

基于共掺杂 Dy-Tb:YAG 晶体的全固态 黄光激光特性研究

李长磊^{1,2}, 姚文明^{1,2}, 陈建生^{1,2}, 田玉冰^{1,2}, 檀慧明^{1,2}, 刘文鹏³, 张庆礼³, 高静^{1,2*}

¹中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163;

³中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 为提高激光上下能级的粒子反转速度, 采用具有高声子能量的 YAG 晶体作为掺杂基质, 通过多声子弛豫的方式加速⁶H_{13/2}能级的粒子数消耗; 同时引入与激光下能级能量相近的 Tb³⁺ 离子, 实现 Dy³⁺:⁶H_{13/2}与 Tb³⁺:⁷F₄之间的共振能量转移, 成功地减小了⁶H_{13/2}的能级寿命, 首次获得了 582.1 nm 的黄光激光输出。通过对比 Dy:YAG 与 Dy-Tb:YAG 的荧光光谱, 分析了 Tb³⁺ 离子掺入对激光上能级寿命的影响。

关键词 激光光学; 黄光激光; 半导体泵浦; Dy-Tb:YAG; 共振能量转移; 交叉弛豫

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101008

All-Solid-State Yellow-Laser Characteristics Based on Co-Doped Dy-Tb:YAG Crystal

Li Changlei^{1,2}, Yao Wenming^{1,2}, Chen Jiansheng^{1,2}, Tian Yubing^{1,2}, Tan Huiming^{1,2},
Liu Wenpeng³, Zhang Qingli³, Gao Jing^{1,2*}

¹University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
China Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China;

³Anhui Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A YAG crystal exhibiting high phonon energy is used as the doping matrix to accelerate the depopulation of the ⁶H_{13/2} energy level by multi-phonon relaxation and improve the population inversion velocities of the laser upper and lower energy levels. Simultaneously, an energy transfer between Dy³⁺:⁶H_{13/2} and Tb³⁺:⁷F₄ is achieved by introducing Tb³⁺ ions exhibiting an energy level similar to that exhibited by the laser lower level; thus, the energy lifetime of ⁶H_{13/2} is successfully reduced and the yellow laser output of 582.1 nm is obtained for the very first time. Furthermore, the effects of the Tb³⁺ ions on the lifetime of the laser upper energy levels are analyzed by comparing the Dy:YAG and Dy-Tb:YAG fluorescence spectra.

Key words laser optics; yellow laser; diode pumping; Dy-Tb:YAG; resonant energy transfer; cross relaxation

OCIS codes 140.7300; 140.3380; 140.3480

1 引言

全固态黄光激光器在生物医学仪器、光学存储、

精密测量、照明显示、玻色-爱因斯坦凝聚^[1]等领域具有重要作用。尤其在生物分析与临床治疗中, 黄光激光是荧光染料的激发光, 目前已成为流式细胞

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-07-08; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61405236)、中国科学院联合基金(6141A01080302)、江苏省自然科学基金(BK20180220)、江苏省六大高峰人才项目(SWYY-285)

* E-mail: owengaojing@126.com

仪^[2]与超分辨显微镜的标配光源^[3]。血红蛋白在黄光波段具有很强的吸收峰,黄光激光在毛细血管扩张及视网膜黄斑病变的临床治疗中发挥着重要作用^[4-6]。因此,获得高效、稳定的黄光激光具有重要的研究意义。

染料激光器可以直接产生黄光,是早期获得黄光激光的主要方法。但其染料易退化、效率低、安全性差等缺点制约了染料激光器的发展。目前获得全固态黄光激光器的主要方法有双波长和频法^[7-8]、红外光倍频法^[9-10]、基于拉曼散射效应的拉曼频移法^[11]等。这些方法都是通过非线性频率变换,将易获得的波长转换成黄光,但是对基频光的要求比较高,转换效率低,激光器的结构复杂。

稀土离子 Dy^{3+} 的 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 能级跃迁可以产生 580 nm 的荧光,是目前直接获得黄光激光最具潜力的材料。1996 年, Malinowski 等^[12] 报道了 $Dy:LiNbO_3$ 晶体在可见光波段的荧光特性,研究了不同浓度、不同温度条件下 ${}^4F_{9/2}$ 能级的荧光寿命,获得了 750 nm 的激光输出;2010 年, Fujimoto 等^[13] 采用波长 398.8 nm 的 GaN-LD(Laser Diode) 泵浦掺 Dy^{3+} 离子的氟铝酸盐玻璃光纤,获得 10.3 mW 的 575 nm 黄光激光,斜效率为 17.1%,实现了黄光激光的有效运转;2012 年, Bowman 等^[14] 采用波长为 447 nm 的 GaN-LD 泵浦 $Dy:YAG$ 单晶,获得了 583 nm 的脉冲输出,平均功率为 150 mW;2013 年, Metz 等^[15] 以氟化物 $LiLuF_4$ 晶体作为 Dy^{3+} 离子的掺杂基质,获得了约 7 mW 的 578 nm 黄光激光,斜效率为 4%。

由于 Dy^{3+} 离子具有较低的受激发射截面且激光下能级的粒子无法迅速地弛豫至基态,所以上述报道的黄光激光只实现了脉冲输出,且功率较小、稳定性差,在增加吸收效率与减小激光下能级 (${}^6H_{13/2}$) 寿命方面缺少深入研究和相应的改善措施。德国汉堡大学 Bolognesi 等^[16] 在氟化物中双掺杂 Dy^{3+} 、 Tb^{3+} 两种离子,通过共振能量转移的方式减小了 Dy^{3+} 激光下能级的寿命,为提高黄光激光的功率稳定性提供了新的思路,但是,目前使用该方法所获得的激光功率较低,对影响激光输出稳定性的因素没有深入研究。

本课题组在 2016 年,采用国产的 $Dy:YAG$ 晶体,首次在国内获得了 583 nm 黄光激光输出^[17]。在此基础上,本文以氧化物 YAG 为基质,研究了 Dy^{3+} 、 Tb^{3+} 离子双掺杂的晶体的特性,通过有效的泵浦与腔型设计,获得了 582.1 nm 的黄光激光,分

析了导致激光上下能级寿命淬灭的原因。这是国际上 $Dy-Tb:YAG$ 黄光激光输出的首次报道。

2 基本原理

镧系稀土元素镱具有较大的原子半径,容易失去外层 2 个 6s 电子和次外层 5d 轨道上 1 个电子而成为 Dy^{3+} 离子。稀土离子 Dy^{3+} 外层的 $5s^25p^6$ 轨道被电子填满,对处于内层的 4f 电子起屏蔽作用,使得 4f 电子受外界环境的影响较小。同时,基质的晶体场打破了 Dy^{3+} 离子的跃迁选择定则,使未被填满的 4f 电子发生组态内跃迁 (4f-4f)、及组态间跃迁 (4f-5d),形成丰富的能级结构^[18-19]。

图 1 为 Dy^{3+} 与 Tb^{3+} 离子简化的能级跃迁示意图。图中箭头向上的实线表示受激吸收的过程,箭头向下的实线表示典型的能级跃迁,曲线箭头表示非辐射弛豫过程。

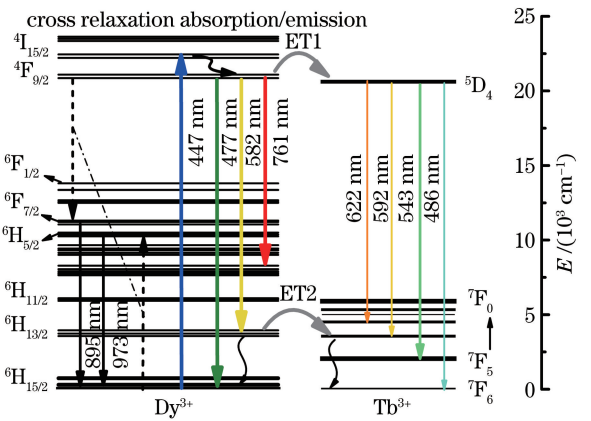


图 1 Dy^{3+} 与 Tb^{3+} 离子双掺杂晶体的能级结构简图
Fig. 1 Energy level structural diagram of Dy^{3+} and Tb^{3+} co-doped crystal

在 Dy^{3+} 离子中,为了产生可见光范围的荧光,辐射跃迁的初始能级能量要大于 $20 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ^[20]。由于电子受激跃迁至激发态时受到自旋反转的影响, Dy^{3+} 具有较低的受激吸收截面。图 2 为 $Dy-Tb:YAG$ 的吸收光谱,由图可知最强的吸收峰位于紫外波段 (326/353/367 nm)。蓝光波段最强的吸收峰为 447 nm,对应基态 ${}^6H_{15/2}$ 至 ${}^4I_{15/2}$ 能级的跃迁,基态吸收截面在 10^{-21} cm^2 量级^[21-23]。

受激跃迁至 ${}^4I_{15/2}$ 能级的粒子迅速无辐射弛豫到亚稳态 ${}^4F_{9/2}$,从图 1 可以看出, ${}^4F_{9/2}$ 能级与其邻近的下能级 ${}^6F_{1/2}$ 之间的能级间隔大于 $7 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$,能够有效地抑制多声子弛豫,因此 ${}^4F_{9/2}$ 能级的粒子可以辐射跃迁至 ${}^6F_{x/2}$ 和 ${}^6H_{x/2}$ 能级。其中,黄光波段最强的荧光峰为 582.09 nm,对应 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 的能

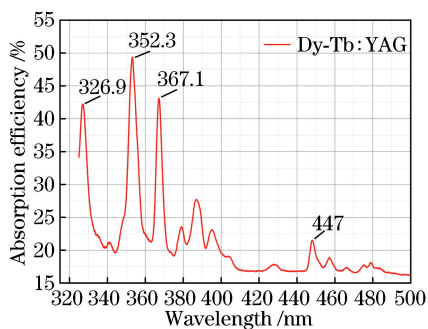


图 2 Dy-Tb:YAG 晶体的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of Dy-Tb:YAG crystal

级跃迁。这一过程同样受到电子自旋反转的影响,使得 Dy^{3+} 激光具有低发射截面 (10^{-21} cm^2)^[24],且激光下能级不能够迅速地弛豫至基态,因而具有较长的辐射寿命^[25]。

为解决单掺 Dy^{3+} 激光中存在的上述问题,加快 ${}^6H_{13/2}$ 能级的弛豫速度,本实验从共掺杂离子和基质选择两个方面对 Dy^{3+} 晶体进行优化。

首先,由于 Tb^{3+} 和 Dy^{3+} 离子的 4f 组态只相差一个电子,且 Tb^{3+} 离子的 7F_4 能级与 Dy^{3+} 离子的 ${}^6H_{13/2}$ 能级具有相近的能量,所以 Tb^{3+} 离子的引入将引起这两个能级发生共振能量转移(ET),即 ${}^6H_{13/2}$ 的部分能量通过共振的方式无辐射转移到 Tb^{3+} 离子的 7F_4 能级,从而减小 Dy^{3+} 激光下能级的辐射寿命,实现粒子数的快速反转分布。其过程如图 1 中 ET2 所示。

此外,氧化物晶体的声子能量在 $600 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,是氟化物晶体的 2 倍^[26],考虑到 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 为非基态跃迁,所以 YAG 基质的高声子能量将通过多声子弛豫的方式加速 ${}^6H_{13/2}$ 能级的寿命淬灭,使激光下能级上的粒子迅速地非辐射弛豫至基态。

3 实验过程

3.1 实验设计

本实验所用的泵浦源由 NICHIA CORPORATION 的单管 LD 及相关电路模块组装而成,波长范围为 $445 \sim 448 \text{ nm}$,最大输出功率为 2.5 W 。由于 YAG 为各向同性的晶体,其荧光光谱与泵浦光的偏振方向无关,所以实验选用两个型号相同的 LD,通过偏振合束原理提高泵浦功率,弥补因低吸收截面而造成的低吸收效率。其中 LD1 水平放置(p 偏振),LD2 垂直放置(s 偏振)。

直接发射的 LD 快轴与慢轴的发散角分别为

30° 和 10° ,因此输出光斑为长条状。偏振合束后,泵浦光的大部分能量会聚在光斑的交叠区域,可以改善泵浦光斑的形状。偏振合束 LD 泵浦 Dy-Tb:YAG 的实验装置如图 3 所示。

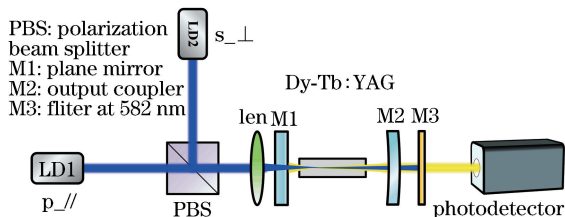


图 3 偏振合束 LDs 泵浦 Dy-Tb:YAG 晶体的实验装置图
Fig. 3 Experimental setup of Dy-Tb:YAG crystal pumped by LDs with polarization beam coupling

实验采用平凹腔结构,前腔镜 M1 为平面镜,输出耦合镜 M2 为凹面镜,曲率半径为 50 mm ,腔长为 30 mm 。通过仿真分析,可得振荡光的束腰位于前腔镜附近,束腰半径为 $67 \mu\text{m}$ 。因此,实验选用焦距为 60 mm 的单透镜将合束后的泵浦光聚焦至晶体内部,利用激光光束轮廓仪(NanoScan V2, Ophir Photonics)测得泵浦光经透镜变换后实际束腰尺寸为 $33 \mu\text{m} \times 44 \mu\text{m}$,能实现泵浦光与振荡光的良好匹配,泵浦波长及聚焦后的束腰光斑如图 4 所示。

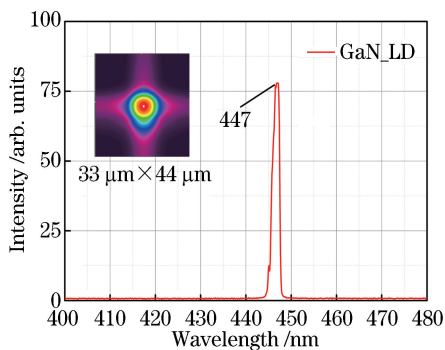


图 4 GaN-LD 的输出波长及聚焦后的束腰光斑

Fig. 4 Output wavelength and focused waist spot of GaN-LD

本实验中,晶体尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,且前端面镀有对泵浦光和振荡光增透的膜,后端面的膜系对振荡光增透、对泵浦光高反。 Dy^{3+} 与 Tb^{3+} 离子的掺杂浓度(原子数分数)分别为 2% 和 0.8% 。平面镜 M1 作为前腔镜,其左右端面都镀有对泵浦光增透的膜(447 nm , $T > 99.8\%$),同时右端面镀有对振荡光高反的膜(582 nm , $R > 99.8\%$)。平凹镜 M2 作为输出耦合镜,凹面镀有对振荡光(582 nm)部分透过的膜系,透过率分别为 0.5% 、 1% 、 2% 。

3.2 实验结果

图 5 为在泵浦功率为 4.6 W ,输出镜透过率为

2%的条件下获得的 Dy-Tb:YAG 的黄光激光输出,使用光纤光谱仪(Ocean optics, HR4000, 200~660 nm,精度 0.1 nm)测得波长为 582.1 nm。

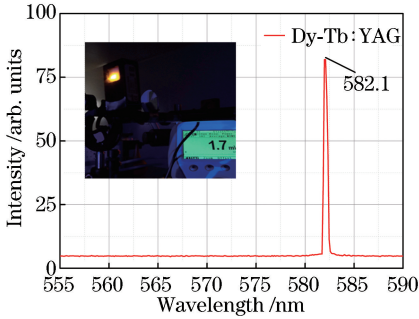


图 5 Dy-Tb:YAG 的黄光激光输出波长及拍摄图
Fig. 5 Picture and output wavelength of yellow laser of Dy-Tb:YAG

双掺 Dy-Tb:YAG 晶体没有实现黄光激光的稳定输出,利用 THORLABS 公司的 DET10A/M 型光电探测器与 Agilent 公司的 MSO-X-3024A 型示波器(200MHz, 4 GSa/s)测得的输出功率随时间的变化曲线如图 6 所示。由图可知输出功率受到调制,表现出无规则的“自脉冲”现象。

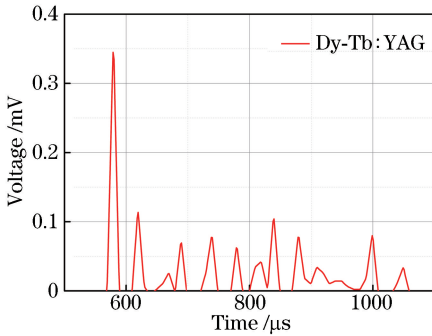


图 6 利用光电探测器测得的 Dy-Tb:YAG 输出强度随时间的变化曲线
Fig. 6 Temporal variation of the output intensity of Dy-Tb:YAG measured by photodetector

4 分析与讨论

为分析造成激光输出不稳定的因素,本实验利用 447 nm 的 LD 作为激发光,在相同实验条件下分别测试单掺 Dy³⁺ 离子(原子数分数为 2%)与双掺 Dy³⁺、Tb³⁺ 离子(原子数分数分别为 2%、0.8%)晶体的荧光光谱。通过对比两种晶体荧光强度的变化,分析晶体内部粒子的作用过程对激光上下能级寿命的影响。

4.1 共振能量转移

如图 7 所示,相比 Dy:YAG 的荧光曲线,Dy-

Tb:YAG 在 582 nm 处的荧光峰强度有所提高,即 $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ 的跃迁增强,表明 Dy³⁺: $^6H_{13/2}$ 与 Tb³⁺: 7F_4 能级之间发生了预期的共振能量转移。

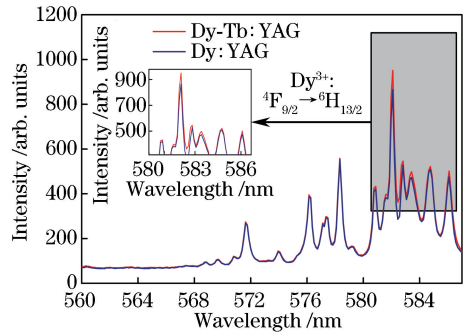


图 7 Dy:YAG 与 Dy-Tb:YAG 在 560~586 nm 之间的荧光对比

Fig. 7 Fluorescence comparison of Dy:YAG and Dy-Tb:YAG at 560-586 nm

但是,在如图 8 所示的 477 nm ($^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{9/2}$) 与 761 nm ($^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$) 处,双掺晶体的荧光峰强度有所减小,表明 Tb³⁺ 的引入减小了 Dy³⁺: $^4F_{9/2}$ 的能级寿命;同时,Dy-Tb:YAG 的光谱分别在 486 nm、543 nm、592 nm、622 nm 处产生了新的荧光峰,由于 Tb³⁺ 的吸收峰值为 380 nm 和 485 nm^[27],而本实验所采用的 447 nm 泵浦波长与之不匹配,说明在 Dy³⁺: $^4F_{9/2}$ 与 Tb³⁺: 5D_4 能级之间也发生了共振能量转移。如图 9 所示,四个峰值分别对应 Tb³⁺ 离子的 $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ 、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ 、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ 四个典型的能级跃迁过程,其中 543 nm 处的荧光强度最强。激光上能级的能量转移减小了 $^4F_{9/2}$ 的能级寿命,从而影响粒子数的反转速度,导致激光输出不稳定。

4.2 交叉弛豫

图 10 为使用光纤光谱仪(Ocean optics, HR4000, 600~1100 nm,精度 0.1 nm)测得的单掺 Dy³⁺ 离子晶体与双掺 Dy³⁺、Tb³⁺ 离子晶体的荧光光谱对比图,由图可知,Dy-Tb:YAG 在 895 nm 和 972~992 nm 处的荧光强度增大,根据能级谱线图可知,这两个峰值分别对应 Dy³⁺ 离子中 $^6F_{7/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$ 和 $^6H_{5/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$ 的能级跃迁。这一结果表明 Tb³⁺ 的引入增大了晶体内离子的浓度,导致 Dy³⁺ 离子间的距离减小,增强了交叉弛豫过程。具体过程如图 1 所示,处于亚稳态和基态的两个 Dy³⁺ 离子之间进行无辐射能量交换(通过吸收、辐射额外声子等方式),同时进入中间激发态,即 ($^4F_{9/2}$ 、 $^6H_{15/2}$) \rightarrow ($^6F_{7/2}$ 、 $^6H_{5/2}$),进入中间激发态的

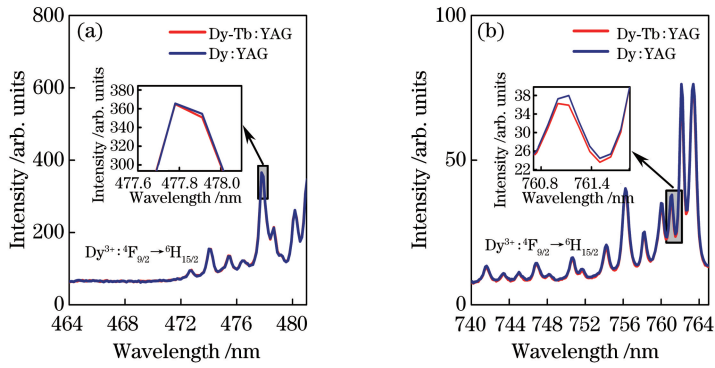


图 8 Dy:YAG 与 Dy-Tb:YAG 分别在不同波段的荧光对比。

(a) 464~482 nm, 插图为 477 nm 处的放大图; (b) 750~765 nm, 插图为 761 nm 处的放大图

Fig. 8 Fluorescence comparison of Dy:YAG and Dy-Tb:YAG at different wavelengths. (a) 464-482 nm, the inset is enlarged image at 477 nm; (b) 750-765 nm, the inset is enlarged image at 761 nm

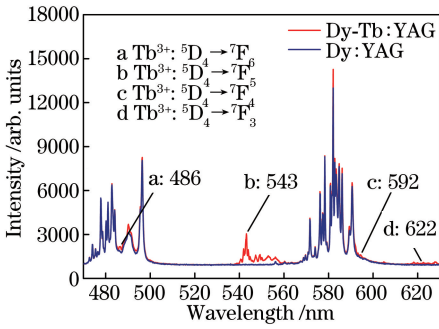


图 9 Dy:YAG 与 Dy-Tb:YAG 的荧光光谱对比

Fig. 9 Comparison of fluorescence spectra of Dy:YAG and Dy-Tb:YAG

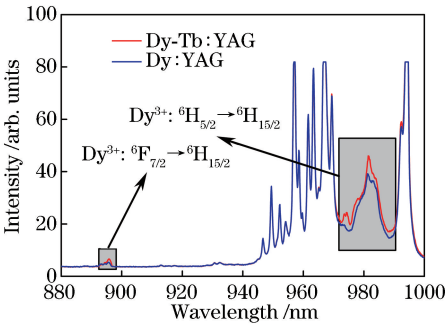


图 10 Dy:YAG 与 Dy-Tb:YAG 的荧光光谱对比

Fig. 10 Comparison of fluorescence spectra of Dy:YAG and Dy-Tb:YAG

粒子再通过自发辐射跃迁至基态。这一过程也会导致激光上能级 $^4F_{9/2}$ 的寿命淬灭,对激光输出的稳定性产生不利影响。

5 结 论

通过 Dy^{3+} 、 Tb^{3+} 离子双掺杂的方式,首次在氧化物基质 YAG 晶体中获得了 582.1 nm 黄光激光输出;利用偏振合束原理将泵浦功率提高至 4.6 W,

增加了晶体所吸收的泵浦功率; Tb^{3+} 的掺杂使 $Dy^{3+}: ^6H_{13/2}$ 与 $Tb^{3+}: ^7F_4$ 之间发生了共振能量转移,加速了激光下能级的粒子数消耗。实验结果表明 Dy^{3+} 离子的激光上能级也通过共振的方式转移了一部分能量至 $Tb^{3+}: ^5D_4$ 能级,且 Tb^{3+} 离子的引入增加了晶体内掺杂离子的浓度,加剧了 Dy^{3+} 离子间的交叉弛豫过程,从而进一步减小 $Dy^{3+}: ^4F_{9/2}$ 的能级寿命。下一步的工作将对 Dy^{3+} 与 Tb^{3+} 离子的掺杂比例进行优化,以减小非辐射过程对激光上能级寿命的影响。

参 考 文 献

- [1] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, *et al.* Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(22): 3969-3973.
- [2] Kapoor V, Karpov V, Linton C, *et al.* Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry [J]. Cytometry Part A, 2008, 73A(6): 570-577.
- [3] Yamagata K, Suetsugu R, Wakayama T. Long-term, six-dimensional live-cell imaging for the mouse preimplantation embryo that does not affect full-term development [J]. Journal of Reproduction and Development, 2009, 55(3): 343-350.
- [4] Beintema M R, Oosterhuis J A, Hendrikse F. Yellow dye laser phototherapy of choroidal neovascularisation in age related macular degeneration [J]. The British Journal of Ophthalmology, 2001, 85 (6): 708-713.
- [5] McCoy S E. Copper bromide laser treatment of facial telangiectasia: results of patients treated over five years[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 1997, 21 (4): 329-340.
- [6] Yadav N K, Jayadev C, Mohan A, *et al.* Subthreshold micropulse yellow laser (577 nm) in

- chronic central serous chorioretinopathy: safety profile and treatment outcome [J]. *Eye*, 2015, 29 (2): 258-265.
- [7] Yang J M, Tan H M, Tian Y B, *et al.* All-solid-state doubly resonant intracavity sum-frequency 578 nm yellow laser with KTP type II phase matching [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (10): 1001010.
杨建明, 檀慧明, 田玉冰, 等. 全固态双共振 KTP II 类相位匹配腔内和频 578 nm 黄激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001010.
- [8] Yang J M, Tan H M, Gao J, *et al.* Noise characteristics of LDA pumped laser by intracavity sum-frequency generation with LBO [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1002003.
杨建明, 檀慧明, 高静, 等. LDA 抽运腔内 LBO 和频激光器噪声特性分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42 (10): 1002003.
- [9] Yao W M, Gao J, Zhang L, *et al.* Continuous-wave yellow-green laser at 0.56 μm based on frequency doubling of a diode-end-pumped ceramic Nd:YAG laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5817-5821.
- [10] Gao J, Dai X J, Zhang L, *et al.* All-solid-state continuous-wave yellow laser at 561 nm under in-band pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(1): 95-98.
- [11] Wang C, Zhang X Y, Wang Q P, *et al.* Extracavity pumped BaWO₄ anti-Stokes Raman laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26014-26026.
- [12] Malinowski M, Myziak P, Piramidowicz R, *et al.* Spectroscopic and laser properties of LiNbO₃:Dy³⁺ crystals [J]. *Acta Physica Polonica A*, 1996, 90(1): 181-189.
- [13] Fujimoto Y, Ishii O, Yamazaki M. Yellow laser oscillation in Dy³⁺-doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre pumped by 398.8 nm GaN laser diodes [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(8): 586.
- [14] Bowman S R, O'Connor S, Condon N J. Diode pumped yellow dysprosium lasers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12906-12911.
- [15] Metz P W, Moglia F, Reichert F, *et al.* Novel rare earth solid state lasers with emission wavelengths in the visible spectral range [C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2013: 14252640.
- [16] Bolognesi G, Parisi D, Calonico D, *et al.* Yellow laser performance of Dy³⁺ in co-doped Dy, Tb:LiLuF₄ [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6628-6631.
- [17] Ju Q J, Shen H, Yao W M, *et al.* Laser diode pumped Dy:YAG yellow laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401004.
鞠乔俊, 沈华, 姚文明, 等. 半导体激光抽运 Dy:YAG 黄光激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401004.
- [18] Grünberg P, Hufner S, Orlich E, *et al.* Crystal field in dysprosium garnets [J]. *Physical Review*, 1969, 184(2): 285-293.
- [19] Wegh R T, Meijerink A. Spin-allowed and spin-forbidden 4fⁿ ↔ 4fⁿ⁻¹5d transitions for heavy lanthanides in fluoride hosts [J]. *Physical Review B*, 1999, 60(15): 10820-10830.
- [20] Lupei A, Lupei V, Gheorghe C, *et al.* Spectroscopic characteristics of Dy³⁺ doped Y₃Al₅O₁₂ transparent ceramics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110 (8): 083120.
- [21] Bowman S R, Condon N J, O'Connor S, *et al.* Diode-pumped dysprosium laser materials [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7325: 732507.
- [22] Xu X D, Hu Z W, Li R J, *et al.* Optical spectroscopy of Dy³⁺-doped CaGdAlO₄ single crystal for potential use in solid-state yellow lasers [J]. *Optical Materials*, 2017, 66: 469-473.
- [23] Jiang T H, Chen Y J, Lin Y F, *et al.* Spectroscopic properties of Dy³⁺-doped Na₂Gd₄(MoO₄)₇ crystal [J]. *Journal of Luminescence*, 2018, 199: 133-137.
- [24] Liu B, Shi J J, Wang Q G, *et al.* Crystal growth and yellow emission of Dy:YAlO₃ [J]. *Optical Materials*, 2017, 72: 208-213.
- [25] Metz P W. Visible lasers in rare earth-doped fluoride crystals [D]. Hamburg: der Universität Hamburg, 2014.
- [26] Huang R S, Zhang P X, Huang X B, *et al.* Enhanced 573 nm yellow emissions of Dy³⁺ via Tb³⁺ deactivation in Na₂Gd₄(MoO₄)₇ crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(10): 3673-3679.
- [27] Metz P W, Marzahl D T, Majid A, *et al.* Efficient continuous wave laser operation of Tb³⁺-doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10 (2): 335-344.