i \gg L_i$ 时,令 $P_{out,0} = P_{out,1}$ ,可得

$$T_0 \frac{\nu_0}{\sigma_0} \left( \frac{2g_{0,0}l}{T_0} - 1 \right) = T_1 \frac{\nu_1}{\sigma_1} \left( \frac{2g_{0,1}l}{T_1} - 1 \right). \quad (5)$$

根据(5)式,当两个目标波长的输出功率相等时,反射端对二者的透过率的关系可表示为

$$T_0 = \frac{\nu_1\sigma_0}{\nu_0\sigma_1} T_1 + 2l \left( g_{0,0} - \frac{\nu_1\sigma_0}{\nu_0\sigma_1} g_{0,1} \right). \quad (6)$$

激光腔内可以起振的纵模数 $N$ 为

$$N = \frac{\Delta\nu_{osc}}{\Delta\nu_q} + 1 = \frac{\Delta\nu_{osc}}{c/(2L')} + 1, \quad (7)$$

式中: $\Delta\nu_q = \frac{c}{2L'}$ 为激光器相邻纵模之间的频率间隔, $L'$ 为激光谐振腔的光学长度, $c$ 为真空中的光速; $\Delta\nu_{osc}$ 为激光器的振荡线宽。由(7)式可以得出,激光器谐振腔的光学长度越长,其纵模间的频率间隔就越小,腔内可起振的纵模数也就越多。但是,在光通信系统中相邻的光波之间需具有一定的频率间隔,所以激光器谐振腔的光学长度不宜过长。本文采用在晶体两端直接镀膜形成谐振腔的方式,工作物质的光学长度即为谐振腔的光学长度,同时为了

获得较大的纵模间隔,所使用的激光工作物质形状为圆片状。

### 3 实验研究

#### 3.1 实验系统

图 1 为 LD 泵浦的 1061 nm/1064 nm 双波长

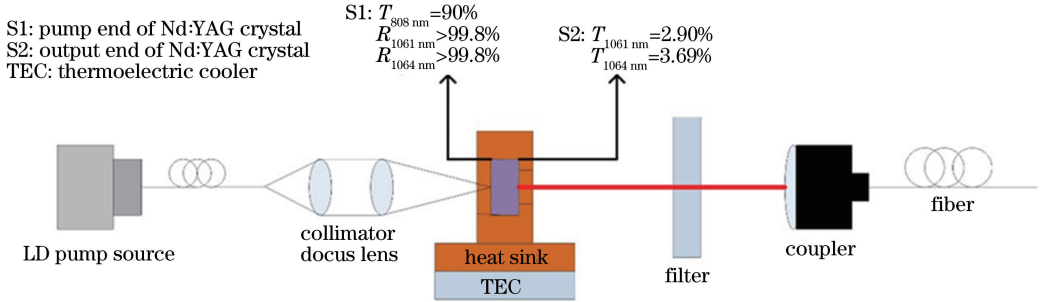


图 1 LD 泵浦的 1061 nm/1064 nm 双波长 Nd:YAG 微片激光器示意图

Fig. 1 Schematic of LD pumped 1061 nm/1064 nm dual-wavelength Nd:YAG microchip laser

晶体的泵浦端镀有对 808 nm 增透、对 1061 nm 和 1064 nm 高反的光学薄膜。在晶体的输出端,为了获得较低的阈值泵浦功率,在设计光学薄膜时选定 1064 nm 的透过率为 4.00%、反射率为 96.00%,根据(3)式,此时 1061 nm 的反射率为 97.87%、透过率为 2.17%。以该透过率组合为目标对膜系进行设计和加工,最终设计出了 1064 nm 透过率为 3.69%、1061 nm 透过率为 2.90%的膜系,前者为后者的 1.27 倍。利用该膜系在较低透过率情况下实现了相邻两个波长间较大的透过率差,有利于双波

Nd:YAG 微片激光器示意图。泵浦源为光纤耦合输出的半导体激光器,泵浦光波长为 808 nm,输出的泵浦光经透镜聚焦后对工作物质进行泵浦。工作物质采用掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 晶体,其形状为圆片状,直径为 6 mm,在实验中采用三个不同厚度(0.8, 1.2, 2.5 mm)的工作物质进行研究。

长激光器在低阈值下实现 1061 nm/1064 nm 双波长输出,该膜系的透过率曲线如图 2 所示。晶体两端镀膜直接构成了激光器的谐振腔。晶体被固定在铜质的热沉上,热沉与半导体制冷器(TEC)相接触,以此来控制晶体的温度。产生的激光通过截止波长为 1000 nm 的长波通滤光片后,经光纤耦合器入射到激光光谱仪中(LSA IR-I, HighFinesse, 分辨率为 10 GHz@1000 nm),利用光谱仪观测输出光的波长成分。最后用索雷博公司的 M<sup>2</sup> 因子测量系统 M2MS-BC106VIS 对激光器的 M<sup>2</sup> 因子进行测量。

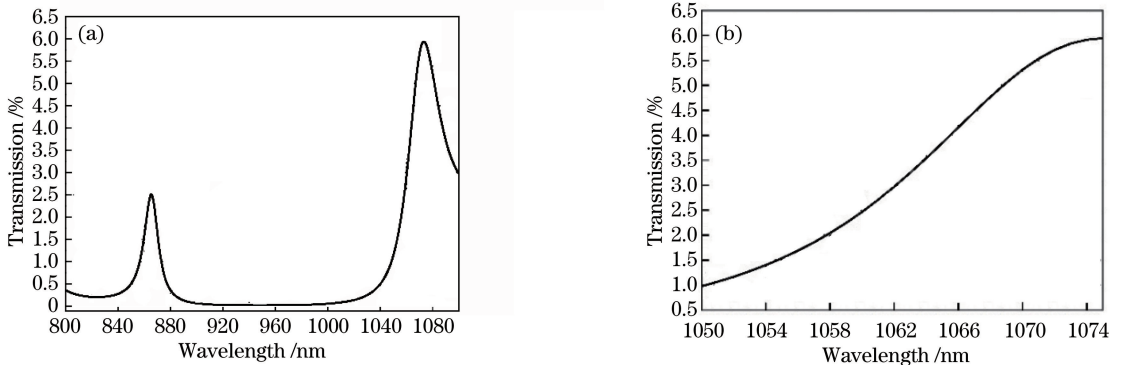


图 2 晶体输出端薄膜的透过率曲线。(a) 800~1100 nm 范围内的透过率曲线;(b) 1050~1075 nm 范围内的透过率曲线

Fig. 2 Transmission curves of the thin film coated in the output end of the crystal. (a) Transmission curve in the range of 800–1100 nm; (b) transmission curve in the range of 1050–1075 nm

#### 3.2 实验结果

在晶体厚度为 0.8 mm 的条件下利用上述装置进行实验,设定 TEC 的制冷温度为 20 °C。在泵浦光功率为 541 mW 时,激光器达到输出的阈值,此时只有 1064 nm 的激光输出;逐渐增加泵浦光功率,当泵浦功率达到 968 mW 时,1061 nm 起振,激

光器实现双波长输出。图 3(a)所示为不同波长的输出光的相对强度随泵浦功率的变化情况,图中标注的功率即为泵浦功率,可以发现:1061 nm 对应的输出强度随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势;在泵浦功率达到 1502 mW 时,1064 nm 的输出分裂成频差为 92.8 GHz 的两个纵模,该纵模间隔是由晶体

厚度所决定的。由于实验中所用激光光谱仪的 CCD 响应是线性的,所以可以根据不同波长相对强度的峰值之间的比例关系来确定该波长输出功率占总输出功率的比值,通过该方法获得了总输出功率和 1061 nm、1064 nm 各自的输出功率随泵浦功率的变

化,如图 3(b)所示。由图 3 可以看出,1061 nm 的输出功率随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势,在泵浦功率为 1650 mW 时达到峰值,此时其输出功率为 65.87 mW,占总输出功率的 44.87%。激光器输出光斑如图 3(c)所示,此时测得其  $M^2$  因子为 2.09。

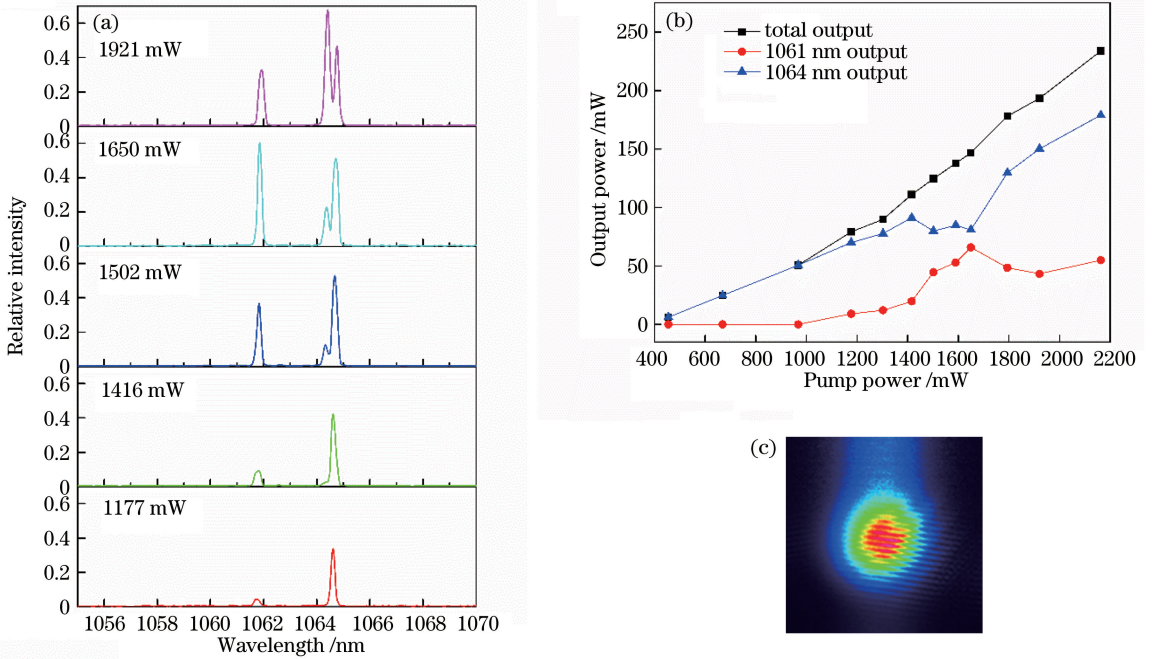


图 3 晶体厚度为 0.8 mm 时的实验结果。(a)输出光各波长相对强度随泵浦功率的变化;  
(b)输出功率随泵浦功率的变化;(c)激光器输出光的横模

Fig. 3 Experimental results with crystal thickness of 0.8 mm. (a) Relative intensity of different wavelengths versus pump power; (b) output power versus pump power; (c) transverse mode of laser output light

在双波长输出的情况下测量其功率稳定性。激光器连续工作时间为 30 min,总输出功率均值  $\bar{P} = 5.48$  mW,标准差  $\sigma = 0.16$  mW,  $\sigma/\bar{P} = 0.028$ ; 1061 nm 输出功率均值  $\bar{P}_{1061} = 1.59$  mW,标准差  $\sigma_{1061} = 0.23$  mW,  $\sigma_{1061}/\bar{P}_{1061} = 0.145$ ; 1064 nm 输出功率均值  $\bar{P}_{1064} = 3.89$  mW,标准差  $\sigma_{1064} = 0.23$  mW,  $\sigma_{1064}/\bar{P}_{1064} = 0.060$ 。输出功率随时间的变化曲线如图 4 所示。

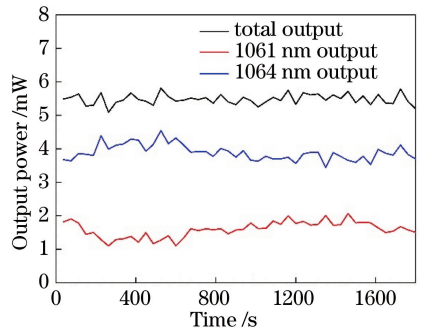


图 4 晶体厚度为 0.8 mm 时输出功率随时间的变化曲线  
Fig. 4 Output power versus time with crystal thickness of 0.8 mm

在晶体厚度为 1.2 mm 的条件下进行实验,TEC 的制冷温度仍为 20 °C。泵浦光功率为 377 mW 时,激光器达到输出的阈值,此时只有 1064 nm 的激光输出;当泵浦功率达到 508 mW 时,1061 nm 起振,激光器实现双波长输出。如图 5(a)所示,1061 nm 输出光的相对输出强度随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势,在泵浦功率达到 1921 mW 时 1061 nm 的激光被完全抑制;在泵浦功率达到 1650 mW 时,1064 nm 的激光输出分裂成频差为 55.3 GHz 的两个纵模。图 5(b)所示为总输出

功率和 1061 nm、1064 nm 各自的输出功率随泵浦功率的变化曲线。由图 5(b)可知:1061 nm 的输出功率随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势,在泵浦功率为 1303 mW 时达到峰值,此时其输出功率为 42.74 mW,占总输出功率的 28.51%。激光器输出光的横模如图 5(c)所示,此时测得激光器的  $M^2$  因子为 3.33。

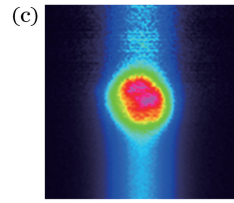
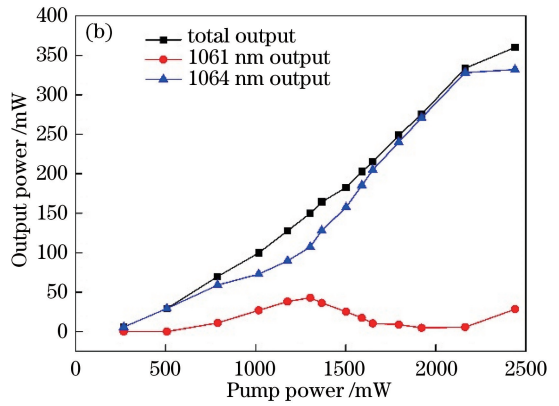
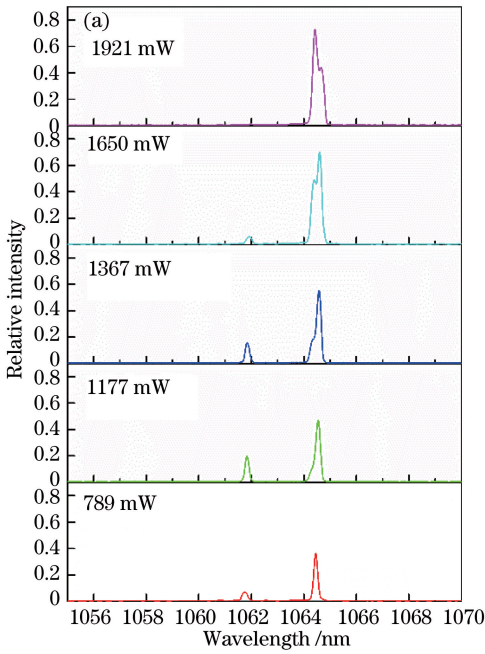


图 5 晶体厚度为 1.2 mm 时的实验结果。(a)输出光各波长的相对强度随泵浦功率的变化曲线；  
(b)输出功率随泵浦功率的变化曲线；(c)激光器输出光的横模

Fig. 5 Experimental results with crystal thickness of 1.2 mm. (a) Relative intensity of different wavelengths versus pump power; (b) output power versus pump power; (c) transverse mode of laser output light

在双波长输出的情况下测量激光器的功率稳定性,激光器连续工作时间为 30 min。总输出功率均值  $\bar{P}=42.5$  mW,标准差  $\sigma=0.2$  mW,  $\sigma/\bar{P}=0.005$ ; 1061 nm 输出功率均值  $\bar{P}_{1061}=14.80$  mW,标准差  $\sigma_{1061}=1.62$  mW,  $\sigma_{1061}/\bar{P}_{1061}=0.11$ ; 1064 nm 输出功率均值  $\bar{P}_{1064}=27.73$  mW,标准差  $\sigma_{1064}=1.63$  mW,  $\sigma_{1064}/\bar{P}_{1064}=0.059$ 。输出功率随时间的变化曲线如图 6 所示。

使用厚度为 2.5 mm 的晶体进行实验,泵浦光功率为 180 mW 时,输出功率达到激光器 1064 nm 的输出阈值,当泵浦功率增加到 562 mW 时,

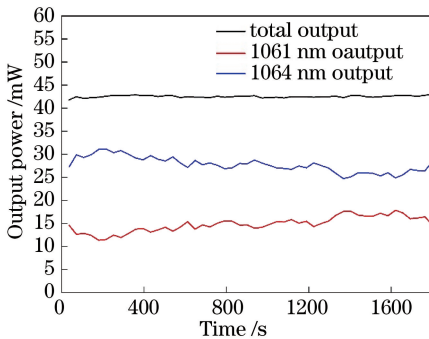


图 6 晶体厚度为 1.2 mm 时输出功率随时间的变化曲线

Fig. 6 Output power versus time with crystal thickness of 1.2 mm

1061 nm 起振,激光器实现双波长输出。如图 7(a)所示,1061 nm 的相对输出强度随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势,但相比于晶体厚度为 0.8 mm 和 1.2 mm 时的情况,1061 nm 的输出功率占总输出功率的比例明显较低,在泵浦功率达到 1794 mW 时 1061 nm 的激光完全被抑制。图 7(b)所示为总输出功率和 1061 nm、1064 nm 各自的输出功率随泵浦功率的变化曲线。由图 7(b)可知,1061 nm 的输出功率随泵浦功率的增大呈先增后减的趋势,但输出功率始终较小,泵浦功率为 1367 mW 时达到峰值,最大为 26.44 mW,占总输出功率的 9.19%。激光器输出光的横模如图 7(c)所示,此时测得其  $M^2$  因子为 4.76。

在双波长输出的情况下测量其功率稳定性,激光器连续工作时间为 30 min。总输出功率均值  $\bar{P}=79.5$  mW,标准差  $\sigma=1.2$  mW,  $\sigma/\bar{P}=0.015$ ; 1061 nm 的输出功率均值  $\bar{P}_{1061}=10.74$  mW,标准差  $\sigma_{1061}=1.23$  mW,  $\sigma_{1061}/\bar{P}_{1061}=0.115$ ; 1064 nm 输出功率的均值  $\bar{P}_{1064}=68.74$  mW,标准差  $\sigma_{1064}=1.69$  mW,  $\sigma_{1064}/\bar{P}_{1064}=0.025$ 。输出功率随时间的变化曲线如图 8 所示。

图 9 所示为晶体厚度为 0.8, 1.2, 2.5 mm 时激光器参量的对比。图 9(a)所示为激光器的总输出功率与泵浦功率的关系曲线,直线为拟合后的关系

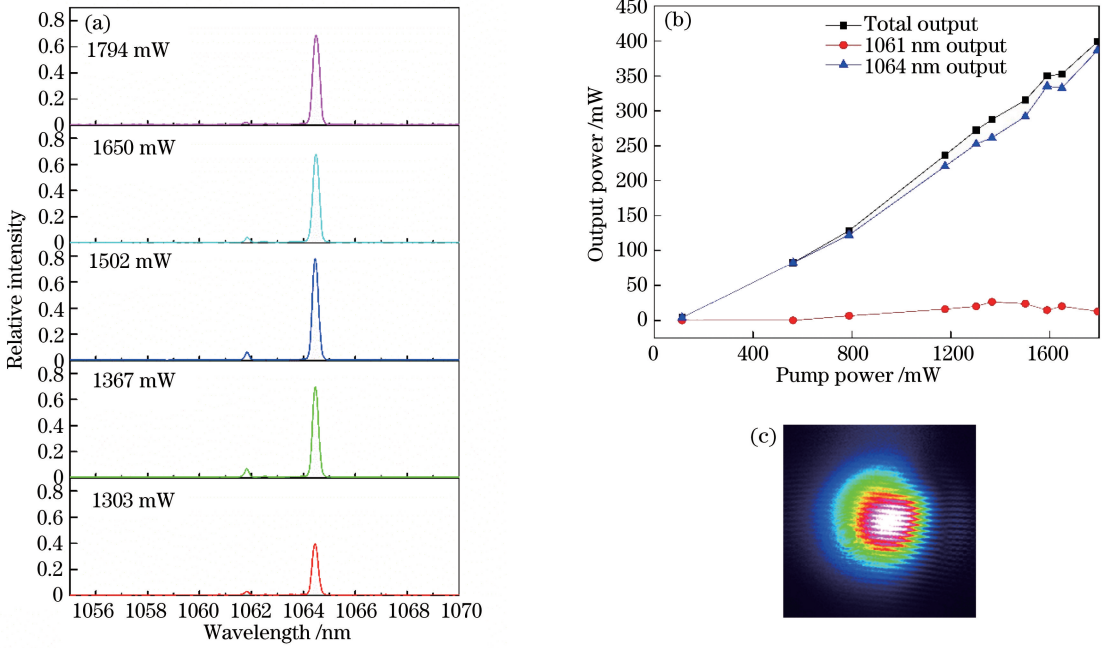


图 7 晶体厚度为 2.5 mm 时的实验结果。(a)输出光各波长的相对强度随泵浦功率的变化曲线；  
(b)输出功率随泵浦功率的变化曲线；(c)激光器输出光的横模

Fig. 7 Experimental results with crystal thickness of 2.5 mm. (a) Relative intensity of different wavelengths versus pump power; (b) output power versus pump power; (c) transverse mode of laser output light

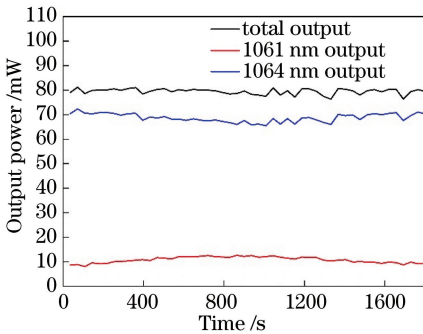


图 8 晶体厚度为 2.5 mm 时输出功率随时间的变化曲线  
Fig. 8 Output power versus time with crystal thickness of 2.5 mm

曲线,得到在三个不同的厚度下,激光器的斜率分别为 13.51%、17.28%、24.13%,随晶体厚度的增加而增大。图 9(b)所示为 1061 nm 激光输出功率占总输出功率的比值随泵浦功率的变化,在不同的厚度下,该比值都随泵浦功率的增加呈先增大后减小的趋势,曲线的峰值依次为 44.87%、29.83%、9.19%,随着晶体厚度的增加而减小。结合 2.2 节内容,在三个不同的厚度下,1061 nm 分量的输出功率的最大值分别为 65.87,42.74,26.44 mW,亦随着晶体厚度的增加而减小。对于 LD 泵浦的 1061 nm/1064 nm 双波长 Nd:YAG 激光器而言,在一定范围内,晶体厚度越大,谐振腔的光学长度越长,越不利

于 1061 nm 波长分量的输出。

上述现象的产生与 Nd:YAG 的能级结构有关。在以 Nd:YAG 为工作物质的激光器当中,1061 nm 的激光由  $R_1$  与  $Y_1$  之间的跃迁产生。1064 nm 附近存在两个比较强的跃迁,一个是  $R_2$  与  $Y_3$  之间的跃迁,该跃迁产生 1064.14 nm 的激光,是 Nd:YAG 产生 1064 nm 激光最主要的跃迁,另外一个为  $R_1$  与  $Y_3$  之间的跃迁,产生 1064.60 nm 的激光输出,该跃迁相对较弱,与产生 1061 nm 激光的跃迁共用一个激光上能级。

当泵浦功率较低时,小信号增益系数较小,1064 nm 附近只有 1064.14 nm 的纵模可以起振,此时 1061 nm 和 1064 nm 之间不存在直接的竞争关系,所以随着泵浦功率的增大二者的输出功率都呈增大的趋势。当泵浦功率增加到一定程度时,1064 nm 增益线宽下离中心波长较远的纵模达到起振条件,当 1064.60 nm 的纵模起振时,由于其与 1061 nm 共用  $R_1$  能级的反转粒子数,二者的直接竞争造成了 1061 nm 输出功率的下降。由 (7) 式可知,晶体厚度越大,1064 nm 增益线宽下可以起振的纵模数越多,则其与 1061 nm 之间对  $R_1$  能级反转粒子数的竞争也就越激烈。所以,当晶体厚度越大时,1061 nm 输出功率占总输出功率的比例就越低。

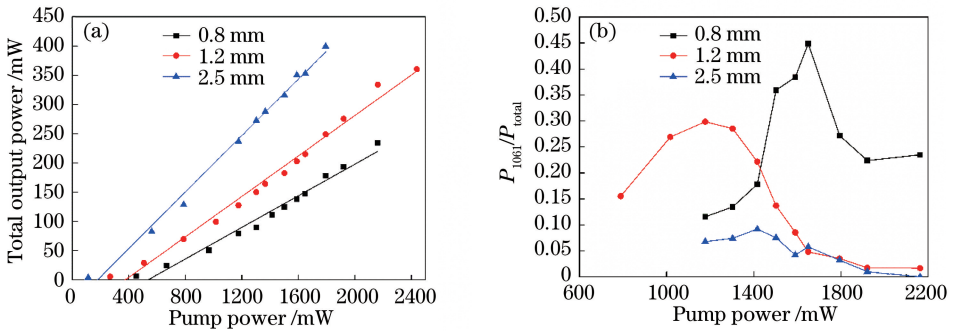


图 9 不同晶体厚度下激光器的参量对比。(a)输出总功率与泵浦功率的关系曲线；  
(b) 1061 nm 的输出功率与总输出功率的比值随泵浦功率的变化

Fig. 9 Comparison of laser parameters under different crystal thicknesses. (a) Total output power versus pump power; (b) ratio of power of 1061 nm to total output power versus pump power

基于上述分析,一个平衡双波长输出的方法就是采用更薄的微片晶体,当激光器的纵模间隔大于 1064 nm 的增益线宽时,1064 nm 将会以单纵模形式输出,此时 1061 nm 与 1064 nm 之间将不存在直接的竞争,有利于平衡二者的输出功率。

## 4 结 论

本文研制出一种低阈值的 LD 泵浦 1061 nm/1064 nm 双波长微片激光器。在 Nd:YAG 微片晶体两端直接镀膜构成激光器谐振腔,其中,输出端所镀的光学薄膜经过了专门设计,1064 nm 的透过率为 3.69%,为 1061 nm 透过率的 1.27 倍,在较低的透过率下实现了较大的透过率差,有利于实现低阈值下的双波长输出。在晶体厚度为 0.8, 1.2, 2.5 mm 的情况下,双波长输出的阈值泵浦功率分别为 968, 508, 562 mW。在晶体厚度为 0.8 mm 和 1.2 mm 时,激光器在实现 1061 nm 输出的同时,还在 1064 nm 的波长下获得了两个纵模的输出,纵模间隔分别为 92.8 GHz 和 55.3 GHz。实验研究了晶体厚度对 1061 nm 输出功率的影响,发现在一定范围内,随着晶体厚度的增加,1061 nm 的输出有被抑制的趋势,晶体厚度为 0.8, 1.2, 2.5 mm 时,1061 nm 的最大输出功率分别为 65.87, 42.74, 26.44 mW, 占总输出功率的比例分别为 44.87%、29.83%、9.19%。

## 参 考 文 献

[1] Danailov M B, Milev I Y. Simultaneous multiwavelength operation of Nd:YAG laser [J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(7): 746-748.  
[2] Lee H C, Kim Y P. Simultaneous dual-wavelength oscillation at 1357 nm and 1444 nm in a Kr-flashlamp

pumped Nd:YAG laser [J]. Optics Communications, 2008, 281(17): 4455-4458.  
[3] Yu H H, Zhang H J, Wang Z P, et al. Dual-wavelength neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser with chromium-doped yttrium aluminum garnet as frequency selector [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(4): 041126.  
[4] Lu J, Ding J Y, He Y, et al. High repetition rate sub-nanosecond dual-wavelength solid-state laser for airborne lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082804.  
陆俊, 丁建永, 贺岩, 等. 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082804.  
[5] Ma Y F, Shen Y J, Xu L, et al. Dual-wavelength amplification properties of continuous-operation Yb:YAG slab laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101006.  
马艺芳, 申艺杰, 徐浏, 等. 连续运转 Yb:YAG 板条激光器的双波长放大特性 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101006.  
[6] Zhou R, Wen W, Cai Z, et al. Efficient stable simultaneous CW dual-wavelength diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 1.319 and 1.338  $\mu\text{m}$  [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(10): 597-599.  
[7] Chen L J, Wang Z P, Zhuang S D, et al. Dual-wavelength Nd:YAG crystal laser at 1074 and 1112 nm [J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2554-2556.  
[8] Zhang L, Wei Z Y, Feng B H, et al. Simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd:YAG laser operating at 1.06  $\mu\text{m}$  and 946 nm [J]. Optics Communications, 2006, 264(1): 51-54.  
[9] Li C Y, Bo Y, Xu J L, et al. Simultaneous dual-wavelength oscillation at 1116 and 1123 nm of Nd:YAG laser [J]. Optics Communications, 2011, 284(19): 4574-4576.

- [10] Abdul Ghani B, Hammadi M. Investigation of the simultaneous dual-wavelength emission of a Q-switched frequency doubled diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser operating at 946 nm and 1064 nm [J]. *Optik*, 2013, 124(7): 622-626.
- [11] 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.
- [12] Wang X Z, Wang Z F, Bu Y K, et al. A 1064- and 1074-nm dual-wavelength Nd:YAG laser using a Fabry-Perot band-pass filter as output mirror [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1501607.
- [13] Wang X Z, Yuan H Y, Wang M S, et al. Continuous 1052, 1064 nm dual-wavelength Nd:YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2016, 376: 67-71.
- [14] Lin Z, Huang X X, Lan J L, et al. Efficient and compact diode-pumped Nd:YAG lasers at 1073 and 1078 nm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1500808.
- [15] Liu Y, Zhong K, Mei J L, et al. Compact and flexible dual-wavelength laser generation in coaxial diode-end-pumped configuration [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1500210.
- [16] Singh S, Smith R G, van Uitert L G. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Physical Review B*, 1974, 10(6): 2566-2572.