

无热退偏损耗 Nd : YAG 环形腔单纵模激光器

杨晓冬, 朱伟玲, 侯新华

(广东石油化工学院理学院, 广东 茂名 525000)

摘 要:在 Nd : YAG 侧面泵浦四镜环形腔单纵模激光器内, 采用薄膜偏振片反射光束作为输出光束, 以消除环形腔内热退偏损耗, 提高输出功率及效率。实验表明, 该 Nd : YAG 环形腔可单向运转并输出单纵模激光, 环形腔激光器内无热退偏损耗。在驱动电流为 21 A 时, 环形腔激光器输出 5.1 W 1064 nm 单纵模激光, 输出激光线宽为 200 MHz, 输出光束为线偏振光。通过采用端面泵浦结构, 以及采用对 p 偏振光反射率与泵浦功率相匹配的薄膜偏振片, 激光器单纵模输出功率及效率可望进一步提高。

关键词:退偏损耗; Nd : YAG; 环形腔; 单纵模

中图分类号: O436; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.007

Nd : YAG single-frequency ring laser without thermal-depolarization loss

YANG Xiao-dong, ZHU Wei-ling, HOU Xin-hua

(School of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: To eliminate depolarization loss in the side-pumped Nd : YAG ring resonator single-longitudinal-mode laser, the laser beam reflected by the thin-film-polarizer was used as output of the ring resonator. The experiments show that the ring resonator unidirectional operate and deliver single longitudinal-mode laser beam. There is not depolarization loss in this ring resonator. Under a drive currents of 21 A, 5.1 W 1064 nm single-longitudinal-mode laser beam with a line-width of about 200 MHz was obtained from this ring resonator. The polarization state from the ring resonator is line-polarized light. The output power and the efficiency of the ring resonator can be further increased by use of the end-pumped geometry and the thin-film polarizer with optimum-reflectivity for p-polarized light in the ring resonator.

Keywords: depolarization loss; Nd : YAG; ring resonator; single-longitudinal-mode

1 引 言

单纵模激光器具有线宽窄、单色性好以及输出功率稳定等特性。半导体激光泵浦的单纵模固体激光同时又具有体积小、寿命长、效率高以及光束质量好等显著优势, 其在雷达、光谱学、计量学及引力波探测等领域有非常广泛的用途^[1-4]。在诸多单纵模激光技术中, 环形腔单纵模激光器是获得高功率单纵模激光输出的有效的技术路线, 而 Nd : YVO₄ 晶

体是目前高功率环形腔单纵模激光器最为常用的激光晶体。由于 Nd : YVO₄ 晶体发射线偏振光, 可避免晶体热致双折射效应在腔内所引起的热退偏损耗, 从而获得较高的单纵模激光输出。2018 年, 山西大学卢华东教授研究组使用单片 Nd : YVO₄ 晶体, 采用端面泵浦结构, 获得 53 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出, 对应光光转换效率 44.5 %^[4]; 同年卢华东教授研究小组在谐振腔内使用两片端面泵

作者简介: 杨晓冬 (1968 -), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光技术研究。E-mail: xjyxd@163.com

收稿日期: 2019-12-04; **修订日期:** 2019-12-26

浦 Nd:YVO₄ 晶体,同时在环形腔内加入 4f 像传递系统以增大激光晶体内的基模光斑面积,同时避免由于热焦距太小使谐振腔进入非稳区,最大获得 101 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出^[5]。根据文献调研,该输出功率为目前最大单纵模激光输出。但由于在该激光谐振腔内使用 4f 像传递装置,也造成装置稳定性差,激光器调节困难。

与 Nd:YVO₄ 晶体相比较,Nd:YAG 晶体热传导系数是 Nd:YVO₄ 晶体的两倍多,是目前使用最为广泛的优良激光晶体。但由于在高功率泵浦下,Nd:YAG 晶体内存在较为强烈的热致双折射效应,导致 Nd:YAG 环形腔单纵模谐振激光器内存在较为强烈的热退偏损耗,从而严重限制 Nd:YAG 环形腔单纵模功率输出。2001 年,瑞士伯尔尼大学研究人员利用端面泵浦 Nd:YAG 环形腔单纵模激光获得 4.5 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出,对应的光光转换效率约为 19 %^[6];1996 年,英国南安普顿大学研究者使用端面泵浦 Nd:YAG 晶体,从环形腔中获得 5.4 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出^[7];2010 年,北京工业大学赵伟芳等人使用端面泵浦 Nd:YAG 环形腔单纵模激光器,在泵浦功率为 7 W 时,获得 2 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出^[8];2011 年,中国科学院理化研究所徐祖彦院士研究组,利用侧面泵浦 Nd:YAG 环形腔结构获得 31.9 W 连续波 1064 nm 单纵模激光输出,但其光学转化效率不到 10 %^[9]。

因此降低并消除 Nd:YAG 环形腔内的热退偏损耗,对于充分发挥 Nd:YAG 晶体热传导率高以及应力裂纹极限大的优势,实现更高功率单纵模激光输出具有一定的意义。

本文探索将腔内偏振器件—薄膜偏振片的反射光束作为 Nd:YAG 环形腔输出光束,以消除环形腔单纵模激光器内的热退偏损耗,并提升其功率及效率。

2 实验装置

图 1 为 Nd:YAG 四镜环形腔实验装置示意图。两激光二极管(Ld)侧面泵浦模块被放置环形腔内,直径为 2 mm 的 Nd:YAG 激光棒被固定在侧泵模块内,Nd:YAG 棒侧面通有冷却水,激光棒两端面镀有 1064 nm 增透膜;3 根 808 nm Ld 对称环绕 Nd:YAG 棒,在最大 24 A 驱动电流下,单个侧泵模

块 808 nm 最大泵浦功率为 60 W;腔镜 M₁、M₂、M₃、M₄ 为 45°,1064 nm 全反射镜,腔内薄膜偏振片(Thin-film-polarizer)对 s 偏振光反射率为 99.5 %,对 p 偏振光反射率约 2 % ~ 3 %。腔内法拉第磁光旋光器(Faraday rotator)、二分之一波片与薄膜偏振片构成腔内光学单向器,强迫腔内 p 偏振光沿箭头所示方向单向运转,以消除晶体空间烧空,在各向同性晶体纵模模式竞争的作用下,实现单纵模激光运转。

当腔内激光单向运转时,1064 nm 单纵模激光束以布儒斯特角入射到薄膜偏振片,晶体热致双折射效应所产生的 s 偏振光被完全反射,同时约有 2 % ~ 3 % 的 P 偏振光也被薄膜偏振片反射,这些反射光束即为环形腔输出光束。由于本环形腔输出光束为薄膜偏振片所反射 s 偏振光与 p 偏振光迭加,光束偏振态应为椭圆偏振光。腔内所放置法布里珀罗标准具为一片两面未镀膜的石英片,其作用为避免纵模跳模。整个环形腔长度约为 0.8 m,根据高斯光束传输矩阵计算可得,晶体基模光斑直径约为 1 mm。腔内光阑直径约为 0.8 mm,其作用为抑制腔内高阶模;两 LD 侧泵模块间放置 90°石英旋光片,以补偿晶体内的光束热致双折射效应。

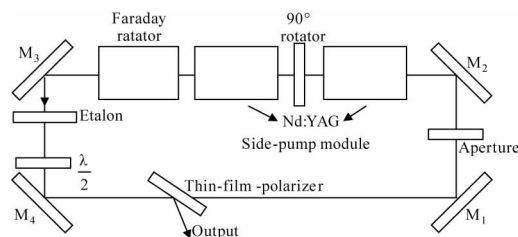


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of experiment

与使用专门输出耦合镜 Nd:YAG 环形腔单纵模激光器相比较,由于该环形腔输出光束为薄膜偏振片反射光束,热致双折射效应在晶体中所激发的 s 偏振光为环形腔输出光束,所以腔内热退偏损耗可被完全避免;同时,由于薄膜偏振片对 p 偏振光反射率为 2 % ~ 3 %,所以在单独使用输出耦合腔镜的环形腔内,存在 2 % ~ 3 % 的 p 偏振光反射损耗,而在本环形腔内该损耗也可以完全消除。

3 实验结果与讨论

将图 1 所示谐振腔中二分之一波片快轴相对腔内 p 偏振光顺时针旋转 22.5°,使腔内光束沿箭头

方向单向运转,测量薄膜偏振片反射输出功率随着驱动电流变化曲线,测量结果如图2所示。由图2可得,当侧泵模块驱动电流为21 A时,环形腔最大输出功率为5.1 W。图3为在驱动电流为20 A时,利用自由光谱区为3.75 GHz,精细常数为100的共焦球面扫描干涉仪对薄膜偏振片反射光束扫描所得结果,从图3可确定,该Nd:YAG:环形腔单纵模运转,其单纵模激光线宽约为200 MHz。在整个测量过程中,激光纵模模式稳定。

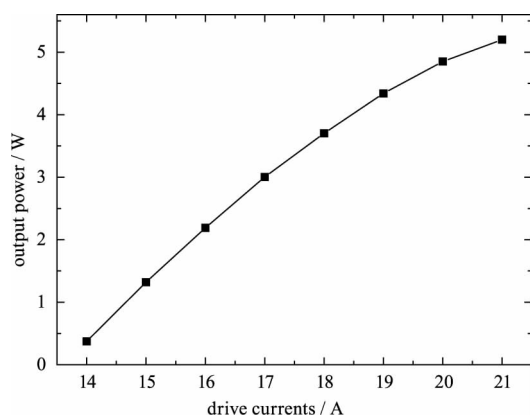


图2 Nd:YAG 环形腔输出功率随驱动电流变化曲线

Fig. 2 Output power of the Nd:YAG ring resonator varying with drive currents

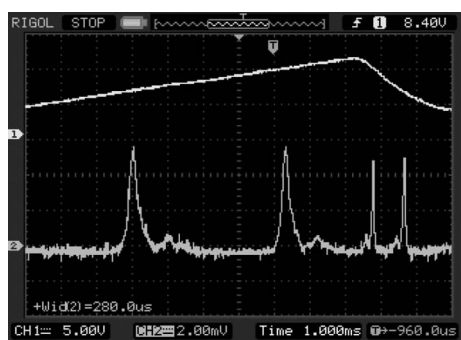


图3 共焦球面扫描干涉仪扫描结果

Fig. 3 Scanning trace of confocal spherical scanning interferometer

为测量薄膜偏振片反射输出光束偏振特性,在激光功率计前放置格兰泰勒棱镜。将棱镜透偏初始方向设置为与腔内p偏振光方向一致,将格兰泰勒棱镜旋转一周,在驱动电流为20 A条件下,测量棱镜透过功率随透偏轴方向变化,测量结果如图4所示。从图4可得,透射功率最小值约为19 mW,最大透射功率约为3.9 W,输出光束近似为线偏振光,其光矢量振动方向与腔内p偏振光光矢量振动方向夹角为106°。

根据偏振光合成理论,反射输出光束是由薄膜

偏振片所反射p偏振光和s偏振光的迭加,反射输出光束应为椭圆偏振光。但由于本实验中,薄膜偏振片对于p偏振光反射率仅为2%~3%,反射光束中p偏振光功率很低,而薄膜偏振片对s偏振光几乎为全反射,反射光束中s偏振光强度远大于p偏振光强度,所以椭圆偏振光退化为线偏振光,测量结果也说明这一点。根据图4所示测量结果,当棱镜透偏方向与腔内p偏振光夹角为0°时,棱镜透射p偏振光,透射功率约为0.18 W,功率很低;而当棱镜透偏方向与腔内p偏振光夹角为90°时,棱镜透射s偏振光,透射功率约为4 W,薄膜偏振片所反射s偏振光功率约为p偏振光功率20倍,所以s与p偏振光迭加所合成椭圆偏振光短轴方向功率值很低,椭圆偏振光退化为线偏振光。

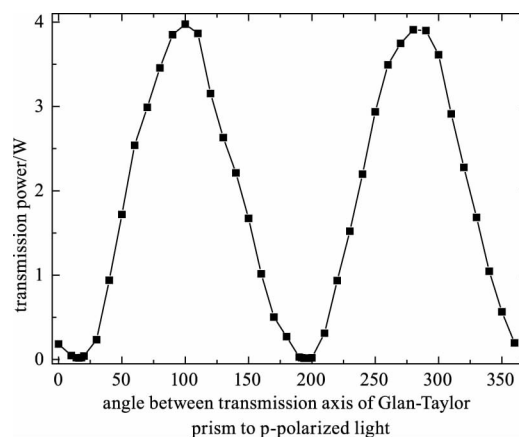


图4 格兰泰勒棱镜透射功率

Fig. 4 Power passing through the Glan-Taylor prism

从实验结果来看,本实验输出功率依然不高,其原因可归结与以下两方面:侧面泵浦效率较低。在模块中,808 nm 均匀泵浦充满直径为2 mm的Nd:YAG激光棒横截面,而激光棒内基模光斑直径约为1 mm,泵浦光与腔模重叠效率约为25%,仅有约25%的泵浦能量能被利用;薄膜偏振片对p偏振光的反射率约为2%~3%,与泵浦功率不匹配,可能太低,并非最佳输出值。所以,采用效率更高的端面泵浦结构,同时采用对p偏振光反射率与泵浦功率相匹配的薄膜偏振片,Nd:YAG 环形腔单纵模输出功率及效率可获得显著提高。

4 结论

实验表明,采用薄膜偏振片反射光束作为Nd:YAG环形腔单纵模激光器输出光束,可有效避免腔内热退偏损耗以及薄膜偏振片对p偏振光

2%~3% 的反射损耗,并获得单纵模激光输出。通过对本环形腔泵浦结构、及薄膜偏振片反射率的优化,有望获得结构更为简单,输出功率更高的 Nd:YAG 环形腔激光器。

参考文献:

- [1] Xu Yunpeng, Li Zhitong, Wu Ting, et al. Single-frequency stability of single-frequency self-Q-switched solid-state lasers based on gain gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9):0901006 (in Chinese)
许云鹏, 李之通, 吴婷等. 基于增益光栅的单纵模自调 Q 激光器单纵模稳定性研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(9):0901006.
- [2] Gao Yinghao, Li Yuanji, Feng Jinxia, et al. Low noise continuous-wave single-frequency dual-wavelength laser operating at 532 nm and 1.06 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4):0401005 (in Chinese)
高英豪, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 低噪声连续单纵模 532 nm/1.06 μm 双波长激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(4):0401005.
- [3] Guo Yongrui, Lu Huadong, Su Jing, et al. Investigation of hundred-watt all-solid-state continuous-wave single-frequency 1064 nm laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6):0601007 (in Chinese)
郭永瑞, 卢华东, 苏静, 等. 百瓦级全固态连续单纵模 1064 nm 激光器的研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(6):0601007.
- [4] Yongrui Guo, Huadong Lu, Minzhi Xu, et al. Investigation about the influence of longitudinal-mode structure of the laser on the relative intensity noise properties [J]. Opt. Express, 2018, (26):21108–21118.
- [5] Yongrui Guo, Minzhi Xu, Weina Peng, et al. Realization of a 101W single-frequency continuous wave all-solid-state 1064nm laser by means of mode self-reproduction [J]. Opt. Lett., 2018, (43):6017–6020.
- [6] Trobs M, Graf T h. Compact, dual-configuration, single-frequency, Q-switched Nd:YAG laser [J]. Opt. Commun., 2001, 189(15):385–388.
- [7] IMartin K, Clarkson W A, CHanna D. High-power single-frequency operation, at 1064 nm and 1061.4 nm of a Nd:YAG ring laser end-pumped [J]. Opt. Commun., 1997, 135(1):89–92.
- [8] Zhao Weifang, Hou Wei, Li Gang, et al. Single-frequency Nd:YAG ring laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11):2810–2812 (in Chinese)
赵伟芳, 侯玮, 李港, 等. Nd:YAG 环形腔单频激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37(11):2810–2812.
- [9] XIE Shiyong, BO Yong, XU Jialin, et al. A high power single frequency diode side-pumped Nd:YAG ring laser [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(8):084207.