

双端泵浦Nd³⁺掺杂MgO:LiNbO₃正交偏振双波长连续激光调控

刘鸿志 王宇恒 郑浩 赵云峰 于永吉 金光勇

Regulation of orthogonally polarized dualwavelength continuous wave laser based on double-end pumped Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃

Liu Hong-Zhi Wang Yu-Heng Zheng Hao Zhao Yun-Feng Yu Yong-Ji Jin Guang-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 184203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210449

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210449>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

双波长二极管合束端面抽运掺镨氟化铍单纵模360 nm紫外激光器

Combined dual-wavelength laser diode beam end-pumped single longitudinal mode Pr³⁺:LiYF₄ 360 nm ultraviolet laser

物理学报. 2019, 68(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182018>

MnPS₃可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 184208 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

波长锁定激光二极管共振泵浦Nd:YVO₄晶体连续波自拉曼激光器的设计与研究

Research and design of continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser in-band pumped by a wavelength-locked laser diode

物理学报. 2017, 66(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194203>

Nd³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究

Stimulated emission and laser behaviors of Nd³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphate glass fiber

物理学报. 2017, 66(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.164204>

双波长外腔面发射激光器

Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2019, 68(11): 114204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182261>

双端泵浦 Nd³⁺掺杂 MgO:LiNbO₃ 正交偏振 双波长连续激光调控*

刘鸿志 王宇恒 郑浩 赵云峰 于永吉[†] 金光勇

(长春理工大学理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)

(2021年3月8日收到; 2021年4月5日收到修改稿)

报道了一种采用双端泵浦的 Nd³⁺离子掺杂 MgO:LiNbO₃ 正交偏振双波长激光器, 并对正交偏振双波长激光输出进行调控. 基于晶体的偏振荧光光谱, 对 1084 与 1093 nm 的双波长激光振荡机理进行分析, 建立晶体热透镜焦距与受激发射截面比之间的关系, 并推导出 1084 及 1093 nm 双波长共振区间, 给出通过改变谐振腔腔型结构调控双波长激光输出的方法. 在实验中采用 813 nm 的半导体激光器双端泵浦 *a* 切的 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体, 测量了 1084 与 1093 nm 两种波长的输出规律, 并对输出波长进行调控. 最终得到了 6.02 W 的 1093 nm 和 3.02 W 的 1084 nm 单波长激光输出, 在 *X*, *Y* 方向上的光束质量分别为 $M_x^2 = 1.70$ 和 $M_y^2 = 1.81$. 在 28 W 泵浦注入功率下获得了 4.58 W 的双波长激光输出, 实验结果与理论分析相符合. 为正交偏振双波长的可控输出及应用奠定了理论和实验基础.

关键词: 1084/1093 nm 双波长, Nd:MgO:LiNbO₃, 正交偏振, 波长调控

PACS: 42.25.-p, 42.25.Ja, 07.05.Dz

DOI: 10.7498/aps.70.20210449

1 引言

正交偏振双波长广泛应用于激光干涉测量、差分吸收激光雷达、全息显微术和精密测量, 特别是在精密测量方面, 同时发射两个正交偏振波长的激光由于其独特的偏振特性, 可进行如长度、位移、角度、速度、压力、磁场等的精密测量. 正交偏振双波长也可用于科学研究, 如用于原子激光冷却, 具有广泛的应用前景和使用价值^[1-8], 使其成为固体激光领域的研究热点之一^[9-11].

目前 Nd:YVO₄, Nd:YLF 和 Nd:YAP 是获得正交偏振双波长激光^[12]的主要晶体, 2019 年广东省晶体与激光技术工程研究中心的 Tu 等^[13]通过端面泵浦 Nd:YLF 获得了 1314 和 1321 nm 正交

偏振双波长输出, 在 20 kHz 的脉冲重复频率下平均功率为 6.5 W. 同年, 厦门大学的 Qi 等^[14]使用 *a*-cut Nd:YAP 获得了 1079.5 和 1099 nm 的正交偏振双波长激光, 最大输出功率为 976 mW, 斜率转换效率为 7%. 然而输出波长均为单波长交替输出, 并未能实现正交偏振双波长同步输出. 近年来, 基于 Nd³⁺离子掺杂 MgO:LiNbO₃ 晶体的正交偏振双波长同步输出开始成为新型研究热点. 2016 年山东大学 Fan 课题组^[15]报道了 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的 1084 与 1093 nm 双波长激光同步输出现象, 并从能级角度对其双波长的产生原理进行了分析, 但并未对其输出波长进行控制. 2019 年长春理工大学王宇恒等^[16]在山东大学 Fan 课题组^[15]研究的基础上, 通过改变泵浦注入光斑, 调节晶体温升, 分别实现了单波长与双波长输出, 但由于光斑

* 国家自然科学基金(批准号: 11974060, U20A20214)和吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(批准号: 20190101004JH)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yyjcust@163.com

差异较大,不能便捷实现对输出波长的调控.迄今为止,关于正交偏振双波长的研究多倾向于单波长输出或双波长同步输出,对于输出波长进行调控的研究鲜有报道.

基于此,本文从Nd:MgO:LiNbO₃晶体的偏振荧光光谱出发,分析1084与1093 nm的双波长激光振荡原因,建立了晶体热透镜焦距与受激发射截面比之间的联系,通过调节谐振腔腔型结构对Nd:MgO:LiNbO₃晶体的正交偏振双波长激光输出进行控制.最终演示了以半导体激光器双端泵浦*a*切的Nd:MgO:LiNbO₃晶体,在不添加任何额外的光学元件情况下,得到了3.02 W的1084 nm和6.02 W的1093 nm单波长激光输出,在28 W泵浦注入功率下获得了4.58 W的双波长同时输出,并给出了切换三种输出状态的控制手段.为后续充分利用正交偏振双波长的可控输出及应用奠定了实验基础.极大地提高了可调控1804/1093 nm正交偏振双波长激光的应用范围.

2 Nd:MgO:LiNbO₃晶体的双波长激光器实验装置

基于Nd:MgO:LiNbO₃的正交偏振双波长激光器实验装置如图1所示.泵浦源采用美国nLIGHT半导体激光公司生产的中心波长813 nm的光纤耦合模块,传输光纤半径为200 μm,数值孔径(NA)为0.22,经1:2耦合镜组(传输耦合效率达到97%)聚焦后抽运Nd:MgO:LiNbO₃晶体.沿*a*轴切割的Nd:MgO:LiNbO₃晶体尺寸为2 mm × 6 mm × 40 mm, Nd³⁺离子掺杂浓度为4%,两个端面镀有813 nm和1080—1090 nm增透膜(anti-reflective, AR),晶体侧面包裹一层铝箔卡在一块紫铜热沉中,通过外部水冷机循环制冷进行温度控制,水冷机控温精度达到±0.01 °C. M1镀有813 nm高透膜系和1084 nm高反膜系, M2镀有

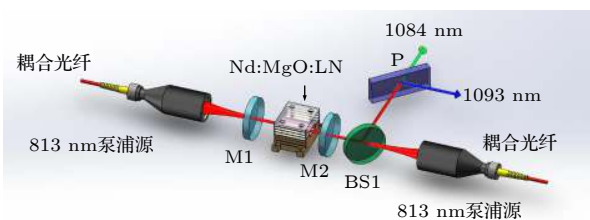


图1 Nd:MgO:LiNbO₃ (Nd:MgO:LN)激光器的激光实验装置图

Fig. 1. Diagram of laser experimental setup based on Nd:MgO:LiNbO₃ laser.

1084 nm部分高反膜系, BS1为45°镜镀有813 nm高透膜和1084 nm高反膜,在BS1右端放置一个镀有1080—1090 nm的45°偏振膜的偏振片,用以区分两种正交偏振输出.

3 Nd:MgO:LiNbO₃晶体的双波长激光输出理论分析

由Nd:MgO:LiNbO₃晶体的偏振荧光光谱入手,分析双波长激光振荡的起因,偏振荧光光谱如图2所示.

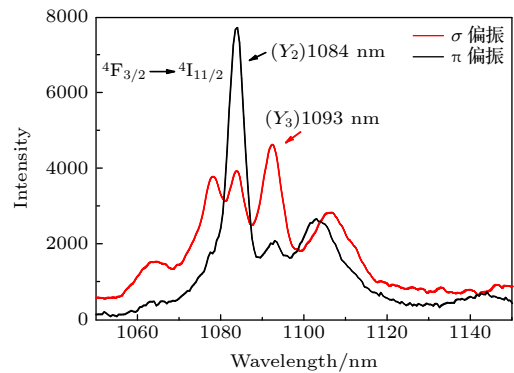


图2 Nd:MgO:LiNbO₃晶体的偏振荧光光谱
Fig. 2. Polarized fluorescence spectra of Nd:MgO:LiNbO₃ crystal.

从图2可以看出, Nd:MgO:LiNbO₃晶体表现出明显的偏振发射特性.由⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}的过程中,两种偏振的荧光谱均含有多个发射峰,其中π-偏振的1084 nm的发射峰明显强于其他波长,而σ-偏振的发射峰较为复杂,1078, 1084和1093 nm三个发射峰较为接近,其中1093 nm的发射峰稍强于其他两种谱线.为了对输出波长进行精确控制,引用荧光强度比*R*:

$$R = C_1 \frac{\left[1 + \exp\left(\frac{E_2}{K_B T}\right)\right] \cdot \exp\left(\frac{E_3 - E_2}{K_B T}\right)}{\left[1 + \exp\left(\frac{E_3}{K_B T}\right)\right]}, \quad (1)$$

其中*C*₁是常数系数,可以估算;*E*_{*i*} (*i* = 2, 3)是电*i*和地电之间的能量分离;*K*_B是玻尔兹曼常数;*T*是绝对温度.

根据Fuchtbauer-Ladenbury公式^[17-20],可以计算出有效的受激发射截面:

$$\sigma_\lambda = \frac{3\lambda^5 \beta_j I(\lambda)}{8\pi n^2 c \tau \int \lambda I d\lambda}, \quad (2)$$

其中 I 是作为波长函数的荧光强度; $I(\lambda)$ 是波长 λ 处的荧光强度; n 是材料折射率; c 是光速; τ 是上部激光水平的辐射寿命; β_j 是分支比, 对于 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 测得的分支比为 0.44. 从 (2) 式可以看出, σ_λ 与 $I(\lambda)\lambda^5$ 成正比, 含有比例因子 $3\beta_j / \left(8\pi n^2 c \tau \int \lambda I d\lambda \right)$. 因此, 受激发射截面比 R_e 可表示为

$$R_e = (\lambda_{1093}^5 / \lambda_{1084}^5) R \approx 1.0374R. \quad (3)$$

通过 (3) 式可以发现, 1093 与 1084 nm 两种谱线的受激发射截面比是温度 T 的函数, 由实测 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的荧光光谱得到, 当晶体温度趋近于 330 K 时, 1093 nm 的荧光谱线开始出现. 为了对双波长输出进行精准控制, 本文采用介稳腔法 [21] 对 a 切 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的热焦距进行实验测量, 拟合实际测量热焦距值得到图 3 所示的结果.

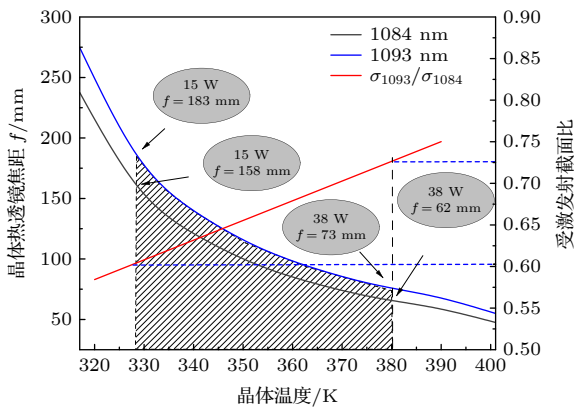


图 3 晶体热焦距和受激发射截面比 ($\sigma_{1093} / \sigma_{1084}$)
Fig. 3. Ratio of crystal thermal focal length to stimulated emission cross section ($\sigma_{1093} / \sigma_{1084}$).

测量结果显示, 晶体温度在 320—400 K 之间, 1084 和 1093 nm 具有不同的热焦距值. 结合热焦距经典公式进行分析:

$$f_1 = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right], \quad (4)$$

其中 ω_p 为泵浦光斑半径, K_c 为晶体热导率, P_{ph} 为产生热量的泵浦功率, dn/dT 为热光系数, α 为吸收系数, l 为晶体长度. 在 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体中, 由 ${}^4F_{3/2}$ 到 ${}^4I_{11/2}$ 跃迁产生的 1084 nm (Y_2) 和 1093 nm (Y_3) 的受激发射截面和折射率均不同, 致使双波长的热光系数 dn/dT 也不同, 最终导致 1084 和 1093 nm 具有不同的热焦距值, 可以看到,

晶体温度从 290 K 趋近于 380 K 时, 1084 nm 对应的热焦距范围从 158 mm 到 62 mm, 1093 nm 对应的热焦距范围从 183 mm 到 73 mm, 以此为依据设计双波长激光输出谐振腔. 使用 $ABCD$ 矩阵理论, 以晶体中心光斑半径作为谐振腔的稳定性判定依据, 设计了三种类型的谐振腔, 参数如表 1 所列, 模拟结果如图 4 所示.

表 1 谐振腔模拟参数
Table 1. Parameters of cavity simulation.

编号	M1曲率	M2曲率/mm	谐振腔长度/mm
1	∞	300	70
2	∞	300	100
3	∞	150	100

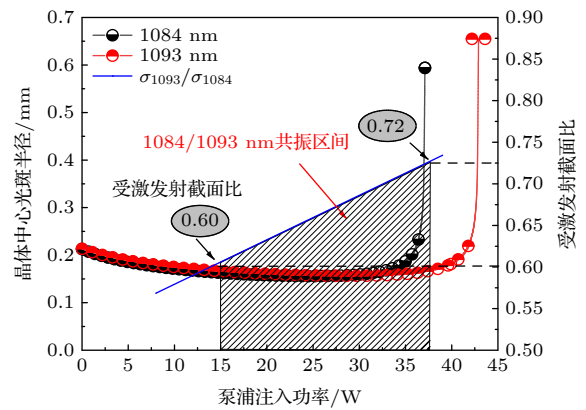


图 4 腔长 70 mm、输出镜曲率 $R = 300$ mm 时的双波长共振区间
Fig. 4. Dual-wavelength resonance range when the cavity length is 70 mm and the output mirror curvature $R = 300$ mm.

图 4 中黑色线条代表 1084 nm 激光的稳定区间, 红色线条代表 1093 nm 激光的稳定区间. 可以看出, 随着泵浦注入功率的提升, 受激发射截面比开始发生变化, 1084 nm 激光开始逐渐失稳. 当受激发射截面比大于 0.60 时, 1093 nm 激光开始起振, 当受激发射截面比大于 0.72 时, 1084 nm 激光振荡失稳, 仅为 1093 nm 单波长激光输出. 在此基础上, 继续使用表 1 中的谐振腔 2 和谐振腔 3 进行模拟, 模拟结果如图 5 和图 6 所示.

综合对比三种谐振腔模拟结果, 由图 4 和图 5 可知, 当 M2 曲率 $R = 300$ mm, 谐振腔长度为 70 mm 时, 双波长共振的泵浦注入功率区间为 15—38 W; 谐振腔长度为 100 mm 时, 双波长共振的泵浦注入功率区间为 15—28 W. 由此可知, 当

输出镜曲率不变, 谐振腔长度改变时, 双波长共振区间发生明显变化. 由图 5 与图 6 可知, 当谐振腔长度为 100 mm, M2 曲率由 $R = 300$ mm 改变为 $R = 150$ mm 时, 双波长共振区间的位置改变并不明显.

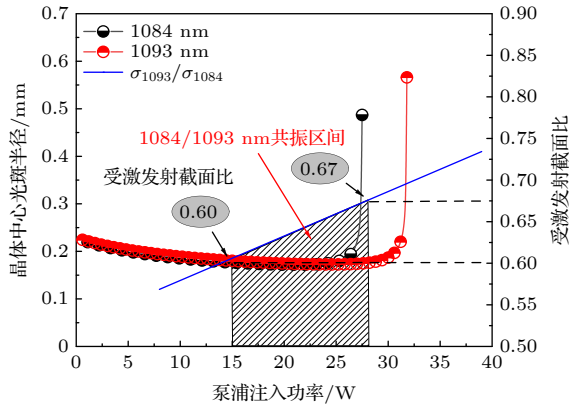


图 5 腔长 100 mm、输出镜曲率 $R = 300$ mm 时的双波长共振区间

Fig. 5. Dual-wavelength resonance range when the cavity length is 100 mm and the output mirror curvature $R = 300$ mm.

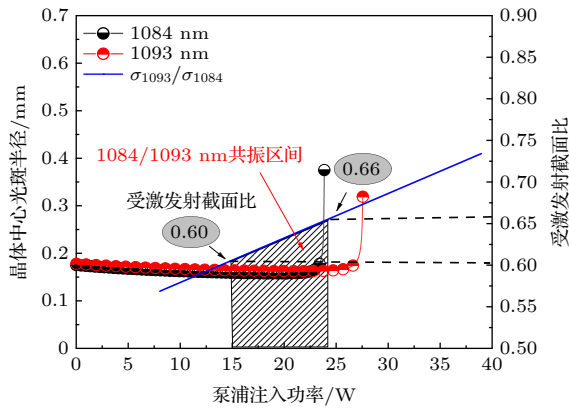


图 6 腔长 100 mm、输出镜曲率 $R = 150$ mm 时的双波长共振区间

Fig. 6. Dual-wavelength resonance range when the cavity length is 100 mm and the output mirror curvature $R = 150$ mm.

4 实验结果

使用图 1 的实验装置进行实验, 谐振腔中 M1, M2 镜的曲率按上述设计的谐振腔 1, 2, 3 进行设置, 具体镜片膜系与参数如表 2 所列.

首先搭建谐振腔 1, 分别采用透过率 $T = 6%$, 10% 和 15% 的输出镜进行实验, Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的输出功率特性如图 7 所示.

表 2 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的正交偏振双波长激光器镀膜参数

Table 2. Coating parameters of orthogonal polarization dual-wavelength laser based on Nd:MgO:LiNbO₃ crystal.

编号	材质	膜系参数
M1	K9	1084 nm@HR, 813 nm@HT
M2	K9	1084 nm@AR ($T = 6%, 10%, 15%$)
BS1	K9	45° 1084 nm@HR, 813 nm@HT
P	K9	1080—1090 nm 45°偏振膜

注: HR代表高反射率, HT代表高透射率.

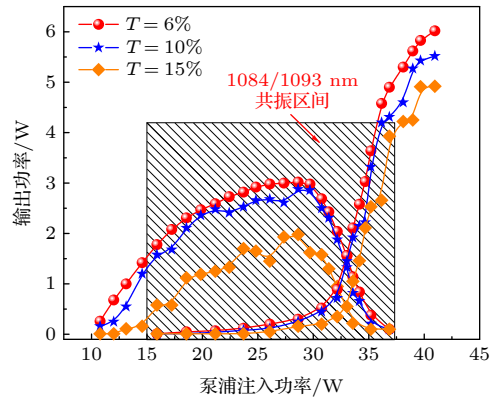


图 7 不同透过率下, 谐振腔 1 的激光输出功率特性

Fig. 7. Resonator cavity 1 laser output power characteristics.

从图 7 可以看出, 随着泵浦光功率的提高, 激光总功率略微下降, 双波长激光开始出现, 在 1084/1093 nm 输出区间内, 1084 nm 振荡减弱, 1093 nm 此时起振, 进一步提升泵浦注入功率, 1084 nm 停止振荡, 仅有 1093 nm 单波长激光输出, 最终获得 6.02 W 的 1093 nm 激光和 3.02 W 的 1084 nm 单波长激光输出, 及 4.58 W 的双波长激光同步输出. 当输出耦合率 (透过率) 选取为 $T = 10%$ 和 15% 时, 输出功率稍低于 $T = 6%$ 的情况, 为了获得最优的输出功率, 继续选用 $T = 6%$ 的输出镜进行实验. 同时由模拟结果可以发现, 输出耦合率 (透过率) 变化时, 双波长输出区间的位置基本保持一致, 由于双波长激光输出与晶体热效应有关, 通过调节输出耦合率 (透过率) 并没有改变腔内的热场分布, 因而对双波长区间影响并不明显.

采用 OSA205C 傅里叶变换光谱仪 (波长范围 1—5.6 μm) 和美国 THORLABS 生产的 PAX1000 IR2 偏振态测量仪对泵浦注入功率为 12, 31, 35 和 38 W 时谐振腔 1 的光谱和偏振态进行测量, 测量结果如图 8 和图 9 所示.

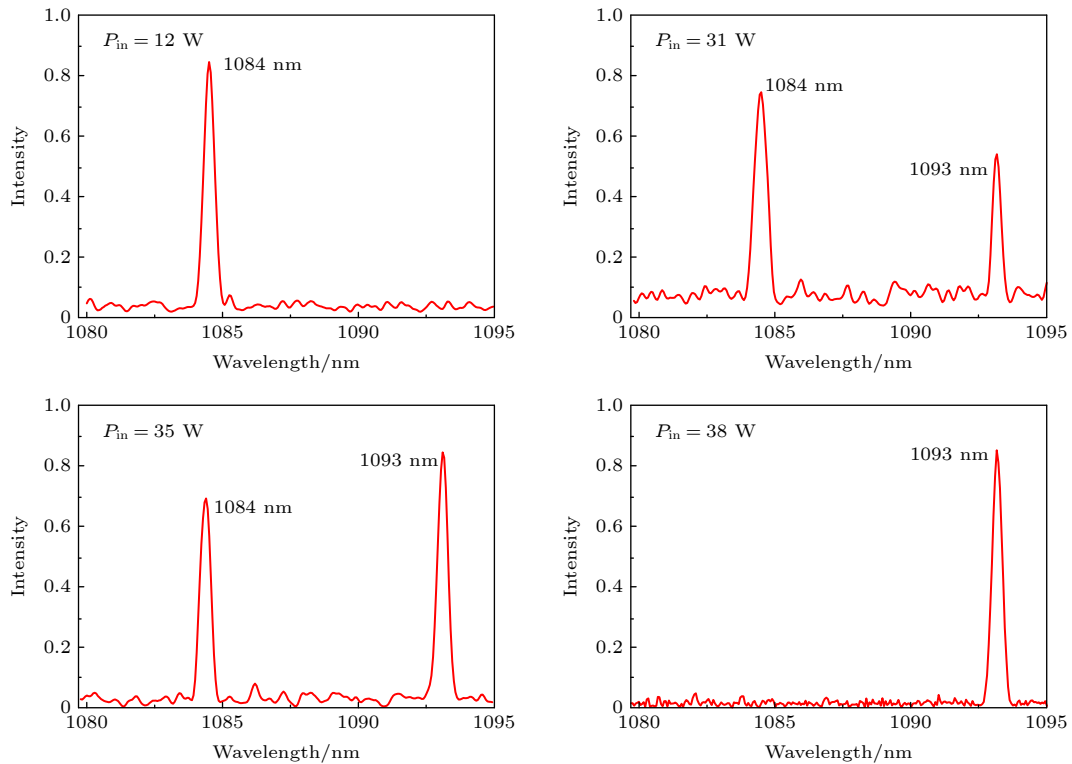


图 8 谐振腔 1 的 1084 与 1093 nm 双波长激光输出的变化过程与光谱

Fig. 8. Change process and spectrum of 1084 and 1093 nm dual-wavelength laser output for resonator cavity 1.

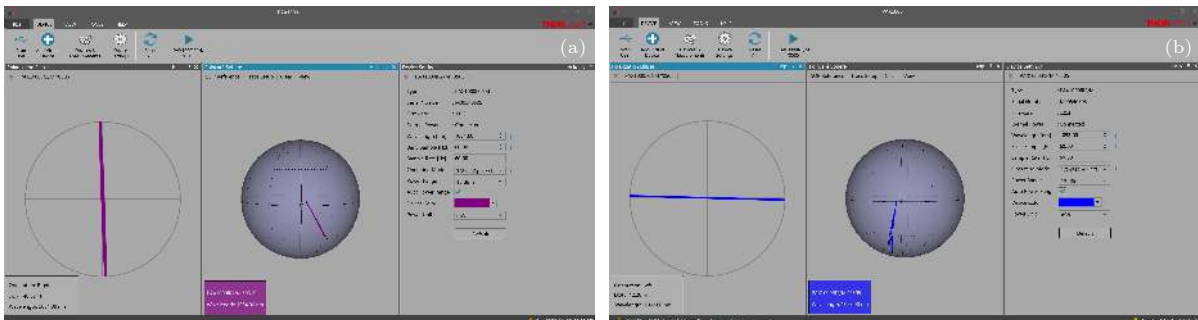


图 9 1084 和 1093 nm 激光波长的偏振态 (a) 1084 nm 偏振态; (b) 1093 nm 偏振态

Fig. 9. Polarization states of 1084 and 1093 nm laser wavelengths: (a) Polarization states of 1084 nm; (b) polarization states of 1093 nm.

从图 8 和图 9 可以看到, 1084 nm (π -偏振) 和 1093 nm (σ -偏振) 是属于正交偏振的双波长, 符合理论预期, 在 12 W 泵浦功率注入的情况下, 输出波长为 1084 nm, 结合上文的模拟结果可以发现, 此时的受激发射截面比小于 0.60, 1084 nm 的增益远大于 1093 nm, 抑制 1093 nm 导致其无法起振, 从而实现 1084 nm 单波长激光输出. 随着泵浦注入功率的提升, 在泵浦注入功率达到 15 W 时, 尽管外界泵浦功率已经达到 1093 nm 起振阈值, 但由于 1093 nm 的受激发射截面仍小于 1084 nm, 此时 1093 nm 的增益远小于 1084 nm 的激光增

益, 1093 nm 的激光谱线被严重抑制, 效率较低. 泵浦注入功率趋近 30 W 时, 1093 nm 才开始实现高增益振荡, 双波长竞争激烈, 但 1093 nm 的荧光强度仍小于 1084 nm, 泵浦注入功率继续提升至 35 W 时, 1093 nm 的荧光强度略大于 1084 nm, 仍为双波长激光输出, 当泵浦注入功率为 38 W 时, 1084 nm 激光开始失稳, 仅有 1093 nm 单波长激光输出. 在此基础上, 将谐振腔长度变为 100 mm, 分别采用表 1 中谐振腔 2 和 谐振腔 3 的参数进行实验, 最终谐振腔 2 获得了 5.86 W 的 1093 nm 和 2.79 W 的 1084 nm 单波长输出, 以及 3.77 W 的

1084/1093 nm 双波长激光输出; 谐振腔 3 获得了 2.86 W 的 1093 nm 和 1.86 W 的 1084 nm 单波长输出, 以及 4.02 W 的 1084/1093 nm 双波长激光输出. 输出功率特性如图 10 和图 11 所示.

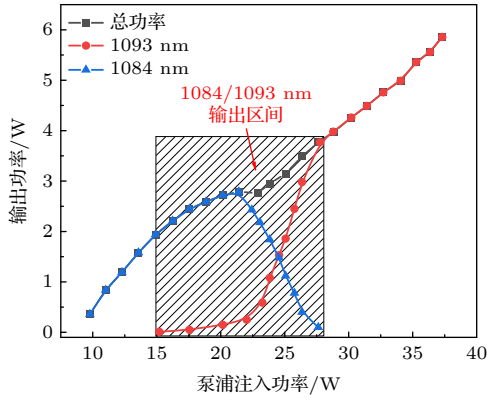


图 10 谐振腔 2 激光输出功率特性

Fig. 10. Resonator cavity 2 laser output power characteristics.

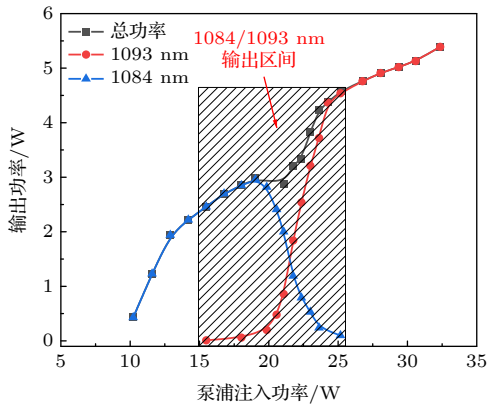


图 11 谐振腔 3 激光输出功率特性

Fig. 11. Resonator cavity 3 laser output power characteristics.

如图 11 所示, 在更改输出镜曲率后, 泵浦注入功率为 15 W 时, 1093 nm 激光开始起振, 1084/1093 nm 输出区间并没有发生明显迁移.

使用 Pyrocam III 型焦热电阵列相机测量最高输出功率情况下 1084 和 1093 nm 激光在不同位置的光斑. 在激光输出端放置一聚焦透镜 (焦距 $f = 400$ mm), 利用刀口法测量聚焦后的激光光斑, 根据高斯光束传播方程, 拟合得到激光远场发散角和束腰半径, 如图 12 所示, 激光输出模式类似于基模 (TEM_{00}) 的分布, 计算得出 1084 nm 的光束质量因子在 X, Y 方向上分别为 $M_X^2 = 1.70$ 和 $M_Y^2 = 1.81$. 1093 nm 的光束质量因子在 X, Y 方向上分别为 $M_X^2 = 1.82$ 和 $M_Y^2 = 1.94$.

结合理论分析及三种谐振腔的激光输出特性

曲线可以得到, 在泵浦注入功率一定时, 通过调节谐振腔腔型结构可以调控正交偏振上波长的输出方式, 实现 1084 /1093 nm 单波长激光交替输出和正交偏振双波长激光同步输出.

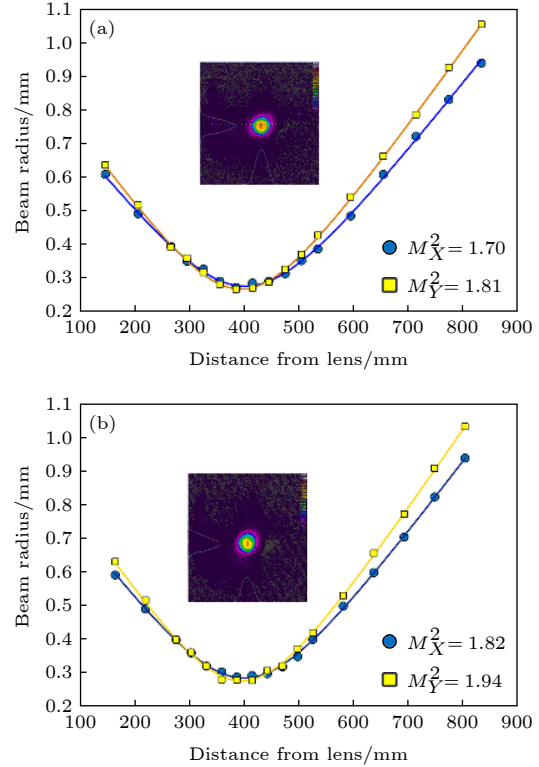


图 12 1084 nm 和 1093 nm 光斑及拟合得到的光束质量 (a) 1084 nm; (b) 1093 nm

Fig. 12. 1084 nm and 1093 nm spots and the beam quality obtained by fitting: (a) 1084 nm; (b) 1093 nm.

5 结论

本文从 Nd:MgO:LiNbO₃ 晶体的偏振荧光谱出发, 模拟分析了 1084 与 1093 nm 的双波长激光振荡原因, 建立了晶体热透镜焦距与受激发射截面比之间的关系, 推导出了 1084 及 1093 nm 双波长共振区间, 并在此基础上, 设计了不同的腔型结构谐振腔. 分别实现了 6.02 W 的 1093 nm 和 3.02 W 的 1084 nm 单波长激光, 以及 4.58 W 的 1084/1093 nm 的双波长激光输出, X, Y 方向上的光束质量分别为 $M_X^2 = 1.70$ 和 $M_Y^2 = 1.81$. 通过改变谐振腔腔型结构实现了基于 Nd³⁺掺杂 MgO:LiNbO₃ 的 1084 和 1093 nm 的正交偏振双波长激光器的三种输出方式, 这一调控方式为正交偏振双波长可控输出奠定了理论和实验基础.

参考文献

- [1] Walsh B M 2010 *Laser Phys.* **20** 622
- [2] Zhang Z L, Liu Q, Nie M M, Ji E C, Gong M L 2015 *Appl. Phys. B* **20** 689
- [3] Cheng H P, Liu Y C, Huang T L, Liang H C, Chen Y F 2018 *Photonics Res.* **6** 815
- [4] Duan X M, Li L J, Shen Y J, Yao B Q, Wang Y Z 2018 *Appl. Opt.* **57** 8102
- [5] Zhang P, Tan Y D, Liu N, Wu Y, Zhang S L 2013 *Opt. Lett.* **38** 4296
- [6] Liang H C, Wu C S 2017 *Opt. Express* **26** 13697
- [7] Zhang X L, Zhang S, Wang C Y, Li L, Zhao J Q, Cui J H 2013 *Opt. Express* **21** 22699
- [8] Xu B, Wang Y, Lin Z L, Cui S W, Cheng Y J, Xu H Y, Cai Z P 2016 *Appl. Opt.* **55** 42
- [9] Liu H, Yao J Q, Zheng F H, Lu Y, Wang P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 230 (in Chinese) [刘欢, 姚建铨, 郑芳华, 路洋, 王鹏 2008 物理学报 **57** 230]
- [10] Lu Y F, Zhang J, Xia J, Liu H L 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 656
- [11] Thévenin J, Vallet M, Brumel M 2012 *Opt. Lett.* **37** 2859
- [12] Tuan P H, Tsai M C, Chen Y F 2017 *Opt. Express* **25** 29000
- [13] Tu Z H, Dai S B, Yin H, Zhu S Q 2019 *Opt. Express* **27** 32949
- [14] Qi J, Liu C, Dai C, Liu L, Wang X Z 2019 *Laser Phys.* **29** 115001
- [15] Fan M Q, Li T, Zhao S Z, Li G Q, Li D C, Yang K J, Qiao W C, Li S X 2016 *Opt. Mater.* **53** 209
- [16] Wang Y H, Yu Y J, Sun D H, Liu H, Liu H Y, Li S T, Wu C T, Jin G Y 2019 *Opt. Laser Technol.* **119** 105570
- [17] Cordova-Plaza A, Fan T Y, Digonnet M J F, Byer R L, Shaw H J 1988 *Opt. Lett.* **13** 209
- [18] Burlot R, Moncorgé R, Manaa H, Boulon G, Guyot Y, Garcia Solé J, Cochet-Muchy D 1996 *Opt. Mater.* **6** 313
- [19] De Almeida José M M M, Leite António M P P, Amin J 2000 *Proc. SPIE* **3942** 232
- [20] Cox L J 1977 *Opt. Acta Int. J. Opt.* **24** 995
- [21] He G S, Liu F L, Zhu D Q 1978 *Chin. J. Lasers* **5** 6 (in Chinese) [赫光生, 刘凤兰, 朱大庆 1978 激光 **5** 6]

Regulation of orthogonally polarized dual-wavelength continuous wave laser based on double-end pumped Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃*

Liu Hong-Zhi Wang Yu-Heng Zheng Hao Zhao Yun-Feng
Yu Yong-Ji[†] Jin Guang-Yong

(*Jilin Provincial Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(Received 8 March 2021; revised manuscript received 5 April 2021)

Abstract

In this paper, an orthogonally polarized dual-wavelength laser based on dual-end pumped Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ is reported. Besides, the output wavelength of the orthogonally polarized dual-wavelength is regulated. According to the crystal character, the polarized fluorescence spectrum of the crystal is chosen as the starting point. The oscillation mechanism of the dual-wavelength Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ laser at 1084 nm and 1093 nm is analyzed theoretically. The relationship between the focal length of the crystal thermal lens and the stimulated emission cross-sectional ratio is established, and the effects of different temperatures on the output of single-wavelength Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ laser and on the output of dual-wavelength Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ laser are analyzed. In addition, The single-wavelength output region of 1084 nm and 1093 nm are derived respectively, and the mixed dual-wavelength working area at 1084 nm and 1093 nm are also given. The influences of different resonator parameters on the output dual-wavelength Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ laser are analyzed. It is worth mentioning that a method of adjusting the output of dual-wavelength laser by changing the resonant cavity structure is given. In the experiment, *a*-cut Nd:MgO:LiNbO₃ crystal is double-end pumped by an semiconductor laser, of which the output wavelength is 813 nm. The output law of the two wavelengths of 1084 nm and 1093 nm is summarized. The output wavelength is regulated. When the laser cavity is not inserted by other optical elements, the maximum output power of 4.58 W at 1084 nm/1093 nm dual-wavelength laser under the pump power is 28 W and the pure single-wavelength laser maximum output power of 3.02 W at 1084 nm and 6.02 W at 1093 nm are obtained. The beam quality factor in the *X*- and *Y*-direction are $M_X^2 = 1.70$ and $M_Y^2 = 1.81$, respectively. The experimental results are in agreement with the theoretical analysis results. According to the change of the resonator parameters, the 1084 nm and 1093 nm pure single-wavelength laser alternate output and orthogonal polarization dual-wavelength laser synchronous output are achieved based on the Nd³⁺ doped MgO:LiNbO₃ laser, thus establishing a theoretical and experimental foundation for the controllable output and application of orthogonal polarization dual-wavelength. It greatly expand the application range of dual-wavelength laser which can control the orthogonal polarization of 1084/1093 nm.

Keywords: dual-wavelength of 1084 nm and 1093 nm, Nd:MgO:LiNbO₃, orthogonal polarization, regulating wavelength

PACS: 42.25.-p, 42.25.Ja, 07.05.Dz

DOI: 10.7498/aps.70.20210449

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11974060, U20A20214) and the Young and Middle-aged Scientific and Technological Innovation Leaders and Team Project of Jilin Provincial Department of Science and Technology, China (Grant No. 20190101004JH).

† Corresponding author. E-mail: yyjcust@163.com