

引文格式: 张利明, 张昆, 张雪霞, 等. 2.5 kW线偏振窄线宽全光纤激光器[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 92–95, 117.

ZHANG Liming, ZHANG Kun, ZHANG Xuexia, et al. 2.5 kW linearly polarized narrow linewidth all-fiber laser[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 92–95, 117.

2.5 kW线偏振窄线宽全光纤激光器

张利明, 张 昆, 张雪霞, 熊文豪, 孙儒峰, 龙润泽, 高 平, 邓 宇, 赵 鸿, 周寿桓

(中国电子科技集团公司第十一研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

[摘要] 高功率线偏振窄线宽光纤激光器在功率光谱合成、相干探测等领域具有广泛的应用前景。在高功率线偏振窄线宽光纤激光器中, 模式不稳定 (Transverse mode instability, TMI) 效应是限制其功率提升的主要因素之一。本文分析了 TMI 效应对其输出功率的限制机制, 提出基于多波长泵浦技术的 TMI 抑制方案。试验采用多波长泵浦技术, 以输出功率 100 mW 的单频激光器为种子源, 通过相位调制器将种子源线宽展宽至 23 GHz, 经三级放大后, 最终实现了功率 2.54 kW、线宽 23 GHz、中心波长 1064 nm 的线偏振激光输出, 消光比达 98%, 光束质量 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$ 。进一步分析了泵浦波长对 TMI 效应的影响: 由于光纤纤芯直径较小 (20 μm), 增益光纤对泵浦光的吸收系数较高 (1.8 dB/m@976 nm), 导致纤芯温度升高; 加之泵浦光子量子亏损引入的热量, 使得纤芯折射率发生变化, 导致激光器在较低功率下发生 TMI 效应。当泵浦波长向长波偏移时, 泵浦光的量子亏损降低, 同时泵浦吸收系数也减小, 光纤整体及单位长度上的热分布均显著降低, 从而提高了 TMI 阈值, 有效提升了线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率。

关键词: 光纤激光器; 高功率; 线偏振; 窄线宽; 模式不稳定

中图分类号: TN24

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.092

2.5 kW Linearly Polarized Narrow Linewidth All-Fiber Laser

ZHANG Liming, ZHANG Kun, ZHANG Xuexia, XIONG Wenhao, SUN Rufeng, LONG Runze, GAO Ping, DENG Yu, ZHAO Hong, ZHOU Shouhuan

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

[ABSTRACT] High-power linearly polarized narrow linewidth fiber lasers hold broad application prospects in wavelength beam combining, coherent detection, and other fields. In such lasers, transverse mode instability (TMI) is one of the main factors limiting their power scaling. In this paper, the influence of the TMI effect on the output power of high-power linearly polarized narrow linewidth fiber lasers is analyzed, and a TMI suppression method is proposed. The experiment employs multi-wavelength pumping technology, using 100 mW single-frequency laser as the seed source. The linewidth of the seed source is broadened to 23 GHz via a phase modulator, and after three-stage amplification, a linearly polarized narrow linewidth laser output is finally achieved with the following parameters: power of 2.54 kW, linewidth of 23 GHz, central wavelength of 1064 nm, extinction ratio of 98%, and beam quality factors $M_x^2=1.21$ and $M_y^2=1.23$. The influence of pump wavelength on the TMI effect is further analyzed. Due to the small core diameter of the fiber (20 μm) and the high absorption coefficient of the gain fiber for pump light (1.8 dB/m@976 nm), the core temperature increases significantly. Additionally, the heat introduced by the pump photon quantum defect causes a variation in the refractive index of the fiber core, leading to the occurrence of TMI at relatively low power levels. When the pump wavelength is shifted to longer wavelengths, both the quantum defect of the pump light and the pump absorption coefficient decrease, resulting in reduced heat distribution across the entire fiber length as well as per unit length. This thus increases the TMI threshold and effectively improves the output power of the linearly polarized narrow linewidth fiber laser.

Keywords: Fiber laser; High power; Linear polarization; Narrow linewidth; Mode instability

高功率窄线宽光纤激光器(本文中,窄线宽光纤激光器指输出激光线宽 ≤ 0.1 nm, 26.5 GHz 的光纤激光器)具有电光转换效率高、可靠性好、相干性好、高稳定性和高光束质量好等优点,广泛应用在军事和科研等领域^[1]。

2017年,国防科技大学的Su等^[2]实现2.43 kW的全光纤窄线宽线偏振激光输出,线宽为68 GHz。2018年,美国IPG公司实现了2 kW全光纤窄线宽线偏振激光输出,线宽为30 GHz,光束质量因子 M^2 约为1.1,但功率的继续提升会受限于横向模式不稳定(Transverse mode instability, TMI)效应^[3]。2019年,中国工程物理研究院应用电子学研究所Chang等^[4]采用白噪声相位调制技术实现了1.5 kW全光纤线偏振激光输出,线宽为13 GHz, M^2 约为1.14,但功率的继续提升会受限于自脉冲及受激布里渊散射(Stimulated Brillouin scattering, SBS)效应。2020年,来文昌等^[5]采用缩短谐振腔长度来抑制光谱展宽效应实现窄线宽输出,放大器采用双向泵浦方式,可以抑制TMI效应,通过减短谐振腔中的光纤长度使得纵模数量减小,从而控制光谱展宽,最终实现了3 kW保偏窄线宽激光输出,光谱线宽为0.20 nm(53 GHz),光束质量 $M^2=1.4$,偏振消光比为94%。

实现高功率和高光束质量光纤激光输出的技术路线,通常采用多路光纤激光进行相干或光谱合成。因此对单个激光器的性能提出了更高的要求,即在保证输出光束质量的前提下,不断提高输出功率。一般采用种子源主振荡功率放大(Master oscillator power amplifier, MOPA)的技术方案来提升光纤激光器的输出功率。但是,随着激光功率不断提升,激光器中会出现自相位调制(Self-phase modulation, SPM)^[5]、四波混频(Four-wave mixing, FWM)^[6]、受激拉曼散射(SRS)^[7]、SBS^[8]

及TMI等非线性效应^[9]。

在高功率线偏振窄线宽光纤激光器中,TMI效应是制约其功率提升的主要因素之一。目前已有研究针对光纤激光器中的TMI效应及其抑制方法展开探讨,提出了提高种子光注入功率、展宽种子激光线宽、优化泵浦方式、调整光纤掺杂参数及优化光纤缠绕半径等多种策略以提高TMI阈值。然而在窄线宽光纤激光器中,上述方法大多仅能对TMI效应起到局部抑制作用。相比之下,通过优化泵浦方式并采用后向多波长泵浦技术,可实现对TMI效应的有效抑制,进而显著提升高功率线偏振窄线宽激光器的输出功率。

1 试验及方法

后向多波长泵浦线偏振窄线宽光纤激光器的原理如图1所示。激光器采用种子源加三级放大的MOPA结构,主放大器采用976 nm和981 nm的多波长后向泵浦方式。其中,种子源采用输出功率为100 mW,中心波长为1064 nm,线宽小于20 kHz的单频光纤激光器。

光谱展宽采用频率带宽10 GHz、半波电压3 V的相位调制器,采用带宽10 GHz、功率0 dBm的任意波形信号源作为线宽调控信号源,采用射频放大器对任意波形信号进行放大。

一级放大器的增益光纤采用长5 m、纤芯直径10 μm 、包层直径125 μm 的掺 Yb^{3+} 双包层保偏光纤(10/125 PM-YDF),该光纤对976 nm泵浦光的吸收系数为3.9 dB/m。泵浦源采用1支最大输出功率为9 W,中心波长为976 nm的激光二极管(9 W泵浦LD),其输出尾纤直径为105 μm 和125 μm 。泵浦耦合采用(2+1) \times 1合束器,其泵浦臂直径为105 μm 和125 μm ,主纤直径为

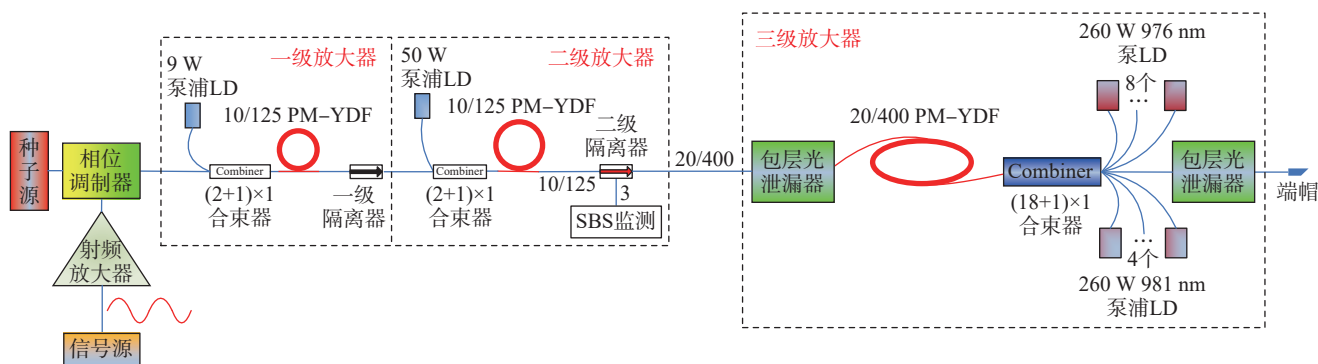


图1 后向多波长泵浦线偏振窄线宽光纤激光器的工作原理

Fig.1 Operation principle of backward multi-wavelength pumped linearly polarized narrow linewidth fiber lasers

10 μm 和 125 μm。

二级放大器的泵浦源采用 1 支最大输出功率 50 W、中心波长 976 nm 的激光二极管 (50 W 泵浦 LD), 输出尾纤直径为 105 μm 和 125 μm, 其余器件与第一放大级相同。

三级放大器的增益光纤采用长 10 m、纤芯直径 20 μm、包层直径 400 μm 的掺 Yb³⁺ 双包层保偏光纤 (20/400 PM-YDF), 该光纤对 976 nm 附近泵浦光的吸收系数为 1.8 dB/m。泵浦源采用 8 支最大输出功率为 260 W, 中心波长为 976 nm 的激光二极管 (260 W-976 nm 泵浦 LD), 以及 4 支最大输出功率为 260 W、中心波长 981 nm 的激光二极管 (260 W-981 nm 泵浦 LD), 其输出尾纤直径为 135 μm 和 155 μm。泵浦耦合采用反向 (18+1)×1 合束器, 其泵浦臂直径为 135 μm 和 155 μm, 主纤直径为 20 μm 和 400 μm。

为防止反馈, 在各放大器间连接光隔离器; 为了防止 SBS 产生的后向散射光打坏前级器件, 反向光由三端口二级光隔离器第三端口导出, 其功能为监测反向 SBS 光功率 (SBS 监测)。当反向功率出现非线性增长时, 表明已发生 SBS, 应迅速关掉放大级电源, 以防止前级器件被反向光打坏; 为了消除包层光, 在第二放大级和第三放大级、第三放大级和输出端之间连接包层光泄漏器; 为防止反馈, 采用端帽作为输出端, 其尾纤长度为 0.5 m。整个系统采用水冷方式进行散热。

2 结果与讨论

2.1 输出功率

为提升光-光转换效率, 本文采用了组合波长的泵浦方式, 中国电子科技集团公司第十一研究所固体激光技术重点实验室 Zhang 等^[10] 分别采用 976 nm LD、915 nm+976 nm LD 和 981 nm+976 nm LD 作为第三放大级 (主放大级) 泵浦源, 探索了在不同泵浦波长下线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率变化情况, 当第三放大级 (主放大级) 泵浦光为 915 nm 和 976 nm 两种波长时, 输出激光功率大于 1.7 kW 时, 输出激光功率急剧下降; 当第三放大级 (主放大级) 泵浦波长为 976 nm, 输出激光功率大于 1.8 kW 时, 输出激光功率同样急剧下降, 发生 TMI 效应; 当第三放大级 (主放大级) 泵浦波长为 976 nm+981 nm LD, 输出激光功率大于 2 kW 时, 输出激光功率未发生急剧下降现象, 未出现 TMI 效应。

结合以上分析, 本文采用 981 nm 和 976 nm 组合波长 LD 作为主放大器 (三级放大器) 的泵浦源时, 激光功率随泵浦功率的变化如图 2 所示。注入第三级放大器激光功率 30 W、总注入泵浦功率 3.160 kW、最大输出功率 2.54 kW、总光-光效率为 80.3%。其中, 第三级放大器注入泵浦功率为 3.12 kW, 提取激光功率为 2.51 kW,

光-光效率为 80.4%, 斜效率为 83.9%。泵浦功率与激光功率具有较好的线性关系, 试验过程中没有发生 TMI 效应, 因此, 进一步增加 981 nm 波长泵浦功率有望实现更高功率的线偏振窄线宽激光输出。同时对输出功率为 2.54 kW 时的激光功率稳定性进行了测量, 在 5 min 内, 激光功率在 2.54 kW 上下波动, 波动值约 1 W (图 3), 表明该激光器输出功率稳定度良好。

2.2 输出光谱

采用横河 AQ6370D 光谱分析仪对输出激光的光谱进行测量, 其光谱范围为 400~1700 nm, 分辨率为 0.02 nm, 结果如图 4 所示。输出功率为 2.54 kW 时, 中心波长 (λ_c) 为 1063.965 nm, 谱宽 ($\Delta\lambda$) 为 0.087 nm (线宽 23 GHz)。

2.3 输出光束质量

采用 Spiricon 公司 M2-200 s 光束质量分析仪对输出激光光束质量进行了测量, 当输出功率为 2.54 kW 时,

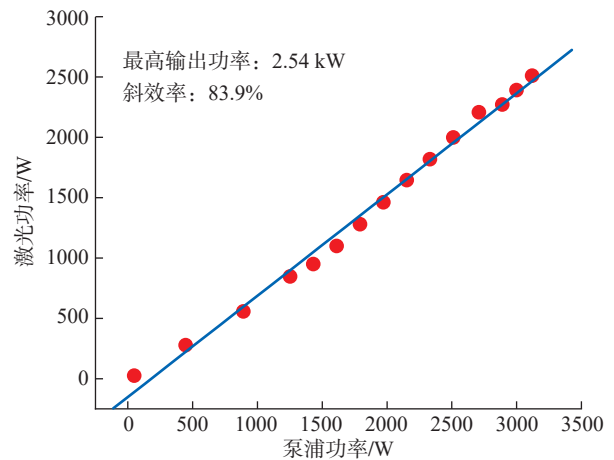


图 2 激光功率随泵浦功率的变化
Fig.2 Variation of laser power with pump power

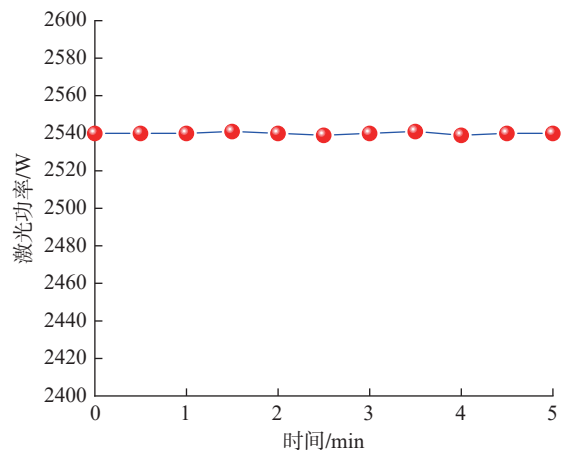


图 3 激光功率随时间的变化
Fig.3 Variation of laser power with time

光束质量 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$, 如图 5 所示。

2.4 输出消光比

采用自搭建的消光比测试仪对输出激光消光比进

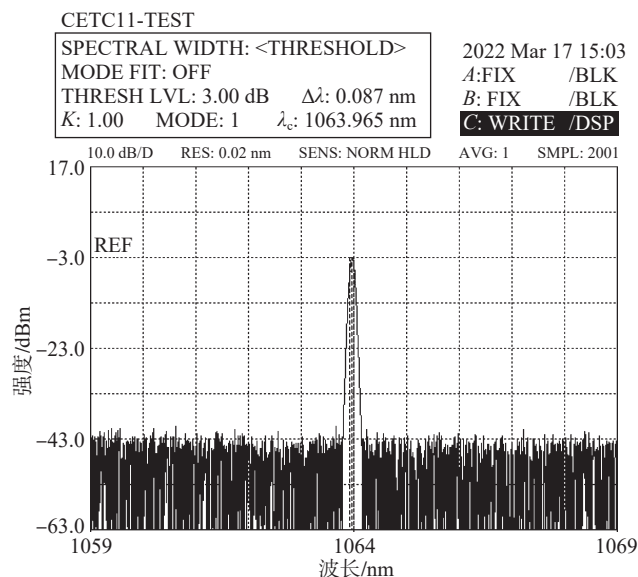
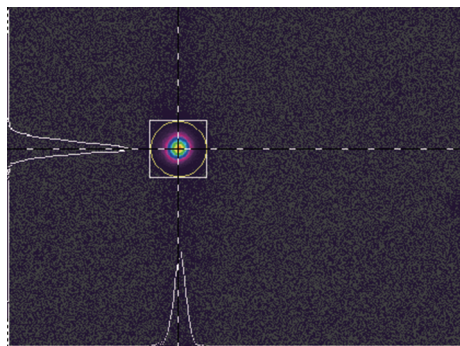
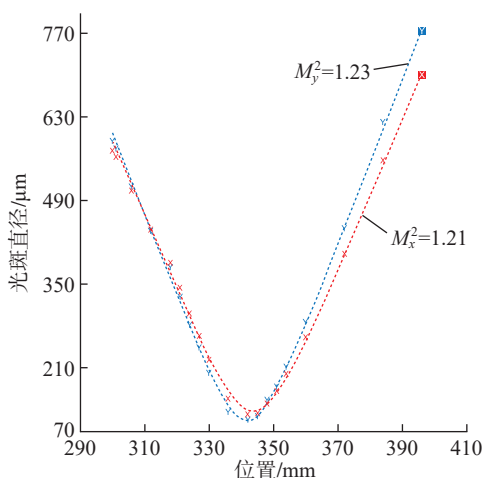


图 4 输出功率为 2.54 kW 时的激光光谱

Fig.4 Laser spectrum at output power of 2.54 kW



(a) 光斑形状及能量分布



(b) 光斑大小

图 5 输出功率为 2.54 kW 时的光束质量图

Fig.5 Beam quality map at output power of 2.54 kW

行测量,当输出功率为 2.54 kW 时,消光比为 98%。

在同等泵浦功率条件下,不同泵浦波长组合对激光器的 TMI 阈值功率及输出特性影响显著。915 nm 与 976 nm 波长组合泵浦, TMI 阈值功率最低,仅为 1.7 kW,进一步增大泵浦功率,输出功率骤降; 976 nm 波长泵浦, TMI 阈值功率增大到 1.8 kW,进一步增大泵浦功率,输出功率骤降;进一步延长泵浦波长到 981 nm+976 nm 组合波长时,激光输出功率提升到 2.54 kW。分析线偏振窄线宽光纤激光器发生功率骤降的原因:由于增益光纤芯径较小(20 μm),增益光纤对泵浦光吸收系数较高(1.8 dB/m@976 nm),纤芯温度较高,加上泵浦光子亏损引入的热,导致纤芯折射率发生变化,发生 TMI 效应,较低功率下,大量的纤芯激光瞬间转化为高阶模传输到光纤内包层中形成包层光,在激光器输出端被包层光泄露器泄露掉,激光器输出功率骤降。当泵浦波长向长波偏移时,泵浦光的量子亏损降低,同时泵浦吸收系数也降低,无论在光纤全长,还是单位长度上的热分布均减小,增大了 TMI 阈值,提升了线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率。

3 结论

本文分析了 TMI 效应对输出激光功率的影响。通过试验研究了泵浦波长对输出激光功率的影响,结论如下。

(1) 试验表明,增加泵浦波长可减弱 TMI 的影响,提高输出激光功率。

(2) 本文最终实现了中心波长 1063.359 nm、线宽 23 GHz、功率 2.54 kW 的线偏振窄线宽光纤激光输出,光-光效率为 80.3%,光束质量 $M_x^2=1.21$, $M_y^2=1.23$ 。其中,第三放大级注入泵浦功率为 3.12 kW,提取激光功率为 2.51 kW,光-光效率为 80.4%,斜效率为 83.9%。泵浦功率与激光功率具有较好的线性关系。试验过程中没有发生 TMI 效应,因此,进一步增加 981 nm 波长泵浦功率有望实现更高功率的激光输出。

(3) 分析了线偏振窄线宽光纤激光器发生功率骤降的原因,由于增益光纤芯径较小,增益光纤对泵浦光吸收系数较高,纤芯温度较高,加上泵浦光子亏损引入的热,导致纤芯折射率发生变化,发生 TMI 效应,较低功率下,大量的纤芯激光瞬间转化为高阶模传输到光纤内包层中形成包层光,在激光器输出端被包层光泄露器泄露掉,激光器输出功率骤降。

参考文献

- [1] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers: A review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0904123.

(下转第 117 页)

零件微小缺陷超声相控阵检测图像降噪方法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(22): 46–52.

WANG Xiaokai, JIANG Qiuyue, GUAN Shanyue, et al. Research on ultrasonic phased array images denoising method for micro defect detection of TC4 titanium alloy parts based on deep learning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(22): 46–52.

[10] PANG J H, CHEUNG G. Graph Laplacian regularization for image denoising: Analysis in the continuous domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4): 1770–1785.

[11] GU S H, ZHANG L, ZUO W M, et al. Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 2862–2869.

[12] 净亮, 邵党国, 相艳, 等. 基于支持向量机的自适应均值滤波超声图像降噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 1–8.

JING Liang, SHAO Dangguo, XIANG Yan, et al. Adaptive mean filtering ultrasonic image denoising based on support vector machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 1–8.

[13] CHEN T, MA K K, CHEN L H. Tri-state median filter for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(12): 1834–1838.

[14] 李兵, 刘晓宏, 郭晓光, 等. Top-hat形态学滤波在图像预处理中的应用及FPGA实现[J]. 光电与控制, 2011, 18(10): 80–85.

LI Bing, LIU Xiaohong, GUO Xiaoguang, et al. Application of morphological filtering in image preprocessing and implementation based on FPGA[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(10): 80–85.

[15] MILLS P K, HUSSEIA V. Multiresolution joint bilateral filtering with modified adaptive shrinkage for image denoising[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(23): 16135–16152.

[16] NGUYEN N, MILANFAR P, GOLUB G. A computationally efficient super-resolution image reconstruction algorithm[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(4): 573–583.

[17] LI X, ORCHARD M T. New edge-directed interpolation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1521–1527.

[18] 郑心草, 孙忠贵. 图像超分中双三次插值的非局部拓展[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2023, 23(3): 53–59.

ZHENG Xincuo, SUN Zhonggui. Non-local extension of bicubic interpolation in image super-resolution[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2023, 23(3): 53–59.

[19] DONG C, LOY C C, HE K M, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(2): 295–307.

[20] LEDIG C, THEIS L, HUSZÁR F, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 105–114.

[21] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 770–778.

[22] 梁越. 基于C-TIRADS的甲状腺结节超声图像检测与危险分层深度学习模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

LIANG Yue. Research on C-TIRADS-based ultrasound image detection of thyroid nodules with deep learning model for risk stratification[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.

通信作者: 罗忠兵, 教授, 博士, 研究方向为材料无损检测与评价。

(责编 七七)

(上接第 95 页)

[2] SU R T, TAO R M, WANG X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(8): 085102.

[3] PLATONOV N, YAGODKIN R, CRUZJ D L, et al. Up to 2.5 kW on non-PM fiber and 2.0 kW linearly polarized on PM fiber: Narrow-linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120.

[4] CHANG Z, WANG Y S, SUN Y H, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouin scattering[J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 6419–6425.

[5] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 7–28.

LAI Wenchang, MA Pengfei, XIAO Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 7–28.

[6] WANG Y S, PENG W J, SUN Y H, et al. Effect of the number of longitudinal modes on spectral broadening in a high power fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(12): 1107–1110.

[7] 宋家鑫, 任帅, 王广建, 等. 国产锥形光纤实现4.2 kW近单模窄线宽激光[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0816002.

SONG Jiabin, REN Shuai, WANG Guangjian, et al. Realization of 4.2 kW near single mode narrow linewidth laser with domestic tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0816002.

[8] 石梦悦, 吴勇, 李洁, 等. 基于光谱展宽的高功率窄线宽激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1500001.

SHI Mengyue, WU Yong, LI Jie, et al. Research progress of high-power narrow-linewidth lasers based on spectral broadening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500001.

[9] GAO W, FAN W H, JU P, et al. Thermally-induced transverse mode instability: Hopf bifurcation in high-power fiber laser[J]. Results in Physics, 2022, 43: 106098.

[10] ZHANG L M, ZHANG K, ZHANG X X, et al. 2.2 kW linearly polarized narrow linewidth all-fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12792: 127921.

通信作者: 张利明, 高级工程师, 博士, 研究方向为高功率光纤激光器。

(责编 七七)