

半导体激光抽运 Dy:YAG 黄光激光器

鞠乔俊^{1,2}, 沈 华¹, 姚文明², 陈建生², 檀慧明², 刘文鹏³, 罗建乔³, 张庆礼³, 高 静^{2*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

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 报道了一种新型小体积的半导体激光端面抽运国产 Dy:YAG 单晶的黄光激光器。根据 Dy:YAG 激光晶体的特殊能级结构, 采用半导体激光抽运, 利用 $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ 的能级跃迁, 室温下直接获得 582.7 nm 的黄光激光。抽运源采用蓝光 LD, 通过温控系统调节 LD 的工作温度, 优化中心波长至 447.3 nm, 从而实现抽运光波长与 Dy:YAG 晶体吸收谱线的较好匹配。在吸收抽运功率为 1.4 W 的条件下, 输出黄光激光的平均功率为 56 mW, 最大单脉冲能量达到 1.1 mJ, 对应的光光转化效率为 4%, 斜率效率为 5%。

关键词 激光器; Dy:YAG; 黄光激光; 半导体抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0401004

Laser Diode Pumped Dy:YAG Yellow Laser

Ju Qiaojun^{1,2}, Shen Hua¹, Yao Wenming², Chen Jiansheng², Tan Huiming²,
Liu Wenpeng³, Luo Jianqiao³, Zhang Qingli³, Gao Jing²

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

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

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

Abstract A new miniature diode-end-pumped Dy:YAG yellow laser based on the domestic single crystal is reported. According to the special energy structure of Dy:YAG laser crystal, the yellow laser of 582.7 nm on the $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ transition is obtained using laser diode pump at room temperature. In order to matching the pump wavelength with the Dy:YAG crystal absorption peak, the blue LD is used as the pumping source, and the center wavelength is optimized at 447.3 nm by tuning the LD operative temperature. With a total incident pump power of 1.4 W, the yellow laser maximum output power of 56 mW is achieved. The maximum single pulse energy is up to 1.1 mJ. The optical-to-optical conversion efficiency is 4% and the slope efficiency is 5%.

Key words lasers; Dy:YAG; yellow laser; diode pumped

OCIS codes 140.7300; 140.3380; 140.3480

收稿日期: 2017-01-04; 收到修改稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405236, 61405206, 51502292, 61308076)、国家高技术研究发展计划(2015AA021105)、国家重点研发计划(2016YFB0402202)、国家重点实验室基金(9140C300505140C30141)、江苏省重点研发计划(BE2016090, BE2016005-2)、集成光电子学国家重点实验室开放基金(IOSKL2016KF12)

作者简介: 鞠乔俊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光与非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: juqiaojun505@163.com

导师简介: 高 静(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光与非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: owengaojing@126.com(通信联系人)

1 引 言

黄光激光器在玻色爱因斯坦凝聚^[1]、原子冷却与捕获^[2]、激光医学和生物医学仪器等领域都有着重要的应用。尤其是眼科诊断和治疗方面^[3-4]，相比其他波长的激光，黄色波段的激光有着以下优点：能够更好地穿透核硬化晶体、更好地穿透液体和色素干扰层、黄斑处叶黄素对黄光的吸收率最低、热能在视网膜神经感受器中传导较少、病人较少不适感、安全性和可靠性更高等。因此，具有不可替代的作用。例如，对于临床上常见的采用激光光凝疗法治疗视网膜黄斑病变，(577±5) nm 波段已经被认为是最佳光谱选择区域^[4]。黄光激光器及其应用已成为激光领域的研究热点，其中通过新型激光介质来实现黄光激光已成为一个重要途径。

半导体激光抽运全固态激光器通过倍频技术已经获得了红、绿、蓝激光输出，并且得到了广泛的应用，然而黄光波段激光由于缺少相应的基频光而无法通过倍频手段直接获得。科研人员一直探索着实现黄光激光的方法以及相关技术应用^[5-6]。直到目前，国内外能够实现黄光激光器的方法主要有：晶体二次谐波产生^[7]、双波长腔内和频^[8-9]、Raman 激光器倍频^[10-12]、光泵半导体垂直外腔面发射激光器和腔内倍频^[13-15]、拉曼光纤激光/放大器和外腔倍频^[16]等。上述方法主要通过红外激光的非线性频率转换方式实现。这就造成了，一方面，非线性转换过程中基频光模式竞争导致黄光输出功率的稳定性较差、光束质量不佳；另一方面，系统的复杂程度直接导致了激光器的体积较大，从而对激光器的可靠性造成了严重的影响。而能够直接发射黄色波段激光的材料最近几年受到了格外重视。从目前国内外的研究来看，主要在有机固体燃料、有机无机杂化晶体、掺杂稀土离子的激光晶体、色心 LiF 晶体等领域。2002 年，Fukuda 等^[17]利用新合成的有机染料作为激光工作物质得到了中心波长为 575 nm 的黄光输出，最大输出能量为 0.75 mJ。但由于激光染料本身的物理化学稳定性以及激光循环冷却系统的复杂性，限制了全固态染料激光器的发展。半导体激光抽运掺镝(Dy³⁺)激光介质激光器，是一种最为直接产生激光的方式。根据掺镝激光介质的特殊能级结构，采用半导体激光抽运，利用⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2}的能级跃迁，可以直接获得黄光波段的激光。这种结构无需进行非线性频率转换，具有体积小、稳定性好、噪声低等优点。2000 年，德国耶拿大学利用 457 nm 氩离子激光抽运 Dy:ZBLAN 光纤，获得了 10 mW 的 575 nm 黄光激光，斜率效率为 1.5%^[18]。2010 年，日本大阪大学采用波长为 398.8 nm 的 GaN-LD 抽运掺镝的氟铝酸盐光纤，获得了 10.3 mW 的 575 nm 黄光激光，斜率效率为 17.1%^[19]。2012 年，美国海军研究实验室采用波长为 447 nm 的 GaN-LD 抽运 Dy:YAG 单晶，获得了平均功率为 150 mW 的 583 nm 黄光激光输出，单脉冲能量为 0.29 mJ^[20]。2013 年，德国汉堡大学采用 Dy:LiLuF₄ 晶体，采用 450 nm LD，在抽运功率约 350 mW 时，获得了约 7 mW 的激光输出，斜率效率为 4%^[21]。

目前，与国外相比，国内掺镝激光介质和相关激光器的研究还处于起步阶段。山东大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、上海应用技术学院等单位已经开展了掺镝激光介质的晶体生长和光谱特性方面的研究，但尚无黄光激光产生实验的报道。

2 实验方案

黄光激光系统结构如图 1 所示。采用端面抽运的方式，抽运源为两个蓝光 LD，利用半波片和偏振合束器实现合束，提高抽运功率。通过温控系统调节 LD 的工作温度，实现抽运源中心波长的优化，从而匹配 Dy:YAG 激光晶体的吸收峰。Dy:YAG 激光晶体(3 mm×3 mm×20 mm)的 Dy³⁺ 离子掺杂原子数分数为 2%，晶体前后两端都镀有对抽运光(447 nm, T>99.8%)和振荡光(583 nm, T>99.8%)高透的膜系。谐振腔采用简单平凹腔结构，其中平面腔镜 M1 作为输入镜，一面镀有对 447 nm(T>94%)0°入射高透的膜系，另一面镀有对 447 nm(T>94%)0°入射高透和对 583 nm(R>99.8%)0°入射高反的膜系，其透射率曲线如图 2 所示。平凹镜 M2 作为输出镜，凹面镀有对黄光激光部分透过的膜系，对应黄光激光(583 nm)透射率分别有 0.5%、1%、2%和 3%，其中透射率为 1%的透射率曲线如图 3 所示。最后，在位于输出镜后端的滤光片用来滤除抽运光，实现单一黄光激光输出。

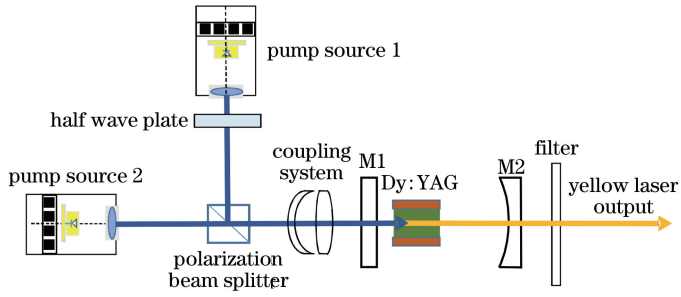


图 1 黄光激光系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the yellow laser system

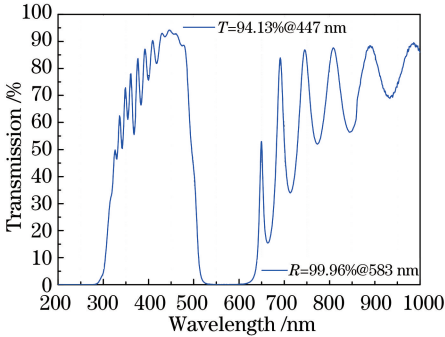


图 2 输入镜的透射率曲线

Fig. 2 Transmissivity of the input coupler

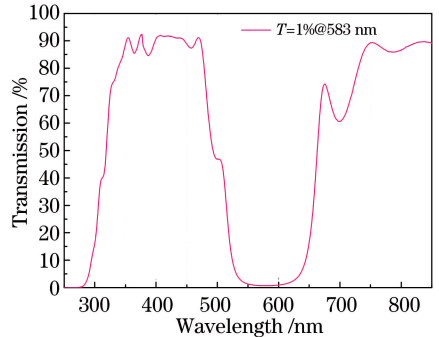


图 3 输出镜的透射率曲线

Fig. 3 Transmissivity of the output coupler

3 实验结果及讨论

在简单平凹腔结构下,利用光束传输矩阵计算出振荡光参量在整个谐振腔内的变化,从而得出Dy:YAG晶体沿轴向的光斑半径分布情况。在此基础上,通过组合式透镜来实现抽运光的参量变换。运用高斯光束的变换规律,优化透镜的焦距和间距,使变换后的抽运光在激光介质处的光斑半径与振荡光相一致,达到良好的横模匹配效果。

图 4 为室温下分光光度计(Lambda950,PerkinElmer,美国)测得的 Dy:YAG 晶体的吸收光谱图,仪器扫描区域设置为 420~560 nm,狭缝宽度为 2 nm,扫描步长为 0.1 nm。测量所用 Dy:YAG 晶体的样品尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm,未镀膜,Dy³⁺ 离子掺杂原子数分数为 2%。根据 Dy:YAG 晶体的吸收谱确定蓝光 LD 优化的中心波长和谱线宽度,然后选用谱线宽度较窄的 LD,并通过仔细调节 LD 的工作温度,来实现对其中心波长的优化。图 4 结果显示,Dy:YAG 晶体在该波段主要有两个吸收峰,分别位于 447 nm 和 457 nm 附近。其中,最高吸收峰对应的谱线为 447.3 nm。纵模匹配的优劣直接影响激光器的抽运效率,从而对激光器的输出参量造成影响。通过良好的纵模匹配设计,充分利用抽运光能量,对提升激光器的整体性能意义重大。实验采用中心波长为 447 nm 的蓝光 LD 作为抽运源,并通过波长优化至 447.3 nm,从而实现与 Dy:YAG 晶体吸收峰的较好匹配。

图 5 为光纤光谱仪(HR4000,Ocean Optics,美国)测量掺杂原子数分数为 2%的 Dy:YAG 晶体发射的荧光光谱图,抽运源为蓝光 LD。图中 Dy:YAG 晶体的最强荧光谱线(582.7 nm)是来自⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2}的能级跃迁产生,旁边还有 579、581、585 和 586 nm 等相对较弱的荧光谱线。其中最强荧光谱线 582.7 nm,室温下其受激发射截面^[16]约为 3.0×10⁻²¹ cm²。

图 6 为光纤光谱仪测得的黄光激光光谱图。在 447.3 nm 蓝光 LD 抽运下,采用 Dy³⁺ 离子掺杂原子数分数为 2%的 Dy:YAG 晶体(3 mm×3 mm×20 mm)作为增益介质,谐振腔为简单平凹腔,在输出端测得单一波长的黄光激光,其黄光激光中心波长为 582.7 nm,且半峰全宽小于 0.2 nm。

实验过程中,发现 Dy:YAG 晶体的热效应对激光输出功率和稳定性影响较大,黄光激光不能持续输出。

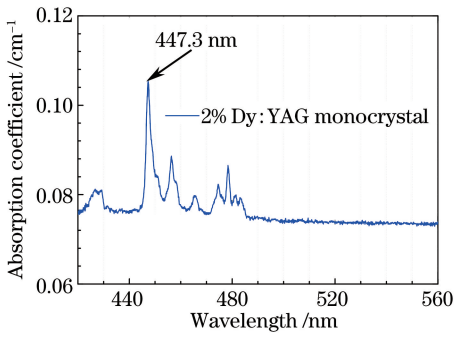


图 4 室温下 Dy:YAG 的蓝光吸收

Fig. 4 Blue laser absorption of Dy:YAG at room temperature

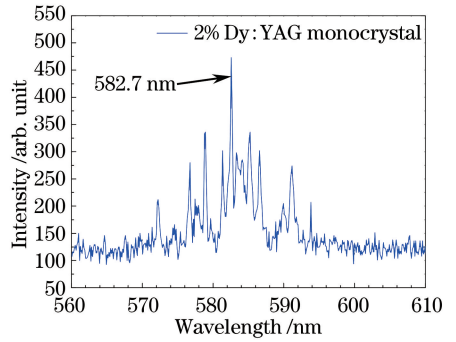


图 5 室温下 Dy:YAG 的荧光光谱

Fig. 5 Fluorescence spectrum of Dy:YAG at room temperature

所以,将抽运源的工作模式选择为脉冲触发方式(毫秒脉冲),这样有利于减小晶体内部热积累。同时,利用包裹在激光晶体周围的温控系统,将 Dy:YAG 晶体的温度维持在 20 °C。实验中抽运源的重复频率优选为 50 Hz,晶体的热效应问题得到了有效缓解。实验过程中,还发现输出镜的透射率对黄光激光的输出产生很大影响。如图 7 所示,实验对比了输出镜的不同透射率(0.5%、1%、2%和 3%)对输出激光的影响。由此可知,使用透射率为 1%的输出镜可获得较高平均功率的黄光激光。

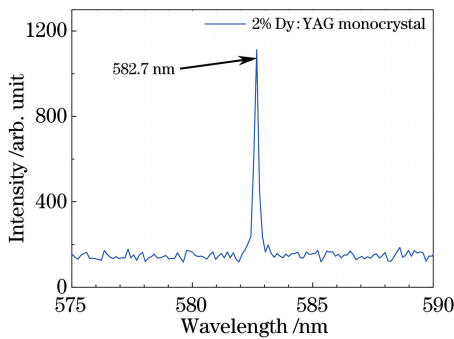


图 6 黄光激光光谱图

Fig. 6 Spectrum of yellow laser

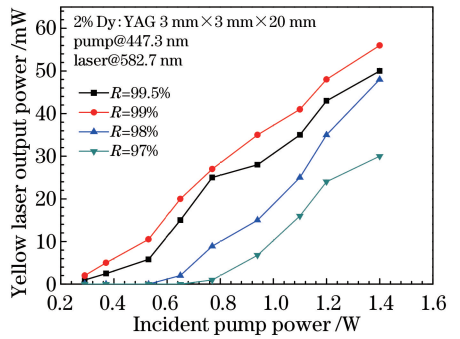


图 7 不同透射率下,黄光激光输出平均功率随抽运功率的变化

Fig. 7 Yellow laser average output power versus pump power under different transmissivities

通过分析不同透射率情况下的激光阈值,结合 Findlay-Clay Analysis^[22]方法,可以计算出谐振腔内的固有损耗 L ,包含晶体损耗和腔内光学衍射损耗等,其中晶体损耗占主要。利用 4 个不同透射率的输出镜,并通过实验确定每个输出镜对应的激光阈值功率,就可以拟合得到谐振腔内固有损耗 L 。

$$-\ln R = 2KP_{th} - L, \quad (1)$$

式中 R 为输出镜的反射率, P_{th} 为阈值输入功率。当 $P_{th} = 0$, 向下外延 $-\ln R$ 与 P_{th} 的关系直线, 与 $-\ln R$ 相交, 得出腔内固有损耗值 L 。如图 8 所示, 可以看出固有损耗值 L 约为 0.0048 cm^{-1} , 表明该国产晶体的损耗相对较高。进一步的, 可以通过性能更优的 Dy:YAG 晶体, 有望能够获得更高功率和更高光光转换效率的黄光激光。

4 结 论

验证了半导体激光端面抽运 Dy:YAG 单晶实现黄光激光的可行性。采用简单的平凹腔结构谐振腔, 国产 Dy:YAG 单晶作为激光增益介质, 利用 447.3 nm 蓝光 LD 作为抽运源, 在室温下直接获得 582.7 nm 的黄光激光。实验结果表明, 在 Dy:YAG 激光晶体吸收抽运功率 1.4 W 条件下, 得到黄光激光平均输出功率为 56 mW, 最大单脉冲能量达到 1.1 mJ。

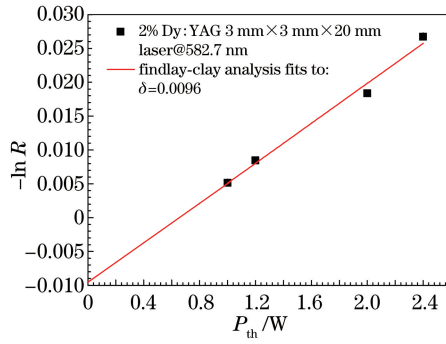


图 8 谐振腔固有损耗

Fig. 8 Intrinsic loss of the cavity

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]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(22): 3969-3973.

[2] Uetake S, Yamaguchi A, Kato S, *et al.* High power narrow linewidth laser at 556 nm for magneto-optical trapping of ytterbium[J]. *Appl Phys*, 2008, 92(1): 33-35.

[3] Sramek C K, Leung L S B, Paulus Y M, *et al.* Therapeutic window of retinal photocoagulation with green (532 nm) and yellow (577 nm) lasers[J]. *Ophthalmic Surgery, Lasers and Imaging Retina*, 2012, 43(4): 341-347.

[4] Mainster M A. Decreasing retinal photocoagulation damage: principles and techniques[J]. *Seminars in Ophthalmology*. Taylor & Francis, 1999, 14(4): 200-209.

[5] Yang Jianming, Tan Huiming, Tian Yubing, *et al.* All-solid-state doubly resonant intracavity sum-frequency 578 nm yellow laser with KTP type II phase matching[J]. *Chinese J 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.

[6] Yan Jianming, Tan Huiming, Gao Jing, *et al.* Noise characteristics of LDA pumped laser by intracavity sum-frequency generation with LBO[J]. *Chinese J 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.

[7] Gao J, Dai X, Zhang L, *et al.* All-solid-state continuous-wave yellow laser at 561 nm under in-band pumping[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30(1): 95-98.

[8] Li B, Yao J Q, Ding X, *et al.* A novel CW yellow light generated by a diode-end-pumped intra-cavity frequency mixed Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 99-101.

[9] Lu Y F, Bo Y, Xie S Y, *et al.* An 8.1 W diode pumped solid-state quasi-continuous-wave yellow laser at 589 nm by intracavity sum-frequency mixing generation[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(22): 5596-5600.

[10] Wang C, Zhang X, Wang Q, *et al.* Extracavity pumped BaWO₄ anti-Stokes Raman laser[J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 26014-26026.

[11] Zhu H, Duan Y, Zhang G, *et al.* Yellow-light generation of 5.7 W by intracavity doubling self-Raman laser of YVO₄/Nd:YVO₄ composite[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(18): 2763-2765.

[12] Gao Z L, Liu S D, Zhang J J, *et al.* Self-frequency-doubled BaTeMo₂O₉ Raman laser emitting at 589 nm[J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7821-7827.

[13] Fallahi M, Fan L, Kaneda Y, *et al.* 5 W yellow laser by intracavity frequency doubling of high-power vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(20): 1700-1702.

[14] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, *et al.* High-power (>0.5 W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(8): 1063-1065.

[15] Lin J P, Pask H M, Spence D J, *et al.* Continuous-wave VECSEL Raman laser with tunable lime-yellow-orange output [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5219-5224.

[16] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.

[17] Fukuda M, Kodama K, Yamamoto H, *et al.* Solid-state laser with newly synthesized pigment[J]. *Dyes and Pigments*,

2002, 53(1): 67-72.

- [18] Limpert J, Zellmer H, Riedel P, *et al.* Laser oscillation in yellow and blue spectral range in $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ [C]. Lasers and Electro-Optics, Technical Digest, IEEE, 2001: 353-354.
- [19] Fujimoto Y, Ishii O, Yamazaki M. Yellow laser oscillation in Dy^{3+} -doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre pumped by 398.8 nm GaN laser diodes[J]. Electron Lett, 2010, 46(8): 586-587.
- [20] Bowman S R, O'Connor S, Condon N J. Diode pumped yellow dysprosium lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(12): 12906-12911.
- [21] Metz P W, Moglia F, Reichert F, *et al.* Novel rare earth solid state lasers with emission wavelengths in the visible spectral range[C]. Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/IQEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference. IEEE, 2013: 1.
- [22] Findlay D, Clay R A. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. Phys Lett, 1966, 20(3): 277-278.