

激光二极管泵浦黄光掺镱硼酸钆镁激光器

潘圣元^{1,2}, 江泽茜^{1,3}, 黄溢声^{1,3}, 李丙轩^{1,3}, 林州斌^{1,3}, 张 戈^{1,3}

(1. 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, 福州 350002; 2. 福建师范大学化学与材料学院, 福州 350117; 3. 中国科学院大学福建学院, 福州 350002)

摘 要: 可见光波段激光在生物、医学、探测等领域有着重要应用, 相较于传统非线性倍频得到可见光激光, 可以利用稀土元素 Pr^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 等掺杂来制备直接输出可见光的激光晶体。对于黄光波段激光, 晶体掺杂 Dy^{3+} 更为合适。目前, 掺杂 Dy^{3+} 的激光晶体多是处于理论阶段, 激光实验成功的案例较少。近段时间, 生长出的高质量 Dy^{3+} 掺杂的硼酸盐晶体 $\text{GdMgB}_5\text{O}_{10}(\text{Dy}:\text{GMB})$ 被报道成功研制出发射 580 nm 黄光波段的激光器。使用中国科学院福建物质结构研究所制备的 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的 Y-cut Dy:GMB 晶体, 利用 444 nm 蓝光 LD 泵浦搭建平平腔激光器得到了波长为 579.3 nm 的激光输出。通过使用不同透过率的输出耦合镜比较, 得到最大输出功率为 161 mW, 斜效率为 3.7% 的黄光激光输出, 不仅与初次实验报道进行了比较验证, 并提出了改进方法, 从而有利于继续挖掘 Dy:GMB 晶体在黄光波段激光的潜力。

关键词: 蓝光激光二极管泵浦; 平平腔; 黄光激光

中图分类号: TN248 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)12-3461-07

网络出版时间: 2025-10-16



可见光激光在生物领域、探测和显示应用中都有相应的需求。而相较于传统激光器, 通过红外波段激光器的非线性频率变换而得到的可见光激光^[1-2], 直接输出可见光的激光器有着更高的能量转换效率和优质的光束质量, 并且由于其结构更为简单, 所以激光器可以设计得更紧凑。而直接输出的可见光激光晶体多是利用稀土元素, 如 Pr^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 等^[3-7] 的掺杂。但由于对应吸收波段的泵浦研制还未完善, 所以可见光激光晶体研究较为迟缓。2004 年, Richter 等实现了由蓝光激光二极管直接泵浦的连续波 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 激光器, 这种激光器使用了一种最大输出功率为 25 mW、波长约为 442 nm 的氮化镓激光二极管作为泵浦源。该 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 激光器在 639.7 nm 波长下输出功率为

1.8 mW, 阈值泵浦功率和斜率效率分别为 5.5 mW 和 24%^[8]。随着蓝光半导体激光器的不断发展, 其功率水平逐渐提高, 利用高功率蓝光半导体激光作为泵浦源使得直接可见光激光器的吸收效率和输出功率提高, 以及有更高的斜率效率。

Pr^{3+} 掺杂晶体报道较多的是产生 640 nm 红光、607 nm 橙光、522 nm 绿光激光。例如, 2011 年, Gün 等实现了利用 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体输出功率 938 mW, 斜效率为 63.6% 的 640 nm 激光器^[9]。2020 年, Lin 等实现了利用 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体输出功率 4.88 W, 斜效率为 49% 的 607 nm 激光器^[10]。2024 年, Zhang 等实现了利用 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 晶体输出功率 7.56 W, 斜效率为 56.5% 的 522 nm 激光器^[11]。 Tb^{3+} 掺杂晶体主要是产生 541 nm 绿光激光, 如 2020 年, Chen 等

收稿日期: 2025-11-06。 修订日期: 2025-12-13。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3605703); 国家自然科学基金(U21A20508, 62105334); 中国科学院青年创新促进会项目(2022303); 中国科学院技术支撑人才专项(2022000061); 中国科学院科研仪器设备研制项目(YZLY202001); 中国科学院海西研究院自主部署项目(CXZX-2023-JQ01, CXZX-2022-GH09), 中国福建光电信息科学与技术创新实验室项目(2024CXY108, 2020ZZ108, 2021ZZ118)。

第一作者: 潘圣元(1999—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 张 戈(1972—), 男, 博士, 研究员;

林州斌(1968—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-11-06. Revised date: 2025-12-13.

First author: PAN Shengyuan (1999—), male, Master candidate.

E-mail: panshengyuan@fjirsm.ac.cn

Correspondent author: ZHANG Ge (1972—), male, Ph.D., Professor.

LIN Zhoubin (1968—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn; lzb@fjirsm.ac.cn

使用 *c*-cut Tb:LiYF₄ 晶体, 实现了 544 nm 激光 1.17 W 的最大输出功率, 斜效率为 59%^[12]。直接可见光输出的激光器还有一个优点, 即通过倍频能得到紫外波段的激光, 相较于红外激光器的多次非线性频率变换过程有更高的能量转换率和优质的光束质量。2021 年, Zhang 等报道利用 Pr³⁺:LiYF₄ 和 LBO, 实现了 320 nm 紫外激光输出, 最大输出功率为 1.01 W^[13]。2024 年, 张首焱等报道利用 Pr³⁺:LiYF₄ 和 LBO, 实现 261 nm 紫外激光输出, 最大输出功率为 1.17 W^[14]。

黄光激光在生物医学、空间目标探测和识别等领域有着重要的应用。例如, 钠导星激光技术, 是一种用于地基自适应光学系统的技术, 其核心在于利用激光激发高空的钠原子层, 产生人工导引星, 以探测和校正大气湍流引起的光波波前畸变, 从而提高地基光学望远镜的成像分辨率, 而黄光波段的激光正好能够匹配钠原子的共振线。医学上, 由于血红蛋白对 585 nm 到 595 nm 波长的黄光吸收率高, 黄光激光可用于鲜红斑痣及眼科的激光治疗^[15]。

早期直接产生黄光激光的染料激光器和气体激光器因其体积大、安全性差、功率低、激光循环冷却系统复杂等原因已逐步退出历史舞台。目前, 得到黄光激光的主流手段还是和频与拉曼效应。对于和频方法, 2017 年, 文献[16]报道基于 1064 nm 激光和 1319 nm 激光之间的腔外和频生成 101 W 全固态 589 nm 双谱线钠信标激光器。2019 年, Lu 等报道基于通过 1064 nm 激光和 1319 nm 激光的和频产生开发了一种 208 W 全固态准连续波钠导星激光器^[17]。和频方法的缺点是在激光器结构比较复杂, 设计上比较困难, 对镀膜的工艺要求也高。对于拉曼方法, 2020 年, Chen 等开发了 1 种 Nd:GdVO₄ 激光器, 通过在 KGW 晶体中实现腔内受激拉曼散射和在 LBO 晶体中实现二次谐波产生, 生成了 3.1 W 的 578 nm 黄光^[18]。2021 年, Chen 等提出了 1 种新的输出耦合器(OC), 通过增强腔体反射率显著提高了二极管泵浦 Nd:GdVO₄ 与 KGW 拉曼黄橙色激光器的输出功率和效率, 使 578.8 nm 的黄色激光的最大输出功率从 5.7 W 提高到 10.5 W^[19]。对于拉曼激光器, 激光器腔内基频光激发和受激拉曼散射效应所引起的热效应对谐振腔的稳定性影响特别大, 所以, 这种方法对散热系统有着极高的要求。

此外, 2024 年, Koganei 等报道使用掺 Dy 离子的单模双包层结构防潮氟铝酸盐玻璃光纤

(Dy³⁺:SM-DC-WPFGF) 和 450 nm 氮化镓激光二极管作为泵浦的单模黄色光纤激光器, 实现 445 mW 功率输出及 51.2% 的斜效率^[20]。而直接输出黄光波段激光的晶体研究相对较少, 直接输出黄光激光, 对于能量的转化有所提高, 所以, 能够直接激发黄光激光的晶体也是不可或缺的, 科研界也正在积极地研究直接发射黄光激光的晶体。以下将介绍近段时间被 Huang 等报道的 Dy³⁺:GdMgB₅O₁₀ (简称为 Dy:GMB) 晶体^[21], 并且该晶体已被证实可以产生 580 nm 波段的黄光激光。

1 Dy:GMB 晶体

Dy 离子能级跃迁如图 1 所示^[7]。由图 1 可见, 从 ⁴F_{9/2} 跃迁到 ⁶H_{13/2} 能级能发射出 580 nm 波段的黄光, 可以利用 Dy 离子掺杂去制备黄光激光晶体, 来获得 580 nm 波段的黄光激光输出。

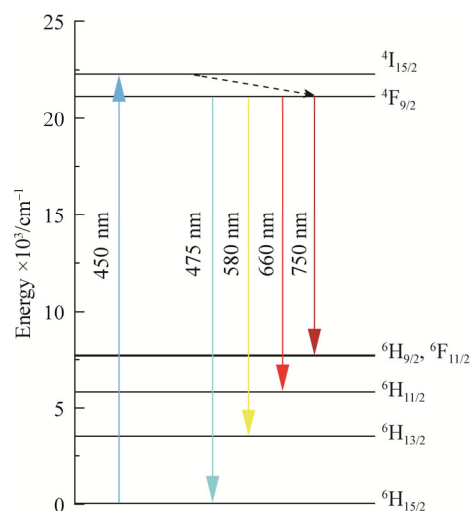


图 1 Dy³⁺能级图

Fig. 1 Energy level diagram of Dy³⁺

目前, 已报道的 Dy³⁺掺杂晶体激光器相对于 Pr³⁺掺杂和 Tb³⁺掺杂晶体激光器较少, 对于 580 nm 附近波段的激光器还不成熟。Huang 等通过顶部籽晶溶液法(TSSG)生长了 TbAl₃(BO₃)₄ 和 Dy³⁺:TbAl₃(BO₃)₄ 晶体, 即在 453 nm 激发下, Dy³⁺:TbAl₃(BO₃)₄ 晶体中观察到在约 541 nm 处的强绿色荧光, 而在 580 nm 波段的黄光荧光发射较弱, 所以, 其主要用于产生绿光激光^[22]。Liu 等报道了 Dy:YLF 和双掺杂 Dy,Tb:YLF 晶体的生长、热特性和光谱性质, 在 Dy,Tb:YLF 晶体中黄色荧光发射在约 575 nm 处, Dy,Tb:YLF 晶体是一种具有潜力的激光介质, 适用于 LD 泵浦的全固态黄色激光器^[23]。中国科学院福建物质结构研究所近期报道了通过顶部籽晶溶液生

长(TSSG)方法从 $\text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}\text{-B}_2\text{O}_3$ 熔剂中成功生长了 $\text{Dy}^{3+}:\text{GdMgB}_5\text{O}_{10}$ (Dy:GMB)晶体, 尺寸为 $33\text{ mm} \times 19\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 通过 ICP 分析测得 Dy^{3+} 的原子掺杂量为 6.08%。在报道中展示了 Dy:GMB 晶体的荧光光谱, Dy:GMB 晶体在 481、579、661 nm 和 750 nm 波段处有 4 个尖锐的荧光带, 分别对应于 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ 、 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ 、 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{11/2}$ 和 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{9/2} + ^6\text{F}_{11/2}$ 跃迁。黄光 579 nm 波段处的荧光发射是最强的, 其次是 481 nm 波段的荧光发射, 但是蓝光波段相对于黄光波段容易再被晶体吸收, 而红光 661 nm 波段的荧光很弱, 发射红光激光不太理想, 所以, 该晶体对于黄光激光的激发非常有利。

由图 2 可见, 这是该晶体在黄光波段的偏振吸收谱, Dy:GMB 晶体有 2 个较高的吸收峰, 分别为 443、452 nm, 并且在不同偏振情况下, 吸收效率不同, 可以明显看到与 Y 轴平行的泵浦光偏振输入最利于晶体的吸收。

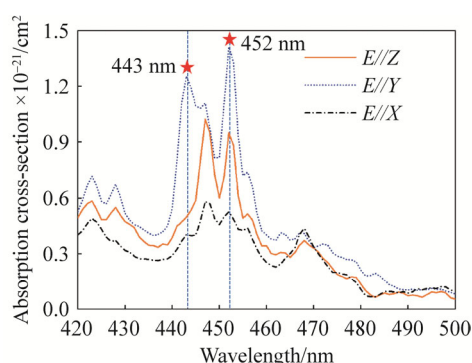


图 2 Dy:GMB 晶体的偏振吸收谱
Fig. 2 Polarization absorption spectrum of Dy:GMB

在 452 nm 辐射激发下, 从 $^4\text{F}_{9/2}$ 到 $^6\text{H}_{13/2}$ 发射的 579 nm 荧光寿命测量值为 459 μs 。由图 3 可见, 位于 579 nm 和 581 nm 的峰值发射截面分别为 $2.51 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$ 和 $2.0 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$, 分别对应于 E//Y 和 E//Z,

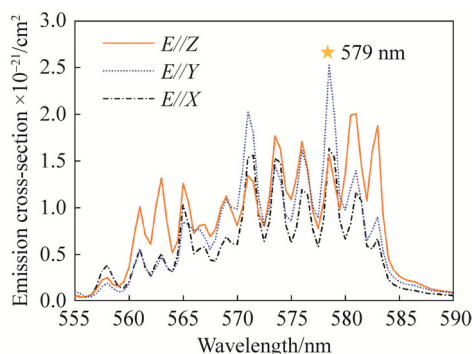


图 3 Dy:GMB 晶体的偏振发射谱
Fig. 3 Polarized emission spectrum of Dy:GMB

直接蓝光激光二极管泵浦下实现连续波黄光激光器, 表明该方法实现了最大输出功率为 628 mW、激光波长为 581 nm 的黄光激光器, 这是目前 Dy^{3+} 掺杂晶体中黄光激光器的最高输出功率^[21]。但由于生长工艺还未成熟, 目前, 能做激光实验的 Dy:GMB 晶体只有 Y-cut 晶体, 所以, 晶体的吸收和发射能力相对于其他切向的晶体稍弱。

2 实验

由图 4 可见, 本次使用最大功率为 12 W 的 444 nm 蓝光 LD 泵浦, 蓝光 LD 泵浦型号为 LSR444CP4-12W, 泵浦为空间光直接输出, 未进行光纤耦合, 使用风冷进行散热, 温度保持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

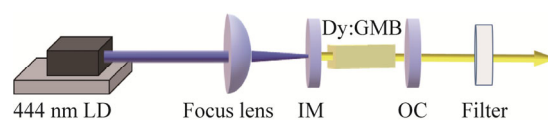


图 4 激光实验光路图
Fig. 4 Laser experiment optical path

泵浦的出光口处光斑大小为水平方向 4.3 mm, 竖直方向 4.1 mm, 泵浦的光斑在 0.5 m 之内平行度良好, 可以近似为平行光, 并直接使用焦距为 150 mm 的平凸透镜进行聚焦。本次使用一块尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的 Y-cut Dy:GMB 晶体进行实验, 该晶体 Dy^{3+} 的原子掺杂量为 6.08%, 晶体的端面经过抛光, 未对蓝光波段镀膜。用铝箔将 Dy:GMB 晶体包裹放置水冷铜块中, 铜块水冷温度设置为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 5 为 Dy:GMB 晶体摆放方向图。泵浦光的偏振方向为竖直方向, 根据 Dy:GMB 晶体不同轴向的偏振吸收效率, 选择将晶体在光路中的摆放位置如图 5a 所示。在非发光情况下, 对晶体进行泵浦光吸收效率测量, 如图 5a 的位置摆放晶体的泵浦光吸收效率为 55%, 如图 5b 的位置摆放晶体的泵浦光吸收效率为 23%。激光谐振腔由 2 块镀膜平面镜构成, IM 为泵浦光输入镜, 镀膜参数为对 444 nm 波长减反和增透, 实测 444 nm 透过率为 96%; 对 579 nm 波长高反, 反射率 $\geq 99.8\%$ 。OC 为输出耦合镜, 分别利用 579 nm 波长透过率为 1%、2% 的镀膜镜片进行实验。

实验之前, 对所用的空间输出泵浦的光束进行测量, 得到的光束轮廓如图 6 所示, X 表示为水平方向, Y 为竖直方向。由图 6 可见, 所用的泵浦光经过平凸透镜聚焦后, 测量得到的 X 与 Y

束腰光斑分别为 $115\ \mu\text{m}$ 和 $54\ \mu\text{m}$ ，计算 X 与 Y 的光束发散半角分别为 $18.09\ \text{mrad}$ 和 $18.95\ \text{mrad}$ 。在激光输出端放置长通截止滤波片，截止波长

$450\ \text{nm}$ ，能有效地减少泵浦光对功率测量的影响。在输出激光后，利用格兰棱镜对输出激光进行检偏。

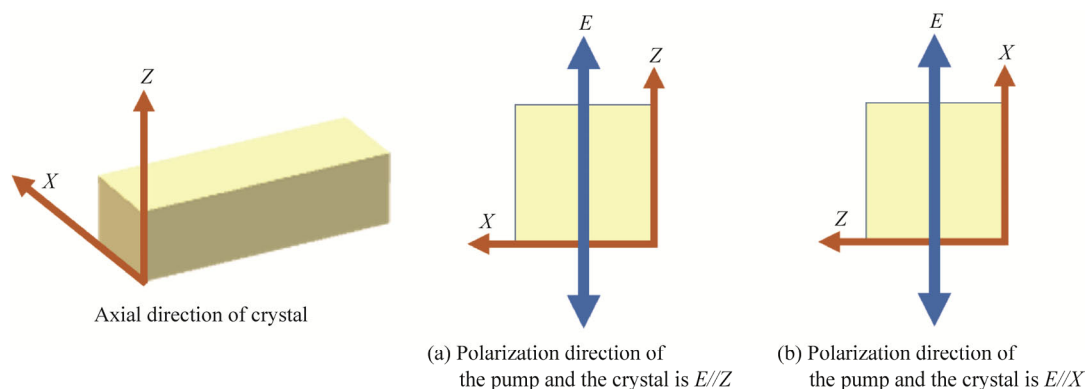


图 5 Dy:GMB 晶体摆放方向图
Fig. 5 Diagram of the orientation of Dy:GMB crystals

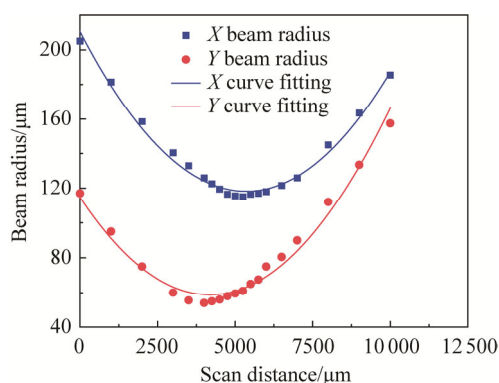


图 6 水平与竖直方向的泵浦光束轮廓
Fig. 6 Profiles of the pump beam in the horizontal and vertical directions

3 数据分析

由图 7 可见，激光器输出的激光波长为 $579.3\ \text{nm}$ ，且并未发现其他波长激光的输出。在该晶体首次报道时，出现了在泵浦不同功率下，激光器输出波长从 $579\ \text{nm}$ 变化到 $581\ \text{nm}$ 的现象；而在本次并未出现泵浦功率不同情况下，激光器输出波长变化的现象。因为本次所用泵浦的功率远低于首次实验所用的泵浦功率，推测没有出现波长变化现象是泵浦功率相对较低导致。

通过利用格兰棱镜进行测量，激光器输出激光的偏振如图 8 所示。由图 8 可见， $579.3\ \text{nm}$ 激光为竖直偏振，根据晶体的摆放情况和泵浦光的偏振方向可以确认激光输出偏振是平行于 Z 轴的线偏光，与 Dy:GMB 晶体的发射谱能对应。同时根据 Dy:GMB 的偏振发射谱，3 个偏振方向都能发射

$579\ \text{nm}$ 激光，之后可以探索其他 2 个轴向的偏振输出。

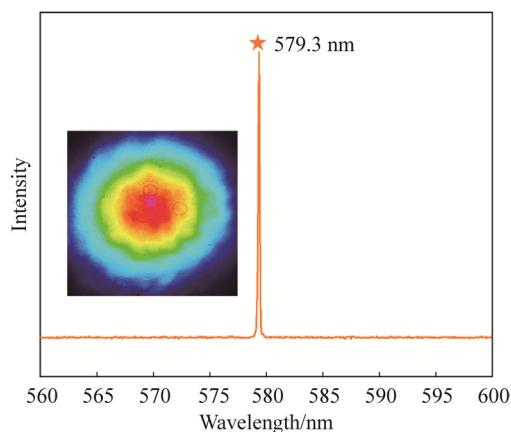
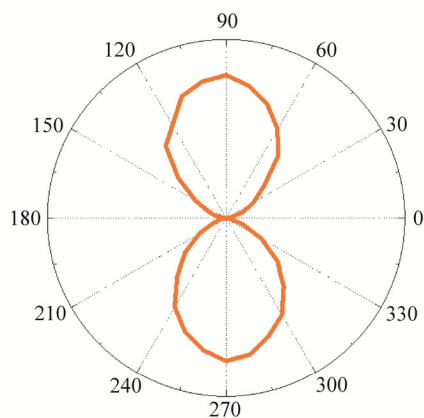


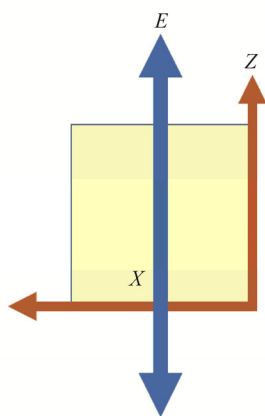
图 7 激光器输出光谱和光斑图
Fig. 7 Laser output spectrum and beam profile

通过测量不同的 OC 透过率下的激光器输出，得到的输出功率如图 9 所示。由图 9 可见，在 OC 透过率为 1% 实验中，晶体对泵浦光的吸收功率为 $1.94\ \text{W}$ 时开始产生激光，最大输出功率为 $161\ \text{mW}$ ，斜效率为 3.7%。在 OC 透过率为 2% 时，晶体对泵浦光的吸收功率为 $2.81\ \text{W}$ 时开始产生激光，最大输出功率为 $129\ \text{mW}$ ，斜效率为 3.6%，2 组实验中未发现激光输出功率饱和的现象。OC 透过率为 1% 的激光器激光产生阈值和激光输出功率等略优于 OC 透过率为 2% 的激光器，这与该晶体的另一篇报道^[21]实验结果情况大致相符。

与目前已知的该晶体最大激光输出功率为 $628\ \text{mW}$ 对比，实验中的最大输出功率为 $161\ \text{mW}$ ，



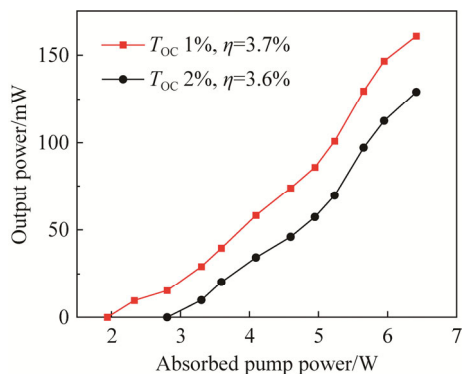
(a) Direction of laser polarization



(b) Polarization direction of the pump and the crystal is E//Z

图 8 输出激光偏振情况与晶体摆放方向对照图

Fig. 8 Output the diagram correlating laser polarization with crystal orientation



T_{OC} is transmittance of output coupler mirror at 580 nm. η is slope efficiency of laser output power with respect to pump absorption power.

图 9 不同 OC 透过率下的激光输出效率

Fig. 9 Laser Output Efficiency at Different OC Transmission Rates

这是由于泵浦的最大功率为 12 W, 按照斜效率的估算, 同样的泵浦吸收功率下, 激光器的最大输出功率应该会大于 628 mW。经过 2 台蓝光 LD 泵浦的比较可知, 444 nm 蓝光 LD 泵浦的光束质量及光谱相较于 452 nm 蓝光 LD 泵浦更好。所以, 都是平平腔

时, 晶体的吸收效率更高, 产生激光的输出功率更高。此外, 444 nm 蓝光 LD 泵浦输出光并未经过光纤耦合, 输出光斑在不同电流下, 光斑会产生一定的形变。本次并未对蓝光 LD 泵浦光斑进行整形, 只使用 1 个聚焦透镜会导致水平和竖直方向的光斑聚焦程度的不一致, 容易影响晶体对泵浦光的吸收, 所以, 对比于目前相对成熟的 Pr:YLF 晶体, 该晶体制备的激光器输出功率及斜效率都较低。

测量 579.3 nm 激光在输出功率为 161 mW 时的光束质量如图 10 所示。由图 10 可见, 因为光斑椭圆度良好, X 与 Y 方向的 M^2 分别为 2.78 与 2.80。

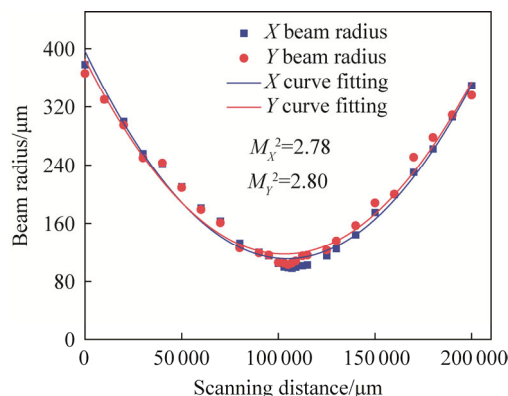
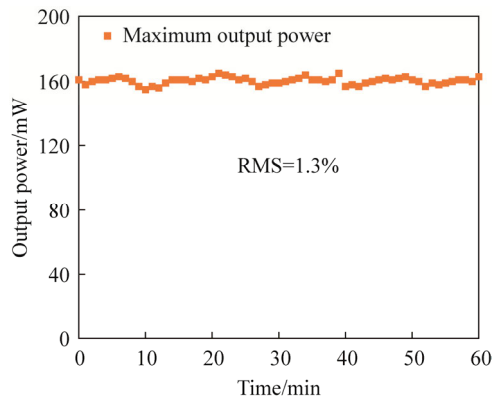
图 10 579.3 nm 激光光束质量 M^2 Fig. 10 M^2 beam quality of 579.3 nm laser

图 11 为激光输出功率为 161 mW 时的功率稳定性测量。由图 11 可以看出, 激光器稳定性良好, 与最大功率 161 mW 浮动偏差值小。通过前后 2 次对于该晶体的性能比较, 可知有 3 种方法可以提高激光器的输出功率和斜效率: 一是利用高功率和光束质量更好的泵浦提高 Dy:GMB 晶体的吸收效率; 二是利用其他类型的激光腔, 并且对 IM 和 OC 镀膜



RMS is degree of deviation from maximum output power.

图 11 激光输出功率为 161 mW 时的稳定性

Fig. 11 Laser stability at 161 mW output power

参数进行优化^[24], 对泵浦光进行整形, 以使得泵浦光和激光腔的有更好的空间模式匹配; 三是优化生长过程以获得足够长度的 *X*-cut 或 *Z*-cut 晶体, 以及不同浓度的 Dy^{3+} 掺杂晶体^[25], 从发射谱中可以看出, $\text{Dy}:\text{GMB}$ 晶体在 *E*/*Y* 方向 579 nm 处发射截面是最大的。

5 结论

成功实现用 444 nm 蓝光 LD 泵浦, 以及 $\text{Dy}:\text{GMB}$ 晶体搭建平平腔激光器得到了波长为 579.3 nm 的黄光激光, 获得最大输出功率为 161 mW, 斜效率为 3.7% 的激光输出。根据 $\text{Dy}:\text{GMB}$ 晶体的偏振吸收情况, 利用不同波长的 LD 蓝光泵浦, 与该晶体首次激光实验所用 452 nm 蓝光 LD 泵浦进行对比较, 充分挖掘晶体的潜力。根据实际情况和实验设备条件, 推断出 3 种能够提高黄光激光输出功率的方法, 为后续利用 $\text{Dy}:\text{GMB}$ 晶体搭建激光器的输出功率和斜效率提高提供思路。

参考文献:

- 王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 29–36.
WANG Zhichao, DU Chenlin, RUAN Shuangchen. Laser Optoelectron Prog, 2008, 45(1): 29–36.
- 周城, 叶子青, 郑权, 等. 半导体泵浦全固体蓝光激光器的研究进展[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 295–299.
ZHOU Cheng, YE Ziqing, ZHENG Quan, et al. Opt Precis Eng, 2002, 10(3): 295–299.
- 徐斌, 张腾, 邹金海, 等. 直接产生可见光的激光器研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 484–496.
XU Bin, ZHANG Teng, ZOU Jinhai, et al. J Xiamen Univ Nat Sci, 2021, 60(3): 484–496.
- 张料林, 朱思豫, 黄嘉楠, 等. 蓝光LD泵浦稀土掺杂可见光光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(15): 1516016.
ZHANG Liaolin, ZHU Siyu, HUANG Jianan, et al. Laser Optoelectron Prog, 2022, 59(15): 1516016.
- TANAKA H, KALUSNIAK S, BADTKE M, et al. Visible solid-state lasers based on Pr^{3+} and Tb^{3+} [J]. Prog Quantum Electron, 2022, 84: 100411.
- KALUSNIAK S, CASTELLANO-HERNÁNDEZ E, YALÇINOĞLU H, et al. Spectroscopic properties of Tb^{3+} as an ion for visible lasers[J]. Appl Phys B, 2022, 128(2): 33.
- KRÄNKEL C, MARZAHN D T, MOGLIA F, et al. Out of the blue: Semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers[J]. Laser Photonics Rev, 2016, 10(4): 548–568.
- RICHTER A, HEUMANN E, OSIAC E, et al. Diode pumping of a continuous-wave Pr^{3+} -doped LiYF_4 laser[J]. Opt Lett, 2004, 29(22): 2638–2640.
- GÜN T, METZ P, HUBER G. Power scaling of laser diode pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ cw lasers: Efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm[J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 1002–1004.
- LIN X J, ZHU Y, JI S H, et al. Highly efficient LD-pumped 607 nm high-power CW $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ lasers[J]. Opt Laser Technol, 2020, 129: 106281.
- ZHANG S Y, WANG S X, LIAN G, et al. 7.56-W continuous-wave Pr^{3+} -based green laser via managing thermally induced effects[J]. Opt Express, 2024, 32(1): 959–968.
- CHEN H, UEHARA H, KAWASE H, et al. Efficient visible laser operation of $\text{Tb}:\text{LiYF}_4$ and LiTbF_4 [J]. Opt Express, 2020, 28(8): 10951–10959.
- ZHANG Y S, ZOU J Y, ZHENG W X, et al. Watt-level continuous-wave intracavity frequency-doubled $\text{Pr}:\text{YLF-LBO}$ laser at 320 nm[J]. Chin Opt Lett, 2021, 19(9): 091406.
- ZHANG S Y, WANG S X, LIAN G, et al. High-efficiency 261-nm continuous-wave laser by single-blue-laser-diode-pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ crystal[J]. Opt Laser Technol, 2024, 169: 110003.
- 伍锡山, 张鹏, 刘彬, 等. 固体自喇曼黄光激光器研究进展[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 673.
WU Xishan, ZHANG Peng, LIU Bin, et al. Laser Technol, 2018, 42(5): 673.
- LU Y H, ZHANG L, XU X F, et al. Tunable line width all solid state double spectral line sodium beacon laser[J]. Proc SPIE-Int Soc Opt Eng, 2017; 10436: 1043605.
- LU Y H, ZHANG L, XU X F, et al. 208 W all-solid-state sodium guide star laser operated at modulated-longitudinal mode[J]. Opt Express, 2019, 27(15): 20282–20289.
- CHEN Y F, HUANG H Y, LEE C C, et al. High-power diode-pumped $\text{Nd}:\text{GdVO}_4/\text{KGW}$ Raman laser at 578 nm[J]. Opt Lett, 2020, 45(19): 5562–5565.
- CHEN Y F, LI D, LEE Y M, et al. Highly efficient solid-state Raman yellow-orange lasers created by enhancing the cavity reflectivity[J]. Opt Lett, 2021, 46(4): 797–800.
- KOGANEI A, KATSURAGAWA H, KOBAYASHI S, et al. High power and high efficiency yellow laser in Dy^{3+} -doped single-mode double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fiber[J]. Opt Commun, 2024, 566: 130659.
- HUANG Y S, GONG X R, ZHANG L Z, et al. First achievement of yellow laser operation in Dy^{3+} -doped borate crystals[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2024, 16(37): 49556–49562.
- HUANG J H, LIN Y F, GONG X H, et al. Growth, spectroscopy and $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$ energy transfer of $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ and $\text{Dy}^{3+}:\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystals[J]. Opt Mater, 2024, 150: 115287.
- LIU X K, GONG Q R, HUANG C H, et al. Crystal growth, property investigation, and the deactivation effect of Tb^{3+} in $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ codoped LiYF_4 crystals: Promising crystals for all-solid-state yellow lasers[J]. Cryst Growth Des, 2024, 24(9): 3699–3706.
- LUO S Y, YAN X G, CUI Q, et al. Power scaling of blue-diode-pumped $\text{Pr}:\text{YLF}$ lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm[J]. Opt Commun, 2016, 380: 357–360.
- FANG Q N, HUANG C H, ZHANG Y X, et al. Effects of Pr^{3+} doping concentration on optical properties of LaF_3 crystal[J]. Opt Laser Technol, 2023, 159: 109021.

Laser Diode-Pumped Yellow Dy³⁺: GdMgB₅O₁₀ Laser

PAN Shengyuan^{1,2}, JIANG Zeqian^{1,3}, HUANG Yisheng^{1,3}, LI Bingxuan^{1,3}, LIN Zhoubin^{1,3}, ZHANG Ge^{1,3}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China; 2. College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 3. Fujian College, University of Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Extended Abstract

Introduction Visible-light lasers have applications in biology, medicine, and detection. Compared to conventional nonlinear frequency doubling methods for obtaining visible light lasers, it is possible to prepare laser crystals that directly emit a visible light via doping with rare-earth elements such as Pr³⁺, Sm³⁺, Tb³⁺, and Dy³⁺. For yellow light lasers, doping with Dy³⁺ is more suitable. The existing Dy³⁺-doped laser crystals are still at the theoretical stage, with a few experimental cases. Recently, a high-quality Dy³⁺-doped borate crystal GdMgB₅O₁₀ (Dy³⁺:GMB) is prepared to produce a yellow light laser at a wavelength of 580 nm. In this study, a plane-plane cavity laser was assembled using a 3 mm×3 mm×20 mm Y-cut Dy³⁺:GMB crystal with a 444 nm blue LD pump, achieving a laser output at 579.3 nm. The maximum output power reached 161 mW with a slope efficiency of 3.7% as using different output couplers at different transmission rates.

Methods In this experiment, a 444 nm blue LD with a maximum power of 12 W was used as a pump source. The model of the blue LD pump was LSR444CP4-12W. The pump output a spatial light directly without fiber coupling and used air cooling to maintain a temperature of 25 °C. The beam size at the output of the pump was 4.3 mm horizontally and 4.1 mm vertically. The beam remained parallel within 0.5 m and could be approximated as a parallel light. A plano-convex lens with a focal length of 150 mm was used. A Y-cut Dy:GMB crystal with the dimensions of 3 mm×3 mm×20 mm was used. The doping concentration of Dy³⁺ in the crystal was 6.08%, and the end faces of the crystal were polished but not coated for the blue wavelength band. The Dy:GMB crystal was wrapped in indium foil and placed in a water-cooled copper block, with the copper block's water cooling set to 20 °C. The polarization direction of the pump light was vertical. Based on the polarization absorption efficiency of the Dy:GMB crystal along different axes, the crystal was positioned in an optical path. The pump light absorption efficiency of the crystal was measured under non-lasing conditions. When the crystal was placed, the pump light absorption efficiency was 55%. The laser resonator consisted of two coated plane mirrors. IM was the input mirror for the pump light, with coating parameters that could reduce reflection and increase transmission at 444 nm. The measured transmission at 444 nm was 96%. It also had a high reflectivity at 579 nm with a reflectivity of ≥99.8%. OC was the output coupler mirror, and the coated mirrors with 579 nm transmission rates of 1% and 2% were used. A long-pass edge filter with a cutoff wavelength of 450 nm was placed at the laser output to effectively reduce the impact of pump light on power measurements. After the output power measurement, a Glan prism was used to analyze the polarization of the output laser.

Results and discussion The output wavelength of the experimental laser is 579.3 nm, without other wavelengths detected. In the experiment with an OC transmission rate of 1%, a laser generation begins when the crystal absorbs 1.94 W of pump power, achieving a maximum output power of 161 mW and a slope efficiency of 3.7%. In the experiment with an OC transmission rate of 2%, a laser generation starts at an absorption power of 2.81 W, having a maximum output power of 129 mW with a slightly lower slope efficiency of 3.6%. No saturation in laser output power occurs in either set of experiments. The laser threshold and output power using an OC transmission rate of 1% are slightly greater than those using an OC transmission rate of 2%, which is consistent with the results reported in a previous study. Based on the slope efficiency, it is estimated that under the same pump absorption power, the maximum output power of the laser in this experiment can exceed 628 mW. There are three methods to improve the output power and slope efficiency of the laser via comparing the performance of the crystal in two separate experiments. The first method is to use a higher-power and higher-quality pump to enhance the absorption efficiency of the Dy:GMB crystal. The second method is to employ different types of laser cavities and optimize the coating parameters of the IM and OC, as well as shape the pump beam to achieve better spatial mode matching between the pump light and the laser cavity. The third method is to optimize the growth process to obtain X-cut or Z-cut crystals of sufficient length with varying Dy doping concentrations, as the emission cross-section of the Dy:GMB crystal is maximum at 578.5 nm along the E/Y direction.

Conclusions A 579.3 nm yellow laser output with a maximum power of 161 mW and a slope efficiency of 3.7% was obtained using a plane-plane cavity laser setup with Dy:GMB crystal pumped by a 444 nm blue LD. An application potential of the crystal could be achieved via comparing the initial laser experiments with the same crystal using blue LDs at different wavelengths. This study could provide insights for future improvements in the output power and slope efficiency of lasers constructed with Dy:GMB crystals.

Keywords blue Laser diode pump; plane-plane cavity; yellow laser