

Nd:YAG 陶瓷与单晶 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的弱谱线多波长激光性能对比

林悠优 李江涛 朱海永 廖小青 段延敏 章健 唐定远

Multiple weak-line laser operation from Nd:YAG $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ transition in ceramic and crystal

Lin You-You Li Jiang-Tao Zhu Hai-Yong Liao Xiao-Qing Duan Yan-Min Zhang Jian Tang Ding-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

物理学报.2015, 64(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1064 nm 激光器

A 28.2-W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1064 nm

物理学报.2014, 63(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214206>

用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究

Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave

物理学报.2013, 62(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204205>

分区域主动冷却薄片激光介质的理论和实验研究

Theoretical and experimental research on district cooling for thin disk-type laser medium

物理学报.2013, 62(12): 124204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124204>

不同组分的钒酸盐混晶 $\text{Yb}_t \cdot \text{Y}_x \text{Gd}_{1-t-x} \text{VO}_4$ 光谱与激光性质的比较研究

Comparative study on the spectroscopic and laser properties of mixed vanadates $\text{Yb}_t \cdot \text{Y}_x \text{Gd}_{1-t-x} \text{VO}_4$ with different compositions

物理学报.2011, 60(1): 014211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.014211>

Nd:YAG陶瓷与单晶 $^4F_{3/2}$ — $^4I_{13/2}$ 跃迁的弱谱线多波长激光性能对比*

林悠优¹⁾ 李江涛¹⁾ 朱海永^{1)†} 廖小青¹⁾ 段延敏¹⁾ 章健²⁾ 唐定远²⁾

1) (温州大学物理与电子信息工程学院, 温州 325035)

2) (江苏师范大学, 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 徐州 221116)

(2015年5月19日收到; 2015年6月2日收到修改稿)

报道了基于半导体激光端面抽运Nd:YAG的 $^4F_{3/2}$ — $^4I_{13/2}$ 跃迁的弱谱线多波长激光输出. 实验对比了透明陶瓷与单晶材料的激光输出特性, 表明透明陶瓷和单晶材料荧光光谱强度的略微差异, 导致了多波长输出时相同两个波长之间的激光强度比在两种材料中的差异. 基于两种耦合输出镜片, 激光阈值都在2 W左右. 在13.5 W的抽运功率下, 基于Nd:YAG透明陶瓷获得了输出功率4.05 W、强度比1:2的1338与1356 nm双波长激光和输出功率3.65 W、强度比13:1的1356与1414 nm双波长激光, 斜率效率分别达33.9%和31.9%.

关键词: YAG, 透明陶瓷, 1.3 μm 波段, 多波长

PACS: 42.55.Rz, 42.55.Xi, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.64.204204

1 引言

Nd:YAG材料的 $^4F_{3/2}$ — $^4I_{13/2}$ 跃迁可产生丰富的激光波长振荡, 其对应的波长主要在1.3—1.4 μm 波段^[1]. 该波段激光具有水吸收系数较大, 位于大气的传输窗口, 处于石英光纤中的低损耗和低色散区域等特点, 在激光医疗、国防安全、光通信等军民领域都具有重要用途^[2-4].

Nd:YAG在1.3 μm 波段的两条较强谱线, 其波长对应的1319和1338 nm已得到广泛研究, 并获得了高功率的单一波长及同时双波长振荡输出^[5-7]. 除以上两条较强谱线外, $^4F_{3/2}$ — $^4I_{13/2}$ 跃迁谱线上的1356, 1414, 1431和1444 nm波长也具有较大的跃迁截面^[8]. 在这几个波长中, 1356 nm的跃迁截面最大, 但由于紧靠着两条最强谱线, 较难实现对对应波长的激光输出. 最近, Fan等^[9]和Li等^[10]分别利用布鲁斯特角切割的Nd:YAG晶体和在腔内

引入标准具来选择性地实现了1357 nm波长激光输出. 前者获得了1.03 W的激光输出, 光光转换效率6.9%, 后者获得了1.02 W激光输出, 转换效率5.6%. 在腔内引入色散元件选波长导致了损耗增加, 降低了激光输出效率. 我们课题组通过对腔镜的膜系控制来抑制1.0和1.3 μm 波段的强谱线, 基于Nd:YAG晶体实现了2.4 W的1356和1414 nm双波长激光输出^[11].

随着透明陶瓷材料制作技术的发展, 激光透明陶瓷的光学性能已经能达到单晶材料水平. 但相对于单晶材料而言, 陶瓷具有制作简单、低成本、损伤阈值较高、并容易实现大尺寸高浓度掺杂, 以及分段式掺杂等优点^[12-16], 且透明陶瓷与单晶材料的构造上的差异, 导致了不同跃迁之间的光谱强度的略微差异. 本文中通过选择腔镜, 实现Nd:YAG $^4F_{3/2}$ — $^4I_{13/2}$ 跃迁的弱谱线多波长振荡, 对比透明陶瓷与单晶输出激光的激光效率与不同波长之间强度比差异.

* 浙江省公益技术应用研究计划(批准号: 2015C34017)、国家自然科学基金(批准号: 61505147)、温州市公益性科技计划(批准号: G20140057)、浙江省新苗计划、温州大学实验室开放项目基金和江苏省先进激光材料与器件重点实验室开放课题基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hyzhu@wzu.edu.cn

2 Nd:YAG 荧光谱及实验装置介绍

图 1 给出了 Nd:YAG 透明陶瓷和单晶的荧光光谱图。图中两种材料的各个特征光谱完全一致, 但不同峰之间的相对强度略有不同。 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁谱线对应的波长分别为 1319, 1338, 1356, 1414, 1431 和 1444 nm。其中 1.3 μm 波段的三个波长中, Nd:YAG 单晶对应的 1319 与 1338 nm 谱线的相对强度非常接近, 而 Nd:YAG 透明陶瓷的 1338 nm 谱线的强度稍大, 两种材料中 1356 nm 谱线相对于 1319 和 1338 nm 明显偏小。所以在 1.3 μm 波段激光实验中, 当耦合输出镜片对 1.3 μm 波段的几个波长透过率基本一致的情况下, Nd:YAG 陶瓷获得的 1338 nm 激光强度比例最大, 两种材料都不能获得 1356 nm 激光输出 [17]。因此为了获得 1356 nm 及 1.4 μm 波段弱谱线的输出, 除了抑制 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 的跃迁谱线外, 还要抑制 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁中的 1319 和 1338 nm 谱线 [18]。本文主要通过腔镜膜系控制来抑制较强谱线的起振, 实现 1356 nm 及 1.4 μm 波段弱谱线激光输出。表 1 给出了实验中用到的两种输出腔镜的透过率。

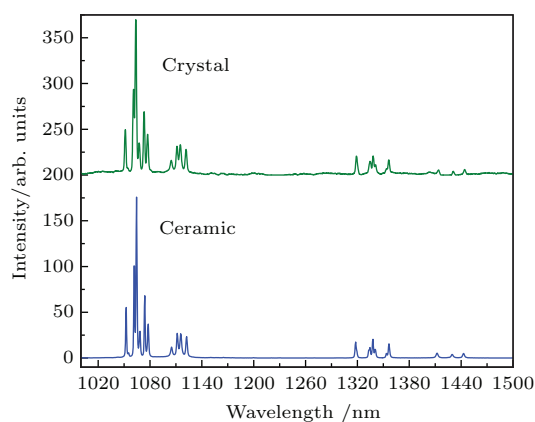


图 1 Nd:YAG 单晶和陶瓷荧光光谱图

Fig. 1. fluorescence spectra for Nd:YAG crystal and ceramic.

表 1 实验采用的输出镜透过率

Table 1. The transmittance of output couplers for different wavelengths.

| Wavelength/nm | 1319 | 1338 | 1356 | 1414 | 1444 |
|-------------------|-------|-------|------|------|------|
| OC1 transmittance | 18% | 9.6% | 6.2% | 2.4% | 1.8% |
| OC2 transmittance | 44.6% | 15.4% | 6.5% | 1.1% | 0.8% |

图 2 给出了 LD 端面抽运 Nd:YAG 实现 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁的弱谱线多波长激光的实验装

置示意图, 采用了结构简单紧凑的两镜腔结构。抽运源为芯径 200 μm 和数值孔径 0.22 的光纤耦合输出 808 nm 的半导体激光器。光纤输出激光经一对焦距分别为 50 和 80 mm 的平凸透镜组成的耦合系统准直聚焦成束腰直径 320 μm 的光斑入射到 Nd:YAG 材料内。分别选择了 Nd 掺杂浓度为 0.8 at.%, 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 8 mm 的 Nd:YAG 单晶和 Nd 掺杂浓度为 1.0 at.%, 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 7.5 mm 的 Nd:YAG 透明陶瓷进行了实验对比。Nd:YAG 材料用铝箔包裹再置于紫铜块内, 并用半导体制冷器对其进行温度控制, 使其表面温度保持在室温 300 K 左右。Nd:YAG 的两个通光端面镀对 808 nm, 1.0 和 1.3 μm 波段的增透膜, 反射率从 1319 nm 的 0.2% 上升到 1444 nm 的 2.5%, 所以实验中为了减少对 1356 nm 及 1.4 μm 波段弱谱线的损耗, 将 Nd:YAG 的两端面严格垂直光路。谐振腔由一对平平镜片和平凹镜片组成, 总腔长 50 mm。输入镜为平平镜片, 镀对抽运光 808 nm 的增透, 同时对 1310—1450 nm 波段高反 ($R > 99.9\%$) 的膜系。输出镜片为曲率半径 100 mm 的平凹镜片, 其具体的镀膜参数如表 1 所列。为抑制 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 的最强谱线, 所有的光学元件镀对 1064 nm 高透 ($T > 80\%$)。

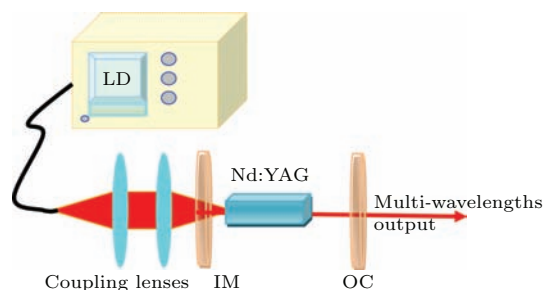


图 2 LD 端面抽运 Nd:YAG 激光实验装置示意图

Fig. 2. The schematic of the experimental setup for LD end-pump Nd:YAG laser.

3 实验结果与讨论

首先我们对输出镜片为 OC1 的镜片进行研究, 其输出功率如图 3 所示。对于两种材料, 阈值都在 2 W 左右, 输出功率随着抽运功率的提高几乎成线性升高。在 11.8 W 的抽运功率下, Nd:YAG 晶体和陶瓷分别获得了 3.7 和 3.5 W 的激光输出, 对应的斜率效率分别为 36.5% 和 33.9%。Nd:YAG 陶瓷在 13.5 W 的抽运下获得了最高 4.05 W 的输出, 光光转换效率 30%。通过单色仪对激光输出谱线从

1000 nm 测到 1500 nm, 探测到了 1338 和 1356 nm 两个谱线, 结果表明腔内存在着双波长同时振荡. 根据输出激光光谱在不同波长之间的相对强度可知 Nd:YAG 陶瓷的 1338 和 1356 nm 波长强度比约为 1 : 2. 为了对比两种材料的输出激光光谱, 我们测量了不同抽运功率下的激光光谱, 如图 4 所示. 在较低抽运功率下, 只测量到 1356 nm 单波长谱线, 随着抽运功率的提高, 1338 nm 谱线较早地在陶瓷材料中出现, 此后 1338 nm 谱线的强度比不断地增大. 在 11.8 W 的抽运功率下, Nd:YAG 晶体和陶瓷的 1338 和 1356 nm 波长的激光强度比分别为 1 : 5 和 1 : 3.

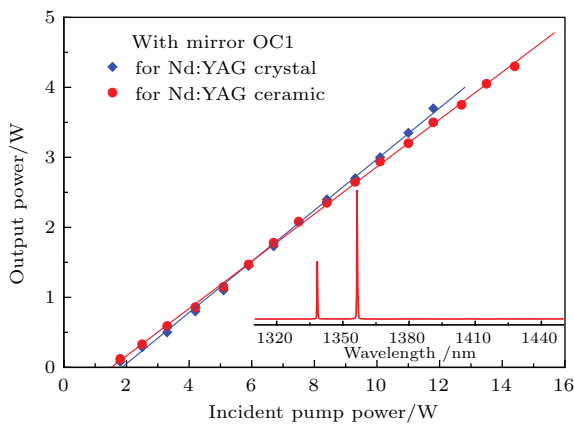


图3 (网刊彩色) 输出镜片为 OC1 时, Nd:YAG 单晶和陶瓷的输出功率对比, 其中小图为 Nd:YAG 陶瓷最高输出时的激光谱线
Fig. 3. (color online) The output power comparison between Nd:YAG crystal and ceramic based on the output mirror OC1. Inset is the laser spectra of the Nd:YAG ceramic with the maximum output.

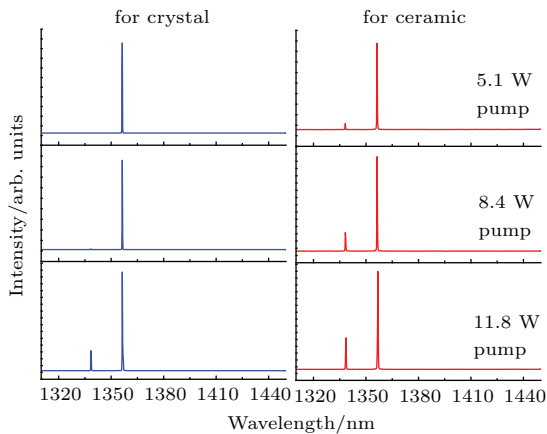


图4 (网刊彩色) 输出镜片为 OC1 时, 不同抽运功率下 Nd:YAG 单晶和陶瓷激光光谱
Fig. 4. (color online) The laser spectra of Nd:YAG crystal and ceramic with the output mirror OC1 under different pump power.

当用 OC2 替换输出镜片进行研究时, 其输出功率如图 5 所示. 与采用 OC1 的输出镜片类似, 两种材料的阈值都在 2 W 左右, 输出功率随着抽运功率的提高几乎成线性升高. 在 11.8 W 的抽运功率下, Nd:YAG 晶体和陶瓷分别获得了 3.56 和 3.25 W 的激光输出, 对应的斜率效率分别为 36.3% 和 31.9%. Nd:YAG 陶瓷在 13.5 W 的抽运下获得了最高 3.65 W 的输出, 光光转换效率 27%, 探测到波长为 1356 和 1414 nm 两个谱线, 但 1414 nm 谱线强度较弱, 两波长的激光强度比约为 13 : 1. 图 6 给出了不同功率下的激光光谱. 与采用 OC1 刚好相反, 在较低抽运功率下, 测量到多波长激光输出, 对应的谱线分别为 1356, 1414 和 1444 nm. 随着抽运功率的升高, 1356 nm 谱线的比例不断变高, 1444 nm 谱线逐渐消失, 最后倾向于 1356 nm 单波长振荡. 在 11.8 W 的抽运功率下, Nd:YAG 晶体和陶瓷的 1356 和 1414 nm 波长的激光强度比分别为 44 : 1 和 12 : 1.

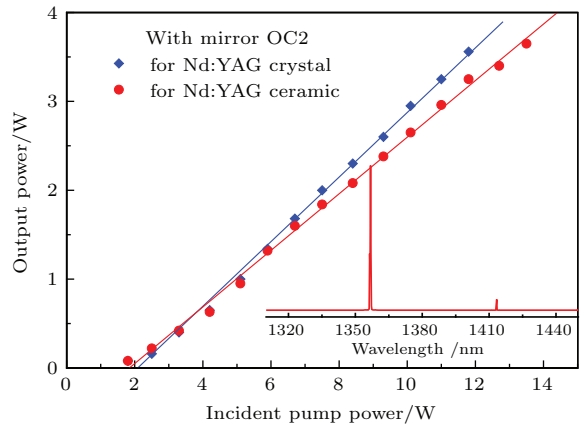


图5 (网刊彩色) 输出镜片为 OC2 时, Nd:YAG 单晶和陶瓷的输出功率对比, 其中小图为 Nd:YAG 陶瓷最高输出时的激光谱线
Fig. 5. (color online) The output power comparison between Nd:YAG crystal and ceramic based on the output mirror OC2. Inset is the laser spectra of the Nd:YAG ceramic with the maximum output.

对比两种材料的荧光谱与激光输出谱线可知: 由于透明陶瓷和单晶材料荧光谱强度的略微差异, 导致了多波长输出时相同两个波长之间的激光强度比在两种材料中存在着差异. 随着抽运功率的提高, 相同的两个波长之间的激光强度比的变化趋势是一致的, 荧光谱强度较大的波长对应的激光强度比不断增强. 采用的两种输出镜片的输出激光波长都以 1356 nm 为主, 而且两种镜片对 1356 nm 的透过率较为接近, 所以激光阈值都在 2 W 左右. 采

用OC1作为输出镜片时,随着抽运功率的提高,具有较强增益的1338 nm波长激光强度比例增大,使得激光输出的转换效率提高,所以斜率效率较采用OC2作为输出镜片的高一些.

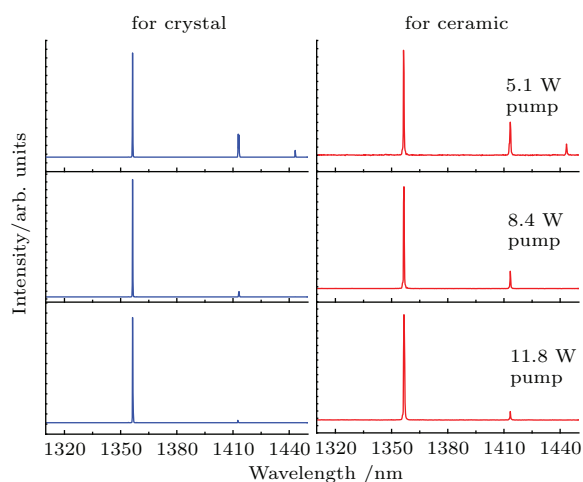


图6 (网刊彩色) 输出镜片为OC2时,不同抽运功率下Nd:YAG单晶和陶瓷激光光谱

Fig. 6. (color online) The laser spectra of Nd:YAG crystal and ceramic with the output mirror OC2 under different pump power.

4 结 论

本文采用LD端面抽运Nd:YAG单晶和透明陶瓷材料,通过简单的两镜腔结构研究了 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的1.3和1.4 μm 波段的弱谱线多波长激光输出特性.基于两种耦合输出镜片实现了阈值2 W左右,输出功率4.05 W、强度比1:2的1338与1356 nm双波长激光输出和输出功率3.65 W、强度比13:1的1356与1414 nm双波长激光输出,转换效率分别达30%和27%.通过对比不同抽运功率下的输出激光谱线,表明在多波长输出时相同两个波长之间的激光强度比对于透明陶瓷和单晶材料存在着差异.随着抽运功率的提高,相同两个波长之间强度比的变化趋势是一致的,荧光谱强度较大的波长对应的激光输出强度比不断增强.

参考文献

- [1] Koechner W (translated by Sun W, Jiang Z W, Cheng G X) 2002 *Solid-State Laser Engineering* (Beijing: Science Press) p45 (in Chinese) [克希耐尔W著(孙文,江泽文,程国祥译)2002 固体激光工程(北京:科学出版社)第45页]
- [2] Rolle A, Pereszlenyi A, Koch R, Richard M, Baier B 2006 *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* **131** 1236
- [3] Fan P Z 2000 *Laser & Optoelectron. Prog.* **37** 1 (in Chinese) [范品忠 2000 激光与光电子学进展 **37** 1]
- [4] Whitley T J 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 1744
- [5] Zhang G, Zhu H Y, Huang C H, Chen J, Wei Y, Huang L X 2009 *Opt. Lett.* **34** 1495
- [6] Li P, Chen X H, Wang Q P, Zhang X Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 2963 (in Chinese) [李平,陈晓寒,王青圃,张行愚 2010 光学学报 **30** 2963]
- [7] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Huang L X, Li A H, Chen Z Q 2008 *Appl. Phys. B* **90** 451
- [8] Singh S, Smith R G, van Viter L G 1974 *Phys. Rev. B* **10** 2566
- [9] Fan Y X, Hou Y E, Liu Y, Xu Q, Wang H T, He J L 2007 *Appl. Phys. B* **86** 443
- [10] Li C L, Zhang X H, Liang W, Jin G Y 2011 *Laser Phys.* **21** 1017
- [11] Chen J Y, Duan Y M, Pan X G, Feng Z R, Zhu H Y 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 0602020 (in Chinese) [陈久益,段延敏,潘小歌,凤正荣,朱海永 2013 中国激光 **40** 0602020]
- [12] Ye Y L, Zhu H Y, Duan Y M, Shao Z H, Luo D W, Zhang J, Tang D Y, Kaminskii A A 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 611
- [13] Lan R J, Yang G, Wang Z P 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064210
- [14] Pan X G, Zhu H Y, Duan Y M, Chen J Y, Zhang Y J, Zhang J, Tang D Y 2013 *J. Russ. Laser Res.* **34** 458
- [15] Li W, Chen C S, Wei J X, Han T, Liu S H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 087801 (in Chinese) [李威,陈长水,韦俊雄,韩田,刘颂豪 2014 物理学报 **63** 087801]
- [16] Zhan M J, Zhou Y W, Lin Q F, Wang Z H, Han H N, Lü L, Wei Z Y, Zhang J, Tang D Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014205 (in Chinese) [詹敏杰,邹育婉,林清峰,王兆华,韩海年,吕亮,魏志义,章建,唐定远 2014 物理学报 **63** 014205]
- [17] Duan Y M, Zhu H Y, Xu C W, Yang H, Luo D W, Lin H, Zhang J, Tang D Y 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 012701
- [18] Zhu H Y, Duan Y M, Xu C W, Yang H, Luo D W, Lin H, Zhang J, Tang D Y 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 022705

Multiple weak-line laser operation from Nd:YAG $^4F_{3/2}$ - $^4I_{13/2}$ translation in ceramic and crystal*

Lin You-You¹⁾ Li Jiang-Tao¹⁾ Zhu Hai-Yong^{1)†} Liao Xiao-Qing¹⁾ Duan Yan-Min¹⁾
Zhang Jian²⁾ Tang Ding-Yuan²⁾

1) (College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

2) (Key Laboratory for Advanced Laser Materials and Devices of Jiangsu Province, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

(Received 19 May 2015; revised manuscript received 2 June 2015)

Abstract

Laser diode end-pumped Nd:YAG based multiple weak-lines laser from $^4F_{3/2}$ - $^4I_{13/2}$ translation is reported. Fluorescence spectra for both Nd:YAG crystal and ceramic are present. Simple two-mirror cavity with reasonable optical coating is used for multiple weak-line laser operation around 1.3 and 1.4 μm . The variations of laser output and spectra with the pump power are compared experimentally between 1.0 at.% Nd³⁺ doped Nd:YAG ceramic with 3 mm \times 3 mm \times 7.5 mm in size and 0.8 at.% Nd³⁺-doped Nd:YAG crystal with 3 mm \times 3 mm \times 8 mm in size. First, 1338 and 1356 nm dual-wavelength laser outputs are achieved using output coupler with transmittance values of 9.6%, 6.2%, 2.4% and 1.8% at 1338, 1356, 1414 and 1444 nm, respectively. Under low pump power around the threshold, the 1356 nm single wavelength laser is obtained. With increasing the pump power, the laser with a wavelength of 1338 nm appears first in the ceramic. At an incident pump power of 11.8 W, a 1338 and 1356 nm dual-wavelength laser with an output power of 3.7 W and an intensity ratio of 1 : 5 for crystal, and a 1338 and 1356 nm dual-wavelength laser with an output power of 3.5 W and an intensity ratio of 1 : 3 for ceramic are obtained. Replacing the output couplers with transmittance values of 15.4%, 6.5%, 1.1% and 0.8% at wavelengths of 1338, 1356, 1414 and 1444 nm, respectively, 1356 and 1414 nm dual-wavelength laser outputs are achieved. Under the low pump power, even triple-wavelength (1356, 1414 and 1444 nm) laser is obtained. With increasing the pump power, the intensities of 1414 and 1444 nm wavelengths turned down and the 1444 nm wavelength disappears first in ceramic. At an incident pump power of 11.8 W, a 1356 and 1414 nm dual-wavelength output power of 3.56 W with intensity ratio of 44 : 1 for crystal and a 1356 and 1414 nm dual-wavelength laser output power of 3.25 W with intensity ratio of 12 : 1 for ceramic are obtained. The results show that slight difference between fluorescence spectra results from the difference in laser spectrum between transparent ceramic and single crystal materials for multi-wavelength output. Thresholds of two different output couplers are both about 2 W. When the incident pump power increases to 13.5 W, a 1338 and 1356 nm dual-wavelength laser output power of 4.05 W and a 1356 and 1414 nm dual-wavelength laser output power of 3.65 W are achieved in Nd:YAG transparent ceramic. The corresponding slope efficiency values are 33.9% and 31.9%, respectively.

Keywords: Nd:YAG, transparent ceramics, 1.3 μm waveband, multi-wavelengths

PACS: 42.55.Rz, 42.55.Xi, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.64.204204

* Project supported by Public Welfare Projects of Zhejiang Province, China (Grant No. 2015C34017), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505147), the Public Welfare Projects of Wenzhou City, China (Grant No. G20140057), the Research Funds of College Student Innovation of Zhejiang Province, China, the Laboratory Open Project of Wenzhou University, China, and the Research Fund of the Key Laboratory for Advanced Laser Materials and Devices of Jiangsu Province, China.

† Corresponding author. E-mail: hyzhu@wzu.edu.cn