

1 532 nm 全光纤 Er/Yb 共掺杂激光器

杨帆¹, 孟晓彤¹, 李毅¹, 范佳玮², 戴通宇², 鞠有伦^{2*}

(1. 西安现代控制技术研究, 陕西 西安 710065;

2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 近年来, 相干探测激光雷达是测量远距离低空风切变的有效手段, 1.6 μm 波段固体激光器以其人眼安全、探测器件成熟等优势成为相干雷达主要光源。其增益介质 Er:YAG 晶体在 1532 nm 波段有较强的吸收峰, 但吸收谱较窄, 因此通过使用 1532 nm 光纤激光器进行谐振泵浦可以有效提高晶体输出效率。为此, 文中以 Er/Yb 双包层光纤为增益介质, 1532 nm 光纤光栅为反射腔镜, 976 nm 半导体激光器为泵浦源, 实现了全光纤化 1532 nm 激光输出。输出激光最大功率 73.44 W, 波长可调谐范围为 1531.35~1532.14 nm, 波长谱宽为 0.06 nm, x 和 y 方向的光束质量 M^2 分别为 1.38 和 1.26, 是 1.6 μm 固体激光器的理想泵浦源。并采用此激光器泵浦 Er:YAG 非平面环形腔获得 1.3 W 单频激光输出, 斜率效率为 31.76%。

关键词: 1532 nm 光纤激光器; Er/Yb 共掺杂; 双包层光纤; 波长可调谐

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220251

1 532 nm all-fiber Er/Yb co-doped laser

Yang Fan¹, Meng Xiaotong¹, Li Yi¹, Fan Jiawei², Dai Tongyu², Ju Youlun^{2*}

(1. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: In recent years, coherent detection lidar is an effective means to measure long-range low-altitude wind shear. 1.6 μm solid-state lasers have become the main light source for coherent radar with the advantages of human eye safety and mature detector devices. Its gain medium Er:YAG crystal had a strong absorption peak in the 1532 nm band, but the absorption spectrum was narrow, so the crystal output efficiency can be effectively improved by resonant pumping using a 1532 nm fiber laser. To this end, an all-fiber 1532 nm laser output was achieved with an Er/Yb double-clad fiber as the gain medium, a 1532 nm fiber grating as the reflective cavity mirror and a 976 nm semiconductor laser as the pumping source. The output laser had a maximum power of 73.44 W, a tunable wavelength range of 1531.35-1532.14 nm, a wavelength spectral width of 0.06 nm, and the beam quality M^2 of 1.38 and 1.26 in x and y direction, which was an ideal pumping source for 1.6 μm solid-state lasers. The laser was used to pump Er: YAG nonplanar ring cavity to obtain 1.3 W single frequency laser output, and the slope efficiency was 31.76%.

Key words: 1532 nm fiber laser; Er/Yb co-doped; double-clad fiber; tunable wavelength

收稿日期:2022-04-10; 修订日期:2022-05-25

基金项目:国家重点研发计划(2018 YFA0306200);国家自然科学基金(11804149);陕西省重点研发计划项目(2019 GY-073)

作者简介:杨帆,男,高级工程师,硕士,主要研究方向为光纤数据链技术。

通讯作者:鞠有伦,男,教授,博士,主要研究方向为中红外固体激光技术。

0 引言

随着全球气候不断恶化,准确测量三维风场信息对于机场气流检测、飞机航线规划等领域具有重要的研究意义。近年来,相干探测激光雷达以其探测精度高、效率高、非接触测量、对光源能量需求较低等优点被广泛应用于大气风场探测,在精准天气预报、民航轮船航线选择、航天飞机起降、导弹火箭发射等领域发挥着重要作用^[1-5]。近年来,波长 1.6 μm 附近的人眼安全波段固体激光测风雷达光源成为了研究热点^[6-8],其探测器件成熟,具有较高的大气透过率且具有人眼安全特性,可以更好地满足应用需求。

1.6 μm 固体激光器大都以掺 Er³⁺的激光晶体作为增益介质^[9-12]。Er:YAG 晶体具有磁致旋光特性,是 1.6 μm 激光的理想增益介质。Er:YAG 晶体吸收谱的吸收峰值位于 1532 nm 附近,目前用来泵浦 Er:YAG 晶体的泵浦源以 1532 nm 半导体激光器^[13]和空间耦合光纤激光器^[14-15]为主。半导体激光器运转稳定可靠性较强,但光束质量较差 ($M^2 > 100$) 且线宽较宽 ($FWHM > 1$ nm),严重影响泵浦效率。空间耦合光纤激光器有效改善了光束质量,进一步压窄线宽 ($FWHM \sim 0.2$ nm),但是其光路复杂,稳定性较差,限制了实际应用。相比于这两种泵浦源,全光纤化的 1532 nm 光纤激光器具有输出线宽窄、结构紧凑、可靠性高、使用寿命长等诸多优点,同时全光纤化结构避免了空间耦合导致的器件不稳定性,大大简化实验装置,是 Er:YAG 晶体的理想泵浦源。2017 年,中国科学技术研究院采用 1532 nm 半导体激光器^[16]泵浦 Er:YAG 陶瓷非平面环形腔 (NPRO),获得 1.56 W 单频激光输出,在 x 和 y 方向光束质量分别为 1.21 和 1.42;2018 年,北京理工大学采用 1532 nm 光纤激光器泵浦 Er:YAG 陶瓷非平面环形腔 (NPRO),获得 16.1 W 单频激光输出^[17],在 x 和 y 方向光束质量分别为 1.20 和 1.27,有效提高输出效率并改善了输出激光光束质量。

文中将采用 976 nm 半导体激光器 (LD) 泵浦 Er/Yb 共掺杂光纤,实现全光纤化的 1532 nm 激光输出。并以此激光器泵浦 Er:YAG 非平面环形腔 (NPRO) 实现单频窄线宽激光输出。

1 实验原理与实验装置

1.1 实验原理

Er:YAG 晶体在 1.5 μm 波段的吸收峰分别位于 1470 nm 附近和 1532 nm 附近^[18-20],相比于 1470 nm 波段,Er:YAG 晶体对 1532 nm 波段光有更强的吸收,同时量子效率更高,所以 1532 nm 波段激光是 Er:YAG 固体激光器的理想泵浦源。图 1 所示为 Er:YAG 晶体在 1532 nm 波段的吸收谱,其吸收峰位于 1532.13 nm,在 1531.54~1532.99 nm 之间有较高的吸收率,但宽度较窄,仅不到 1.5 nm——这就要求 1532 nm 泵浦光有较窄的半波宽和稳定的输出波长。

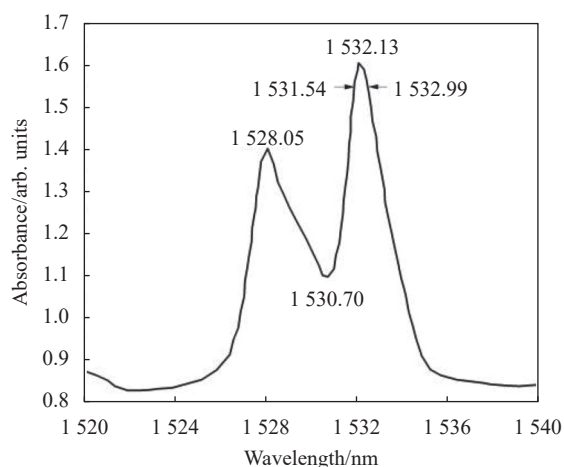


图 1 Er:YAG 增益介质吸收谱

Fig.1 Absorption spectrum of Er:YAG gain medium

根据已有报道,以体光栅为反射元件,泵浦光空间耦合的 Er/Yb 光纤激光器,输出 1532 nm 激光谱宽为 0.4 nm^[21];以光纤光栅为反射元件的全光纤激光器,具有更窄的输出谱宽和更加稳定的波长,是 Er:YAG 晶体的理想泵浦源。

目前,1.5 μm 波段的光纤激光器,均采用 Er³⁺掺杂或 Yb³⁺/Er³⁺共掺杂光纤作为增益介质,泵浦源采用 976 nm 半导体激光器。Er³⁺能级结构比较复杂,单掺杂 Er³⁺的介质对 976 nm 泵浦光的吸收效率低,并伴有大量热产生,所以在实际应用中一般用 Yb³⁺/Er³⁺共掺杂的增益介质。Yb³⁺具有简单二能级结构,对 976 nm 泵浦光的吸收为共振吸收,吸收截面大、量子效率高,作为敏化离子吸收 976 nm 泵浦光,并通过能量传递方式高效地将能量传递给 Er³⁺。该实验采用 Yb³⁺/Er³⁺

共掺杂光纤作为增益介质。图 2 所示为 Yb³⁺/Er³⁺ 的能量吸收与传递过程: 处于基态能级²F_{7/2} 上的 Yb³⁺ 吸收 976 nm 泵浦光跃迁到²F_{5/2} 能级上, 并通过能量传递将能量转移到 Er³⁺ 的⁴F_{11/2} 能级上; ⁴F_{11/2} 能级上的 Er³⁺ 无辐射弛豫跃迁至⁴F_{13/2} 能级, 最终跃迁到基态能级⁴F_{15/2} 上, 辐射出 1532 nm 的光子。

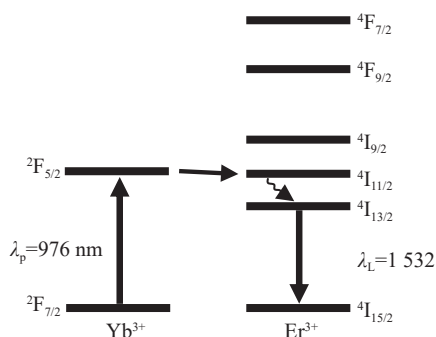


图 2 Er/Yb 共掺杂光纤的掺杂离子能级跃迁结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of dopant ion energy leap structure of Er/Yb co-doped fiber

1.2 实验装置

1532 nm 光纤激光器采用全光纤结构, 反射腔镜为高功率光纤光栅, 掺杂光纤为 Er/Yb 共掺杂光纤, 其结构图如图 3 所示。

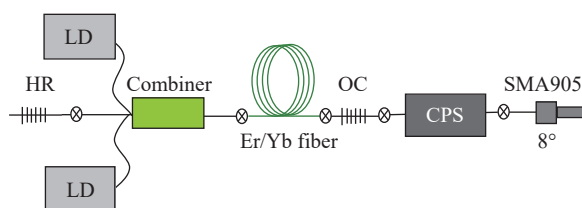


图 3 Er/Yb 共掺杂 1532 nm 光纤激光器结构图

Fig.3 Schematic diagram of 1532 nm Er/Yb fiber laser

泵浦源为两台 976 nm LD, 每台最大输出功率 100 W; 通过 (2+1)×1 型合束器 (Combiner) 合束, 976 nm 泵浦光被注入到 Er/Yb 共掺杂光纤的内包层中, 最高注入功率为 178 W; Er/Yb 共掺杂光纤为双包层光纤, 掺杂区域为纤芯, 内包层为泵浦光通光区域, 直径 300 μm, 数值孔径 0.46, 纤芯直径为 25 μm, 数值孔径 0.1。实验用掺杂光纤长度 2.80 m, 对泵浦光吸收系数约为 8.8 dB/m; 腔镜为一对高功率啁啾型布拉格光纤光栅 (CFBG), 光栅被刻在非掺杂的 25/300 μm 双包层光纤纤芯内, 高反光栅 (HR) 反射率 > 99%, 室温反射

波长标定值 1531.31 nm, 低反光栅 (OC) 反射率约为 10.1%, 反射波长标定为 1531.25 nm, 为了防止泵浦光对高反光栅造成损坏, 将高反光栅接在 (2+1)×1 型合束器合束的“+1 端”。由于 OC 端输出光中含有包层光, 这将影响 1532 nm 激光的光束质量和进一步耦合, 所以利用包层光剥离器 (CPS) 对其进行泄漏。泄漏盒利用氢氟酸对内包层进行腐蚀, 总长度为 7.2 cm。激光器最终获得的 1532 nm 激光通过 SMA905 型标准化输出头输出, 输出头光纤纤芯直径 25 μm, SMA905 头的前端被磨制成 8°斜角, 以避免反馈光影响激光器运行。

光纤激光器各个器件通过美国 Vytran 公司生产的 LFS-400 型光纤熔接机进行熔接。激光器运行过程中, 需要对 Er/Yb 掺杂光纤进行冷却, 其目的是对光纤各器件之间的熔点降温, 避免熔点过烫而烧毁激光器; 另外冷却 Er/Yb 掺杂光纤还可以提高激光器的输出功率。因此, 光纤激光器的所有器件均放于特殊设计的光纤水冷盘上, 冷却温度为 10 °C。光栅反射波长在 1531.3 nm 附近, 不在 Er:YAG 晶体高吸收率区域 (1531.54~1532.99 nm)。为了将输出波长矫正到晶体的高吸收区域, 根据光栅的温漂效应, 用半导体制冷器 (TEC) 对光栅进行加热, 可以在小范围内将光栅反射波长校正到 1532.1 nm 与晶体吸收峰精确匹配。

2 实验结果与分析

图 4 为 1532 nm 光纤激光器的输出功率。由于纤芯的模场直径大于其直径, 所以在纤芯里传输的 1532 nm 激光会全部泄漏到包层里, 经过包层光剥离器 (CPS) 被全部泄漏掉。根据图中数据计算, 不加包层光剥离器 (图中黑色曲线所示), 1532 nm 激光最大输出功率为 73.44 W, 激光器光光效率为 41.14%, 斜率效率 45.0%; 滤除包层中 1532 nm 激光 (图中红色曲线), 激光器最大输出功率为 64.35 W, 光光效率 36.05%, 斜率效率为 38.3%。

光纤光栅处于室温 22 °C 时, 激光器的输出波长为 1531.35 nm, 不在 Er:YAG 晶体的高吸收率区域 (1531.54~1532.99 nm)。实验中用高温 TEC 对高反光栅和低反光栅同时加热, 使其输出波长向长波长漂移, TEC 温度加热范围为 50~70 °C。图 5(a) 给出了光纤光栅分别在 22、50、55、60、65、70 °C 温度下的激

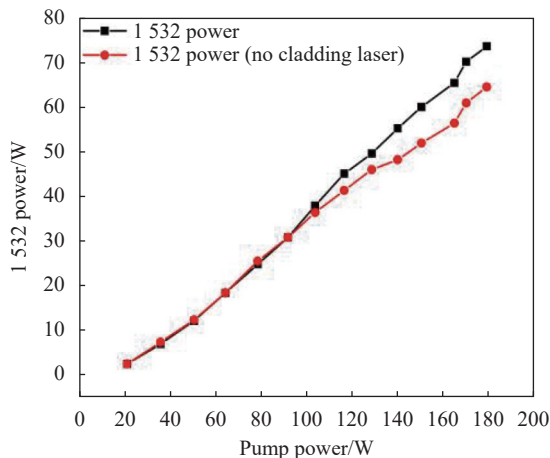


图 4 1532 nm 光纤激光器输出功率
Fig.4 Output power of 1532 nm fiber laser

光输出波长, 虚线为 Er:YAG 晶体在 1532 nm 波段的吸收谱。从图 5(a) 可以看出, 随着光栅温度升高, 输出波长逐渐向长波长方向漂移: 22 °C 时, 输出波长 1531.35 nm, 位于 Er:YAG 晶体的高吸收率区域之外; 50~70 °C 范围内, 输出波长均在高吸收率区域之内, 当光栅温度为 70 °C 时, 激光输出波长为 1532.14 nm, 恰好位于晶体对 1.5 μm 波段光的吸收峰。所以 50~70 °C 的光栅温度调节范围, 可以满足 Er:YAG 晶体对 1532 nm 光纤激光器输出激光波长的需求。对激光输出波长与光纤光栅温度数据进行线性拟合如图 5(b) 所示, 输出波长随光栅温度变化的斜率为 0.016 nm/°C。根据此数据, 可以预估出其他光栅温度下的激光输出波长。

图 6 给出了光纤光栅温度为 70 °C 时, 不同输出功率下的激光波长。从图中可以看出, 光栅温度 70 °C, 不同输出功率, 激光输出波长均稳定于 1532.12 nm 附近, 波长变换范围 1532.09 ~1532.14 nm, 即输出波长稳定性为 1532.12±0.03 nm。在此条件下, 输出激光波长的半高宽 (FWHM) 为 0.06 nm, 如图 7(a) 所示, 相比于体光栅形式 Yb/Er 光纤激光器的 0.4 nm 谱宽, 该实验将 1532 nm 激光波长半高宽精度提高了一个数量级, 充分满足了 Er:YAG 晶体对 1532 nm 泵浦光窄谱宽的要求, 同时, 文中测量了 30 min 内输出激光线宽的稳定度如图 7(b) 所示。

如图 8 所示, 实验用刀口法测量了输出激光的光束质量, 数据经拟合后得到在光纤激光器稳定工作情

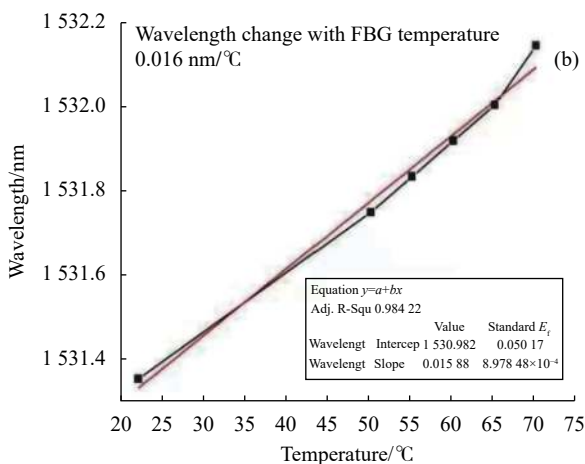
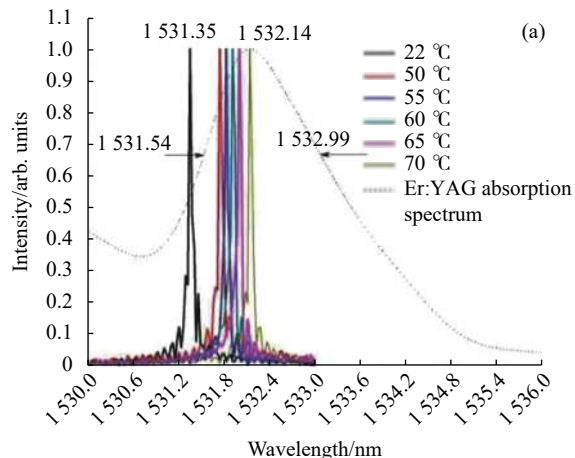


图 5 不同光纤光栅温度下的输出激光波长

Fig.5 Output wavelength at different FBG temperature

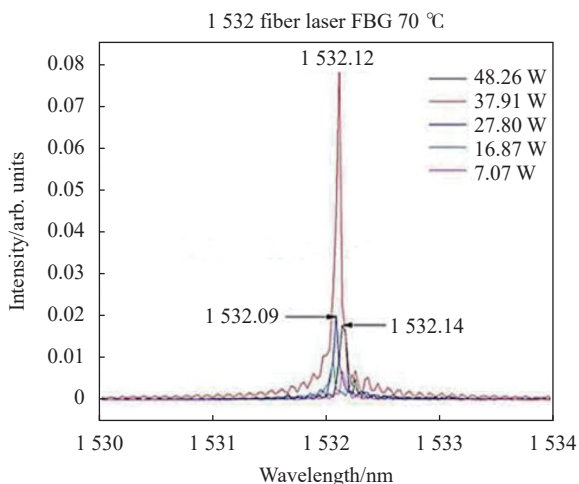


图 6 光纤光栅温度为 70 °C 时的激光器输出波长
Fig.6 Laser wavelength at FBG temperature of 70 °C

况下的 x 和 y 方向光束质量分别为 1.38 和 1.26。该光束质量可以满足厚度 < 1.5 mm, 长度 > 50 mm 板条晶体对泵浦光光束质量的需求。

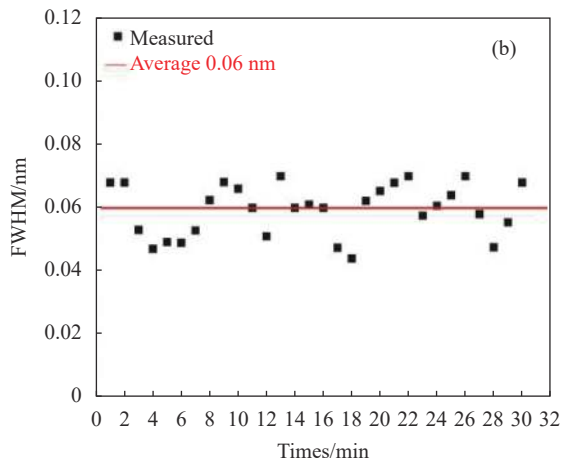
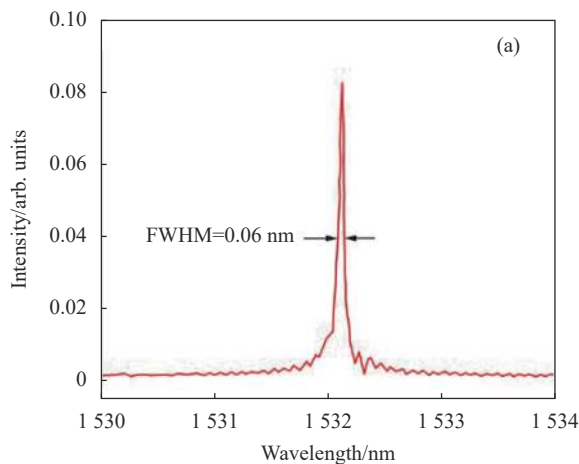


图 7 1532 nm 光纤激光器谱宽及稳定度测量

Fig.7 FWHM of 1532 nm fiber laser

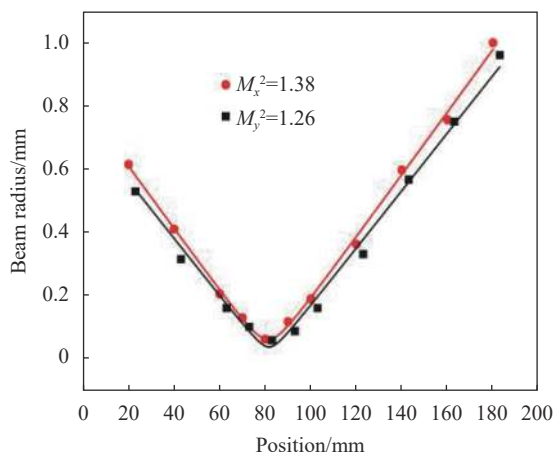


图 8 1532 nm 光纤激光器光束质量

Fig.8 M^2 of 1532 nm fiber laser

最后,文中采用此光纤激光器泵浦 Er:YAG 非平面环形腔 (NPRO) 实现单频激光输出。NPRO 尺寸为 $13\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, Er^{3+} 掺杂浓度 0.5% (见图 9), 泵浦源经透镜组聚焦到 NPRO 晶体中心, 获得最高

1.3 W 单频激光输出, 斜率效率为 31.76% (见图 10), 输出激光中心波长为 1645.16 nm (见图 11)。利用扫描法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪测试 NPRO 输出激光频

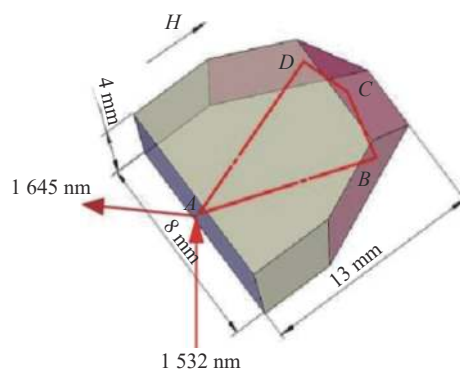


图 9 Er:YAG 非平面环形腔结构图

Fig.9 Schematic of the Er:YAG NPRO

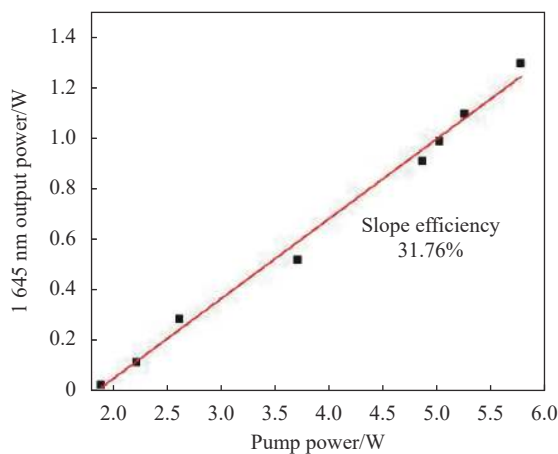


图 10 Er:YAG 非平面环形腔输出功率

Fig.10 Output power of the Er:YAG NPRO

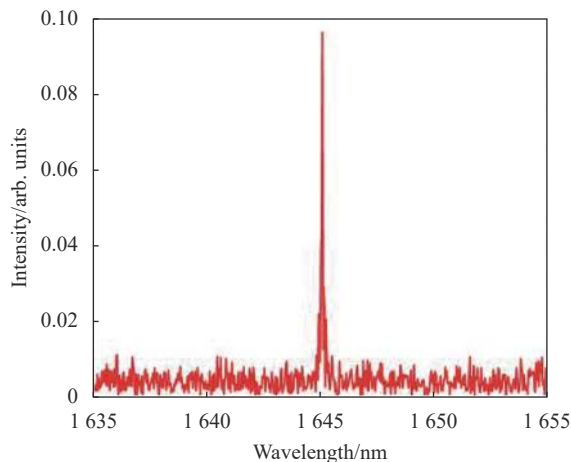


图 11 Er:YAG 非平面环形腔输出波长

Fig.11 Output wavelength of the Er:YAG NPRO

谱, F-P 干涉仪的自由光谱区为 1.5 GHz, 图 12 所示为单频激光频谱图。

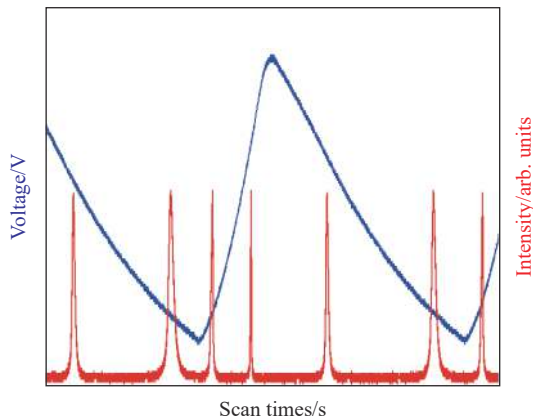


图 12 Er:YAG 非平面环形腔单频激光频谱图

Fig.12 Spectrum of the Er:YAG NPRO

3 结 论

文中采用高/低反光纤光栅作为谐振腔, Er/Yb 共掺杂光纤作为增益介质, 976 nm 半导体激光器作为泵浦源, 组成了全光纤化的 1532 nm 光纤激光器, 实现了 1532 nm 激光稳定输出。Er/Yb 共掺杂光纤激光器最大激光输出功率为 73.44 W, 斜率效率 45.0%, 光光效率 41.14%, 输出波长通过改变光纤光栅温度进行调谐, 调谐范围 1531.35~1532.14 nm, 波长谱宽 0.06 nm, x 和 y 方向的光束质量分别为 1.38 和 1.26, 激光器运行稳定, 是 Er:YAG 激光器晶体的理想泵浦源, 为 1.6 μm 测风雷达光源研究提供了有力的支撑, 并利用此激光器泵浦 Er:YAG 非平面环形腔获得最高 1.3 W 单频激光输出。

致谢 感谢哈尔滨工业大学张振国博士对本论文中光纤激光器实验部分以及与之对应的数据分析部分的贡献。

参考文献:

[1] Zheng Y, Gao C Q, Wang R, et al. Single frequency 1645 nm Er: YAG nonplanar ring oscillator resonantly pumped by a 1470 nm laser diode [J]. *Optics letters*, 2013, 38(5): 784-786.
 [2] Zhou A R, Han Y L, Sun D S, et al. Analysis and test of wind measurement performance of high optical efficiency coherent Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019,

48(11): 1105006. (in Chinese)
 [3] Sakimura T, Hirotsawa K, Watanabe Y, et al. 1.55- μm high-peak, high- average-power laser amplifier using an Er, Yb: glass planar waveguide for wind sensing coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24175.
 [4] Mizutani K, Ishii S, Aoki M, et al. 2 μm Doppler wind lidar with a Tm: fiber-laser-pumped Ho: YLF laser [J]. *Optics Letter*, 2018, 43(2): 202-205.
 [5] Wei T W, Xia H Y. Simultaneous detection of wind and rain basing on coherent Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200406. (in Chinese)
 [6] Wang K X, Gao C Q, Lin Z F, et al. 1645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er: YAG laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14694-14704.
 [7] Gatt P, Barr K, Margulis M. WindTracer evolution and recent measurement results[C]//Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, 2015.
 [8] Ju Y L, Zhang Z G. Large energy 1.6 μm coherent laser wind measurement radar light source [J]. *Modern Radar*, 2020, 42(7): 33-36. (in Chinese)
 [9] Tang P H, Liu J, Huang B, et al. Stable and wavelength-locked Q- switched narrow-linewidth Er: YAG laser at 1645 nm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11037-11042.
 [10] Li S, Wang Q, Song R, et al. Laser diode pumped high-energy single- frequency Er: YAG laser with hundreds of nanoseconds pulse duration [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031401.
 [11] Huang S, Wang Q, Zhang M, et al. A 3-kHz Er: YAG single-frequency laser with a ‘triple-reflection’ configuration on a piezoelectric actuator [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(8): 084204.
 [12] Chen C Y, Wang Q, Huang S, et al. Single-frequency Q- switched Er: YAG laser with high frequency and energy stability via the Pound- Drever-Hall locking method [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3745-3748.
 [13] Yao B Q, Yu X, Liu X Y, et al. Room temperature single longitudinal mode laser output at 1645 nm from a laser-diode pumped Er: YAG nonplanar ring oscillator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8916-8921.
 [14] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188 W free-running and >100 W tunable output power [J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 4916-4921.
 [15] Kim J W, Jelger P, Sahu J K, et al. High-power and wavelength-tunable operation of an Er, Yb fiber laser using a volume Bragg

- grating [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1204-1206.
- [16] Wang L, Guo N, Wang S J, et al. Resonantly pumped Er: YAG ceramic single-frequency laser//Conference on Lasers and Electro Optics/Pacific Rim [J]. *Optical Society of America*, 2017: s1928.
- [17] Zhang M, Gao C Q, Gao M W, et al. 16 W single-frequency laser output from an Er: YAG ceramic nonplanar ring oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(12): 125803.
- [18] Garbuzov D, Kudryashov I, Dubinskii M. 110 W (0.9 J) pulsed power from resonantly diode-laser-pumped 1.6- μm Er: YAG laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(12): 121101-121103.
- [19] Dubinskii M, Gabrielyan N T, Newburgh G A. Resonantly diode-pumped Er: YAG cryo-laser at 1618 nm[C]//Advanced Solid-State Photonics, 2007.
- [20] Kudryashov I, Garbuzov D, Dubinskii M. Volume bragg grating improves characteristics of resonantly diode pumped Er: YAG 1.65 mm DPSSL[C]//Solid State Lasers, 2007: 183-189.
- [21] Kim J W, Shen D Y, Sahu J K, et al. Fiber-laser-pumped Er: YAG lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 361-371.