

光学学报

光纤激光宽温度范围运行研究进展

吴金明¹, 李凤昌¹, 王鹏^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3***}, 奚小明^{1,2,3}, 杨保来^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3**}, 韩凯^{1,2,3}, 陈金宝^{1,2,3*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 简要回顾了高功率掺镱光纤激光器的发展历程, 指出宽温运行光纤激光器的需求与应用场景。综述已有关于光纤激光器在变温条件下的研究成果, 在高功率光纤激光器的发展中, 工作温度对光纤激光器造成的影响将进一步显现。介绍了利用现有光纤器件以及传统光纤激光器设计的宽温运行光纤激光器案例。通过系统设计和结构优化, 本课题组已成功实现千瓦级的宽温运行光纤激光器, 整机运行温度从常温拓展到-30℃。进一步的功率提升和温度范围拓展还需要对光纤激光器工作机理、光纤器件温度特性等方面进行深入研究。此外, 展望了宽温运行光纤激光器的发展趋势, 研究结果为高功率宽温运行光纤激光器的发展提供了参考。

关键词 激光光学; 光纤放大器; 振荡器; 宽温; 高功率

中图分类号 TN24 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230924

1 引言

高功率掺镱光纤激光器在工业加工、先进制造、科学研究以及一些新兴产业都有着广泛的应用^[1-5]。高功率掺镱光纤激光器的快速发展, 源于研究人员半个多世纪的不断突破与创新。早在 1961 年, 来自 America Optical 公司的 Snitzer^[6-7] 就在掺铈玻璃介质中发现了激光现象, 光纤激光就此萌芽。但是受限于泵浦光亮度不足等, 早期的光纤激光非常微弱。直到 1988 年双包层光纤公开报道以后^[8], 光纤激光才得以逐渐突破至瓦量级^[9-11]。由于四能级结构更容易产生激光现象, 当时的光纤激光器多以四能级结构的铈离子为增益介质。但是因量子亏损以及复杂的跃迁过程, 掺铈光纤激光器的光光转换效率相对较低, 其输出功率的提升受到热效应的严重制约。相比之下, 准三能级结构的镱离子由于能级结构非常简单, 在激光跃迁的过程中不会出现激发态吸收、上能级转换、浓度猝灭以及无辐射跃迁等现象, 并且激光跃迁时的量子亏损较小, 从而能够显著提高泵浦光的转换效率。研究人员纷纷将目光转移到掺镱光纤(YDF)上, 高功率掺镱光纤激光器的发展从此进入快车道。1999 年, 掺镱光纤激光器输出功率成功突破百瓦量级^[12], 并且仅在十年内(1999—2009 年)美国的 IPG 光子公司就以惊人的速度将其提升到万瓦量级^[13]。2013 年, IPG 光子

公司再次报道了 20 kW 的掺镱光纤激光放大器(YDFA), 在全球相关研究单位中遥遥领先。随后, 其他国内外单位在光纤激光振荡器与放大器领域也逐渐取得突破性成果。在光纤激光放大器领域, 具有代表性的单位是中国工程物理研究院^[14-19]、清华大学^[20-25]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[26-29](以下简称“上海光机所”)以及国防科技大学^[30-36]。其中: 中国工程物理研究院与国防科技大学分别于 2021 年和 2022 年实现了 20 kW 的光纤激光放大输出^[18-19, 36], 追平了近十年前 IPG 光子公司所报道的单纤最高输出功率; 清华大学与上海光机所也分别于 2016 年和 2019 年报道了万瓦级光纤激光放大器^[22, 29]。除此之外, 暂无其他单位报道全光纤结构的单纤万瓦级光纤激光输出。由于大功率光纤器件的工艺限制, 光纤激光振荡器的发展比放大器缓慢。2020 年日本藤仓公司报道的 8 kW 光纤激光振荡器^[37]为目前已知最高输出功率的全光纤结构振荡器。光纤激光振荡器领域的其他代表性单位还有国防科技大学以及德国耶拿大学^[38], 其国防科技大学一直保持着国内的领先纪录。2016—2019 年, 国防科技大学分别报道了输出功率为 2.5 kW^[39]、4 kW^[40]、5.2 kW^[41]以及 6.03 kW^[42]的光纤激光振荡器, 连续 4 年突破国际光纤激光振荡器最高输出功率。2021 年, 国防科技大学奚小明等^[43]将全光纤激光振荡器的输出功率提升到 7 kW 量级, 再次刷新了国内公开

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61905282)、长沙市杰出创新青年培养计划(kq2206002)

通信作者: *kdchenjinbao@aliyun.com; **chinawxllin@163.com; ***zhanghanwei100@163.com

报道的全光纤激光振荡器的最高输出功率。随着光纤制备与其他光纤器件的制作工艺愈发成熟,千瓦级光纤激光器已经被广泛地应用到人们的生活中,并且各应用领域对更高功率光纤激光的需求仍在持续增长。然而,从输出功率的发展趋势来看,光纤激光器的发展已经停滞了10年。为了满足行业需求,广大科研人员依旧需要不断突破创新,打破发展瓶颈。

目前,限制大功率光纤激光器功率继续提升的因素除了光纤器件的制作工艺外,更主要的是在光纤激光器功率不断提高时光纤内部出现的非线性效应。当掺镱光纤激光器还处于百瓦量级时,所采用YDF的纤芯直径一般小于 $10\ \mu\text{m}$,对应纤芯内的功率密度很高。当光纤中的功率密度高于一定阈值时,其内部就会产生受激拉曼散射^[44](SRS;在窄线宽光纤激光器中,主要受限因素是受激布里渊散射。在未特别说明的情况下,本文默认以宽谱光纤激光器为说明对象)。SRS的出现不仅会消耗信号光,从而降低激光器效率,还会对激光器的稳定性和安全性造成影响^[45-46]。除此之外,光纤内激光功率的提升还会导致其他有害非线性效应的出现,如自相位调制^[47]、四波混频^[48]等,这使得光纤激光器的发展进一步受限。为了提高光纤激光器的非线性阈值,大模场光纤应运而生^[49-50],光纤激光器的输出功率也因此迅速提升到千瓦量级。然而,简单地增大光纤芯径对激光器性能的提升效果也相当有限。目前所报道的万瓦级光纤激光器所使用的光纤多为芯径在 $30\ \mu\text{m}$ 左右的少模光纤^[29],纤芯更粗的光纤虽然可以提高光纤激光器的非线性阈值,但是输出光束质量相对单模光纤有明显退化,从而使得激光器的亮度达不到应用要求。此外,在高功率体制下,光纤中多个模式的存在又激发了另一个非常棘手的现象——横向模式不稳定(TMI)效应^[51-52]。TMI也具有阈值特性,即当激光器输出功率达到某个阈值时,光纤激光器的输出模式由稳定的基模变为能量在不同模式之间以ms量级变化耦合的非稳态模式,这不仅会导致激光器输出功率滞涨,降低激光器输出效率,还会导致光束质量恶化^[39, 53]。在大功率光纤激光器目前的发展中,SRS和TMI是首要的两大限制因素。分析表明,从优化光纤尺寸的角度出发,抑制SRS与TMI的策略完全相悖,即增加光纤的纤芯直径、缩短光纤长度有利于提升SRS阈值,但是会降低TMI阈值。目前研究人员尚未研究出同时抑制SRS与TMI的有效手段,高功率光纤激光器输出功率的进一步提升普遍受限于此。

尽管光纤中的SRS与TMI等限制因素给光纤激光器功率提升带来了巨大挑战,但是凭借着结构紧凑、体积小、可柔性操作的独特优势,光纤激光器在当前发展阶段仍然不断受到更多应用领域的青睐。随着市场竞争愈发激烈,光纤激光器的发展从过去一味追求功率增长的野蛮生长阶段,进入到更加充分满足用户需求的精耕细作阶段。其中,光纤激光器的稳定运行既

是一大需求,也是一项挑战。激光切割与加工等应用场景需要激光器高强度工作,在此条件下,光纤内部会积累大量的废热。光纤内部温度过高极易造成光纤激光器不稳定:一方面,一些光纤激光器元件难以承受高温,例如光纤器件的涂覆层^[54]、半导体泵浦源以及泵浦/信号合束器等;另一方面,增益光纤的物理特性,包括吸收发射截面^[55]、热传导系数、热膨胀系数以及折射率^[56]等,都直接受到温度的影响。这些物理量的变化会影响其内部泵浦光的转化以及信号光的传输演化过程,从而影响激光器输出效率、中心波长以及光束质量等特性。另外,如果光纤激光器的应用场景是温度多变的环境,也会遇到上述问题,例如激光点火^[57]、卫星通信^[58]、飞行器传感等。为满足需求,在设计宽温运行光纤激光器时,应当在满足一定功率水平的基础上,更加注重激光输出稳定性的保持。传统半导体激光器(LD)的发射波长会随温度变化发生漂移^[59-60],从而与增益光纤的吸收谱失配,最终导致输出效率下降。有的LD输出功率本身就随温度变化,从而会进一步降低激光器的稳定性,因此LD的输出稳定性设计是光纤激光器实现宽温运行的一个重要环节。锁波长LD通过体布拉格光栅对中心波长的控制能够在一定程度上减弱温度对LD输出中心波长的影响。此外,还有一些其他手段能够降低LD发射波长的温度依赖特性,例如使用冷却设备对LD进行温控以及采用多波长LD^[61],但是这些方法的可控温度范围都较小。加上YDF吸收谱的起伏较大,光纤对泵浦光的吸收在不同温度下具有明显的差异。YDF的吸收发射截面会随温度的改变而变化^[55],光纤光栅的中心波长也会受到工作温度影响^[62-63]。总体而言,温度对光纤激光器元件的影响几乎难以直接消除,因此LD输出波长与增益光纤吸收谱的匹配以及光栅中心波长与增益光纤发射谱的匹配,都是设计宽温运行光纤激光器的关键。以上问题不仅限制了光纤激光器本身的稳定性,也限制了光纤激光器向更广阔的应用领域拓展。继续深入研究温度对光纤激光器的影响:1)有利于光纤器件温度稳定性进一步提升,也促使光纤激光器整体稳定性提升;2)可以厘清光纤参数随温度变化的物理规律,解释光纤激光器温度特性的内在机理,并指导光纤激光器的理论设计;3)从深层次观察和研究光纤中的SRS与TMI现象,帮助研究人员突破大功率光纤激光器功率提升的物理瓶颈。基于一些应用领域的迫切需求和研究人员在温度对光纤激光器影响方面的研究,宽温运行光纤激光器开始发展。这种激光器能够实现长时间的连续稳定工作,更加适用于工业应用。此外,宽温运行光纤激光器对环境变化的不敏感性还可以实现一机多用,使用时不受地域时空和环境因素的限制,在某些恶劣环境下或将成为无可替代的选择。

2 温度对光纤激光器影响研究进展

2.1 温度对光纤器件的影响

高功率光纤激光器元件一般包括 LD、合束器、增益光纤以及光纤光栅等。除合束器外,这些器件的参数都具有明显的温度依赖特性。LD 在工作状态下,内部温度的变化非常明显。研究表明,LD 中心波长随温度变化会发生漂移,漂移系数处于 $0.14\sim 0.32\text{ nm/K}$ 范围^[64]。当 LD 工作温度高于特定温度时,其使用寿命会急剧缩短^[65]。图 1 所示为国防科技大学高琼^[66]实验

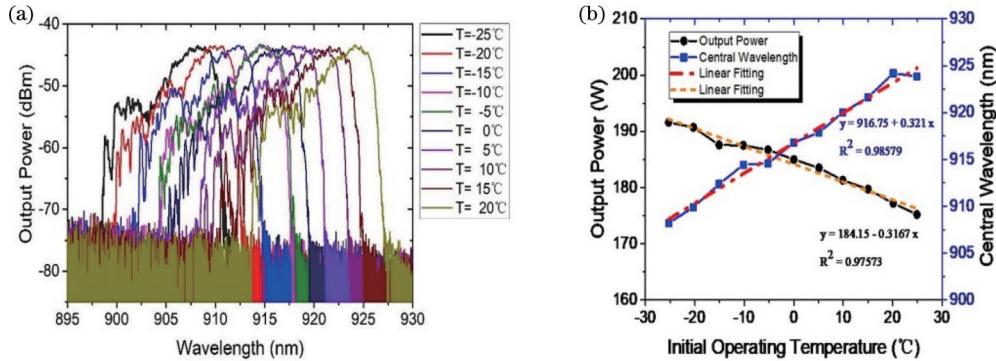


图 1 LD 输出特性随温度的变化^[66]。(a) 输出光谱; (b) 输出功率与中心波长

Fig. 1 LD output characteristics vary with temperature^[66]. (a) Output spectra; (b) output power and central wavelength

光纤布拉格光栅包括高反光纤布拉格光栅(HR-FBG)和输出耦合器光纤布拉格光栅(OC-FBG),其中心波长随温度的变化大致也呈线性关系。图 2 所示为某型号 HR-FBG 与 OC-FBG 的温度特性测试结果^[66]。该结果显示温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, HR-FBG 的中心波长向长波方向漂移 12.74 pm , OC-FBG 的中心波长向长波方向漂移 13.48 pm 。

根据玻尔兹曼分布,在热平衡条件下激光增益介质粒子数分布与温度呈指数函数关系。因此,光纤温度的变化将改变光纤实际的吸收发射截面,从而对泵浦光的转换过程产生影响。光纤材料的轴向均匀性包括光纤中的应力、温度以及折射率等参数的均匀性,这些参数都会影响波导结构的导光性能。由于石英玻璃具有非晶体属性,当温度偏离正常温度时,增益光纤的均匀性会逐渐退化,这将影响信号光在光纤中的传输与演变过程,包括由模场的泄漏和失真导致的效率下降和光束质量退化。2001 年,美国 Advanced Laser System 公司的 Brown 等^[67]根据光纤内的量子亏损与热光效应,理论计算了光纤激光器在运行过程中光纤内的热量、应力以及折射率分布。该计算基于百瓦级的功率输出以及稳定的环境温度和热交换速率,计算结果显示光纤的均匀性变化较小。目前高功率光纤激光器的输出功率已达到万瓦级,但应用场景的温度缺乏可控性,因此关于高功率条件下光纤均匀性的理论研究亟待更新。目前关于增益光纤吸收发射截面测量的报道较多,其中也不乏针对宽温范围进行的测量研

测量的不同温度下某型号 LD 的输出特性。图 1(a) 展示的是该 LD 在相同工作电流、不同工作温度下的光谱变化;图 1(b) 展示的是 LD 在 $-30\sim +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,相同工作电流下的输出功率以及中心波长的变化趋势。可以看出,LD 的输出功率以及中心波长随温度的变化规律大致符合线性变化。LD 温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中心波长向短波方向漂移约 0.32 nm ,输出功率提高 0.26% 左右。需要说明的是,该线性变化规律仅针对包含常温在内的一段温度范围有效。当温度过高或过低时,LD 的参数可能发生突变,甚至无法正常工作。

究^[55, 68-72]。总的来说,吸收发射截面的测量过程较为繁琐,测量多个温度下的吸收发射截面则更加复杂,误差也更加难以控制,但是所报道的实验结果在趋势上基本一致。图 3(a)、(b) 所示为英国南安普顿大学 Vazquez-Zuniga 等^[69]测量的不同温度下 YDF 的吸收发射截面。以该实验结果为例,当温度升高时,吸收截面与发射截面的谱线形态都趋于矮胖化。这种规律可以用粒子数的玻尔兹曼分布进行解释,也可以简单地理解为温度升高导致吸收发射谱线展宽。2008 年,美国 IMRA 公司的 Peng 等^[55]提出一种基于玻尔兹曼分布和洛伦兹拟合的吸收发射截面计算方法。该方法能够通过某一温度下测量得到的吸收发射截面,推导得出其他任意温度的吸收发射截面数据。该研究结果为吸收发射截面数据的获取提供了便利,也进一步完善了变温条件下光纤激光器的理论模型。

2.2 温度对激光器性能的影响

基于对各个光纤器件温度特性的逐步了解,研究人员在温度对光纤激光器整体性能的研究上也逐渐深入。早期的研究重点集中在增益光纤上,温度会改变 YDF 的增益特性,进而影响激光器的输出光谱和效率。在文献[73]中,研究人员基于空间结构的光纤激光器,将增益光纤从 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,发现激光器输出光谱的中心波长从 1103 nm 移动到 1120 nm 。俄罗斯科学院 Gruk 等^[74]研究了中心波长为 1064 nm 、 1150 nm 、 1180 nm 的 3 种激光器工作在不同温度下的输出特性,发现在高温条件下, 1064 nm 的激光发射被

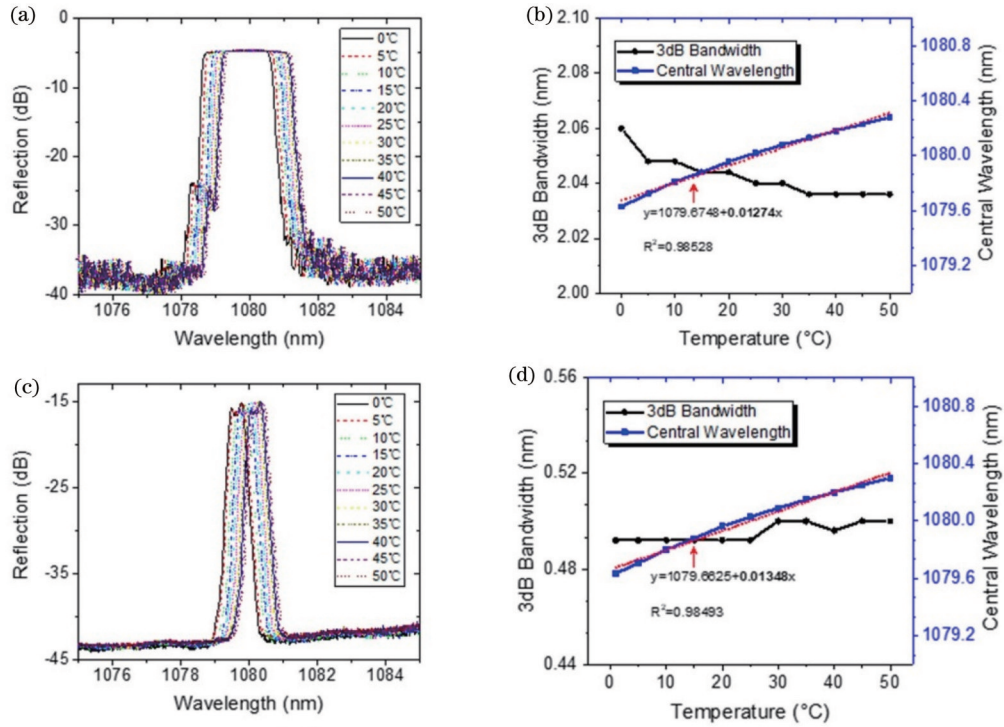


图 2 HR-FBG 与 OC-FBG 温度特性测试结果^[66]。(a) HR-FBG 反射谱; (b) HR-FBG 3 dB 带宽与中心波长; (c) OC-FBG 反射谱; (d) OC-FBG 3 dB 带宽与中心波长
 Fig. 2 Test results of temperature characteristics of HR-FBG and OC-FBG^[66]. (a) HR-FBG reflection spectra; (b) HR-FBG 3 dB bandwidth and central wavelength; (c) OC-FBG reflection spectra; (d) OC-FBG 3 dB bandwidth and central wavelength

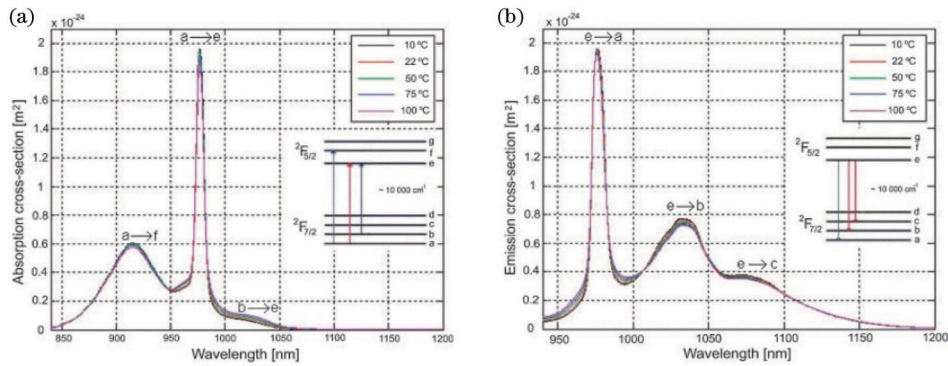


图 3 不同温度下 YDF 的吸收发射截面^[69]。(a) 吸收截面; (b) 发射截面

Fig. 3 Absorption and emission cross sections of YDF at different temperatures^[69]. (a) Absorption cross section; (b) emission cross section

抑制, 而 1150 nm、1180 nm 的激光发射则被促进。2006 年, Kurkov 等^[75]将有源光纤加热到 70 °C, 以增加对波长为 1070 nm 的泵浦光的吸收, 有效抑制了自发辐射放大, 最终获得 3.2 W 的 1160 nm 激光输出, 对应的斜率效率为 45%。2010 年, 南安普顿大学的 Vazquez-Zuniga 等^[69]基于 YDFA 发现, 在光纤温度从 10 °C 上升到 100 °C 的过程中, 1060 nm 和 1080 nm 的信号光功率分别下降了约 16% 和 5%。2013 年, 德国约翰内斯·古腾堡大学物理研究所的 Steinborn 等^[76]通过液氮环境显著降低了增益光纤对 1015 nm 波段信号光的重吸收, 实现了 10 W 的 1015 nm 激光输出。2020

年, 伊朗核科学技术研究所的 Ilchi-Ghazaani 等^[71]利用液氮制冷 1080 nm 光纤激光振荡器的增益光纤, 发现振荡器的输出效率由常温下的 70% 下降到 35%。文献^[77]基于 1018 nm 光纤激光器级联泵浦 1080 nm YDFA, 将放大级 YDF 温度从室温加热到 302 °C, 显著增强了对 1018 nm 泵浦光的吸收, 使得 YDFA 功率转换效率从 58.7% 提高到 81.3%。文献^[78]研究了温度对掺镱超荧光光纤光源(SFS)输出光谱和功率的影响, 在有源光纤的温度从 20 °C 升高到 60 °C 的过程中, SFS 的中心波长从 1062.70 nm 被调谐到 1067.31 nm。上述研究结果表明: 1) 加热有源光纤, 有利于更长波长

的激光输出;2)改变 YDF 工作温度,光纤激光器的效率也会受到影响,其影响程度与激光器结构、激光波长等因素有关。

2.3 温度对 TMI 的影响

2012 年,美国空军实验室的 Ward 等^[79]首次开展了温度对光纤激光器 TMI 阈值影响的实验研究。该研究基于光子晶体光纤激光放大器,对比了光纤在水冷板传导制冷与空气对流制冷两种条件下的 TMI 阈值。实验结果如图 4 所示:在对流制冷条件下,激光器的 TMI 阈值低于 380 W;在传导制冷条件下,激光器的 TMI 阈值超过 500 W。实验中光纤在更高效的制冷方式下,对应光纤激光器的 TMI 阈值更高,但是两组实验没有保证光纤弯曲状态的一致性,因此不能排除光纤弯曲状态的不同对 TMI 阈值的影响。

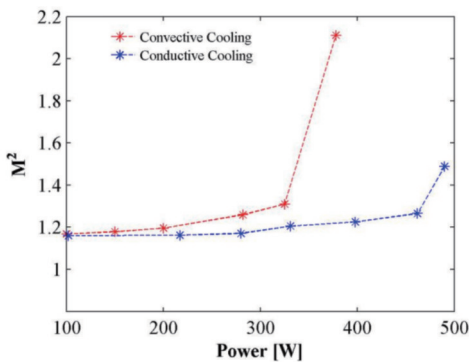


图 4 光束质量随输出功率的变化^[79]

Fig. 4 Variation of beam quality with output power^[79]

2013 年,丹麦科技大学 Hansen 等^[80]计算了导热系数 $h_q=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (对应于自然空气冷却) 和 $h_q=10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (对应于更加高效的主动制冷) 时光纤内的非线性耦合系数,计算结果表明 TMI 阈值没有变化,这与文献^[79]的结论不同。2014 年,伊朗 Hejaz 等^[81]以及国防科技大学陶汝茂^[82]先后通过改变增益光纤的温度来研究不同制冷温度对激光器 TMI 阈值的影响,均发现激光器的 TMI 阈值与光纤的制冷温度没有关系,但是他们未报道详细的实验过程,并且实验中的温差不够明显。2020 年,本课题组 Wu 等^[83]通过准确控制增益光纤温度,在 YDF 工作温度从 20°C 下降到 -10°C 的过程中,将激光器 TMI 阈值从 867 W 提升到 931 W 以上,如图 5 所示。以上实验结果表明,温度对 TMI 的影响受到激光器结构、增益光纤类型、光纤弯曲状态以及制冷条件等的影响。工作温度影响光纤激光器 TMI 阈值的特性和机理有待进一步研究。

2.4 温度对 SRS 的影响

理论上降低光纤的温度可以减少光纤内的平均声子数,从而减弱信号光与声子的散射,降低拉曼增益。1970 年,麻省理工学院 Hart 等^[84]使用波长为 514 nm 的氩离子激光器研究了低温下样品硅的拉曼谱。图 6

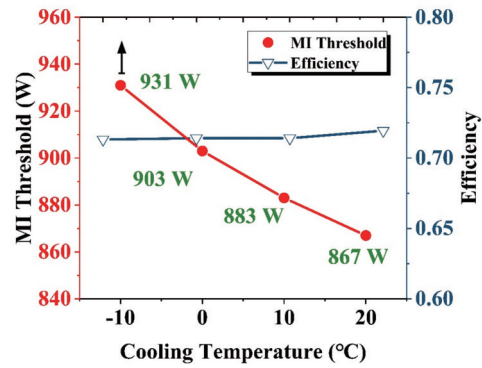


图 5 振荡器 TMI 阈值和光光效率随 YDF 制冷温度的变化^[83]
Fig. 5 Variation of TMI threshold and optical-to-optical efficiency of oscillator with cooling temperature of YDF^[83]

所示为在 20 K、460 K 以及 770 K 下样品硅的拉曼谱。可以看到,温度对材料的拉曼谱影响非常明显,当温度降低时,斯托克斯与反斯托克斯频移都明显增大,且斯托克斯谱线的强度增大,线宽变窄,而反斯托克斯谱线则逐渐消失。

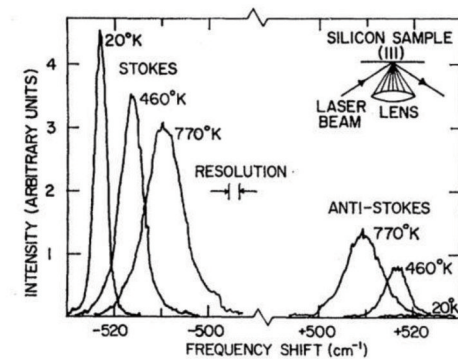


图 6 20 K、460 K、770 K 温度下样品硅的拉曼谱^[84]

Fig. 6 Raman spectra of silicon samples at 20 K, 460 K, and 770 K^[84]

2021 年,中国工程物理研究院的 Huang 等^[14]基于窄线宽 YDFFA,通过将 YDF 的水冷温度从 20°C 降低到 8°C ,发现输出光谱中的拉曼抑制比由 23 dB 上升至 47 dB,结果如图 7 所示。2022 年,南京理工大学的 Zheng 等^[85]运用同样的方法,同样实现了对光纤中受激拉曼散射的抑制。目前的初步分析均认为是光纤工作温度的降低抑制了自发拉曼噪声,从而提高了受激拉曼散射阈值。上述研究表明,工作温度同样会对光纤激光器的非线性效应产生影响。

3 高功率宽温运行光纤激光器研究进展

宽温运行固体激光器已经成为一大研究热点,但是相关报道集中于传统的固体激光器^[60-61, 86-92],而光纤激光器领域的报道较为缺乏。表 1 总结了国内外光纤激光器在宽温域的相关研究现状。本课题组的研究都

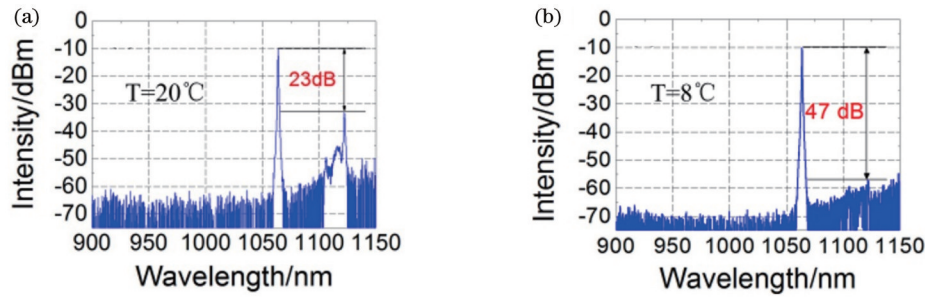


图 7 不同温度下放大器的输出光谱^[14]。(a) 20 °C; (b) 8 °C

Fig. 7 Amplifier output spectra at different temperatures^[14]. (a) 20 °C; (b) 8 °C

是基于整体激光器的制冷,而其他单位只是对 YDF 进行温度控制。基于整体激光器的制冷,本课题组实现了千瓦级的宽温运行光纤激光器^[66]。国外一些单位^[71,76]通过液氮,以较大的温度跨度研究了更低温度下光纤激光器的输出特性,其功率均在 10 W 左右。在国内,中国工程物理研究院激光聚变研究中心^[14]与南

京科技大学^[85]分别基于 4200 W 与 3000 W 的高功率光纤激光放大器研究了 SRS 的温度特性,通过小幅度调节水冷机的制冷温度,实现了对 SRS 的抑制。工作温度范围高于常温的光纤激光器研究工作主要集中于国外^[69,73-75,81],国内目前仅有北京化工大学^[77]与中国科学院西安光学精密机械研究所^[78]开展了相关工作。

表 1 国内外宽温域光纤激光器相关研究进展

Table 1 Research progress of wide temperature operation fiber laser at home and abroad

| Year | Research unit | Average power /W | Central wavelength /nm | Temperature range /°C | Cooling or heating region (laser type) | Ref. |
|------|---------------|------------------|------------------------|-----------------------|--|------|
| 2001 | AFRL | ~2 | 1103-1120 | 2-90 | YDF (ASE) | [73] |
| 2004 | RAS | ~0.5 | 1064, 1150, 1180 | 20-200 | YDF (oscillator) | [74] |
| 2006 | RAS | 3.2 | 1160 | 20-70 | YDF (oscillator) | [75] |
| 2010 | Soton | 1.5 | 1060, 1080 | 10-100 | YDF (amplifier) | [69] |
| 2013 | JGU | 10 | 1015 | -196 | YDF (amplifier) | [76] |
| 2014 | NSTRI | ~500 | 1078 | 5-35 | YDF (oscillator) | [81] |
| 2016 | BUCT | 45 | 1080 | 22-302 | YDF (amplifier) | [77] |
| 2018 | XIOPM | ~20 | 1040-1100 | 20-60 | YDF (ASE) | [78] |
| 2019 | NUDT | 2000 | 1080 | -10-20 | Whole Laser (oscillator) | [66] |
| 2020 | NSTRI | ~10 | 1080 | -189.2-22.5 | YDF (oscillator) | [71] |
| 2020 | RCLF | 4200 | 1064 | 8-20 | YDF (amplifier) | [14] |
| 2021 | NUDT | 1000 | 1080 | -30-20 | Whole Laser oscillator) | [93] |
| 2022 | NUST | 3000 | 1050 | 10-25 | YDF (amplifier) | [85] |

Notes: AFRL—Air Force Research laboratory, America; RAS—Russian Academy of Sciences, Russia; Soton—University of Southampton, Britain; JGU—Johannes Gutenberg University, German; NSTRI—Nuclear Science and Technology Research Institute, Iran; BUCT—Beijing University of Chemical Technology, China; XIOPM—Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, China; NUDT—National University of Defense Technology, China; RCLF—Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, China; NUST—Nanjing University of Science & Technology, China.

如表 1 所示,2019 年本课题组高琼^[66]基于 915 nm LD 泵浦的 1080 nm 振荡器,实现了 -10~+20 °C 范围内连续出光 30 s、输出功率高于 2 kW、功率波动小于 7% 的高功率宽温运行激光器。该光纤激光振荡器结构如图 8(a)所示,泵浦方式为单后向泵浦,采用 YDF 的纤芯/包层直径为 20/400 μm,数值孔径为 0.065,长度约为 30 m,对泵浦光的总吸收约为 15 dB。激光器置于可模拟环境温度的恒温试验箱中,仅将输出端[图 8(a)中的 QBH (quartz block head)]置于实验箱外,箱

内可控温度范围为 -90~+200 °C。激光器本身的制冷使用以乙二醇溶液为制冷液的工业制冷机,该制冷机可以设置的最低制冷温度为 -50 °C 左右。实验中,恒温试验箱与制冷机的温度保持同步设置,并且在激光器的各个部分都固定了热敏电阻来监视激光器的实时温度。实验结果如图 8(b)所示。可以看到,工作温度越低,该激光器的输出功率和效率也越低。随着激光器运转时间延长,输出功率也会有略微下降,但始终保持在 2 kW 以上,且功率波动小于 7%。

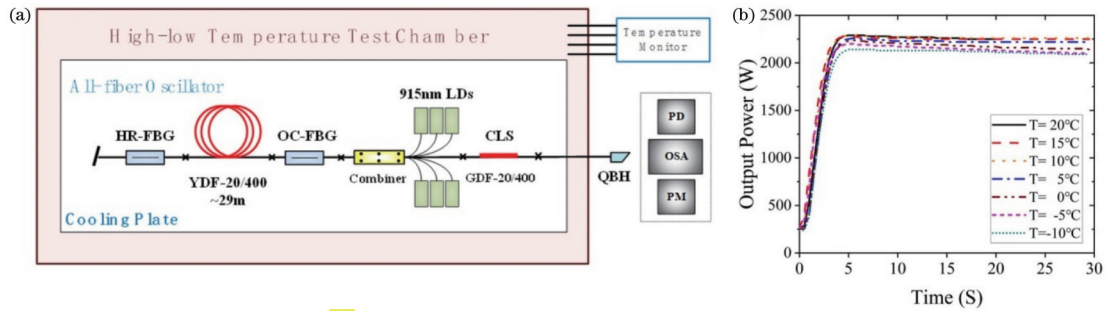


图 8 2 kW 宽温运行光纤振荡器^[66]。(a)振荡器结构示意图;(b)激光器输出功率随出光时间的变化曲线

Fig. 8 2 kW wide temperature operation fiber oscillator^[66]. (a) Schematic of the oscillator structure; (b) variation curves of laser output power with output time

2021年,本课题组吴金明^[93]改用940 nm LD,搭建了图9(a)所示的1080 nm 光纤激光振荡器。振荡器所采用YDF的长度为40 m,在915 nm处的吸收系数为0.39 dB/m,纤芯/包层直径为20/400 μm ,泵浦方式为单后向泵浦。实验的变温环境模拟方式与文献^[66]相

同。该振荡器最终实现了在 $-30\sim+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温范围内功率波动小于7%的千瓦级激光输出,实验结果如图9(b)所示。相比于文献^[66]的实验结果,该振荡器的宽温运行功率仅为1 kW,但工作温度范围扩大了 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

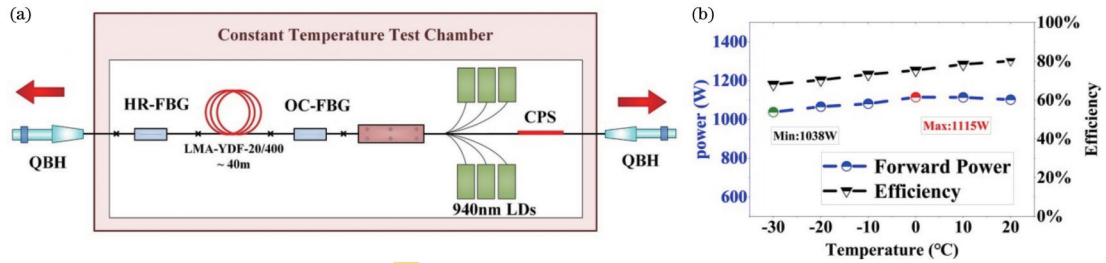


图 9 千瓦级宽温运行光纤振荡器^[93]。(a)振荡器结构示意图;(b)不同温度下激光器的输出功率以及效率

Fig. 9 kW-level wide temperature operation fiber oscillator^[93]. (a) Schematic of the oscillator structure; (b) output power and efficiency of laser at different temperatures

4 展 望

结构紧凑、体积小、质量轻以及可柔性操作的特点促成了光纤激光器极高的易用性。一般而言,这种“易用”大多存在于实验室这样较为友好的环境中。目前的光纤激光器设计基本以友好环境为设计背景,从而追求光纤激光器极致的性能与易用性,但在恶劣环境中,不得不退而求其次,将“易用”的标准降低到“能用”。较为直接的办法是为光纤激光系统添加热控系统,即牺牲一些体积和质量优势来确保设备的稳定性。如果光纤激光器光学系统本身能在较宽温度范围内稳定工作,就能从实用角度进一步释放光纤激光器的优势。因此,从技术发展角度来看,更宽温度范围、更高输出功率发展必将成为未来光纤激光技术发展的趋势之一。

从器件角度来看,半导体泵浦源和增益光纤是受到温度影响最直接、最明显的光纤器件。YDF的吸收谱几乎没有平坦区域,因此对于LD中心波长温漂的响应非常灵敏。要实现大温度范围的输出功率稳定,一方面必须突破现有的光纤激光器设计思路,另一方面继续提升器件的温度稳定性。例如,半导体泵浦源

未来的突破点可能集中于锁波技术的提升,即将LD的温度漂移系数在较大温度范围内控制在 $0.01\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 以内。除此之外,YDF增益特性随温度的变化也有待进一步研究,如增益光纤结构设计、光纤器件导热优化等方面都有许多工作值得开展。

从物理机理研究来看,工作温度对TMI等热效应,以及SRS等非线性效应都有直接或间接的影响,但是目前相关物理过程的机理仍有许多不明确的地方。TMI、SRS等物理效应也是限制大功率光纤激光器发展的主要因素,因此从较宽工作温度角度开展对上述物理效应的研究有助于拓展相关认识,也为寻找新的高功率光纤激光器方案提供了研究思路。当前,5 kW量级的常规光纤激光器已经较为普遍,但是5 kW量级的宽温运行光纤激光器势必受限于TMI或者SRS等效应。因此在宽温工作条件下,通过优化光纤激光器的设计来有效抑制各类非线性效应和热效应也是有待解决的问题。

5 结 论

简要回顾了大功率掺镱光纤激光器的发展历史和研究现状,指出当前光纤激光器功率提升的主要限制

因素为 TMI 与 SRS;介绍了高功率宽温运行光纤激光器在众多领域的应用需求。着重介绍了目前宽温运行光纤激光器设计面临的主要问题与目前在变温领域的一些理论与实验研究结果。随着光纤激光技术的发展,光纤激光的优势将进一步凸显,并将光纤激光器推广到更多的产业应用中。此外,光纤激光器的稳定运行将成为用户与设计者心中“好用”的标准。宽温运行光纤激光器能够进一步扩大光纤激光器的优势与应用范围,解决高功率光纤激光器走出温室的难题,并在恶劣环境中大放异彩。相信在未来的科研探索与应用实践中,宽温运行光纤激光器一定能够得到进一步的发展,帮助高功率光纤激光技术不断取得突破创新。

参 考 文 献

- [1] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, 332(6032): 921-922.
- [2] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [3] Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers: fundamentals and applications[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2014, 28(12): 1442009.
- [4] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [5] Hecht J. High-power fiber lasers[J]. *Optics and Photonics News*, 2018, 29(10): 30-37.
- [6] Snitzer E. Optical maser action of Nd³⁺ in a barium crown glass[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(12): 444-446.
- [7] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(1): 36-39.
- [8] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]//*Optical Fiber Sensors*, January 27, 1988, New Orleans, LA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 1988: PD5.
- [9] Minelly J D, Taylor E R, Jedrzejewski K P, et al. Laser-diode-pumped neodymium-doped fiber laser with output power >1 W [C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 10-15, Anaheim, California, United States. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 1992: CWE6.
- [10] Po H, Cao J D, Laliberte B M, et al. High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(17): 1500-1501.
- [11] Zellmer H, Unger S, Albers P, et al. High-power CW neodymium-doped fiber laser operating at 92 W with high beam quality[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 578-580.
- [12] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [13] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2009: CThA3.
- [14] Huang Z M, Shu Q, Tao R M, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [15] 罗韵, 赵鹏飞, 游云峰, 等. 5.1 kW 光电控一体式单模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0816001.
Luo Y, Zhao P F, You Y F, et al. 5.1 kW optically and electronically controlled integrated single mode fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0816001.
- [16] 林宏免, 唐选, 李成钰, 等. 国产单纤激光系统获得 10.6 kW 激光输出[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0315001.
Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. The national single-fiber laser system has obtained 10.6 kW laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0315001.
- [17] Dai J Y, Li F Y, Liu N A, et al. Extraction of more than 10 kW from Yb-doped tandem-pumping aluminophosphosilicate fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11780: 117801D.
- [18] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产 YDF 有源光纤实现单纤 20 kW 激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0916003.
Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. Domestic YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0916003.
- [19] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 国产光纤材料器件实现高 SRS 抑制比 20.88 kW 输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2116002.
Li F Y, Li Y, Song H Q, et al. The national optical fiber material devices achieve high SRS rejection ratio of 20.88 kW output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2116002.
- [20] 闫平, 肖起榕, 付晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416001.
Yan P, Xiao Q R, Fu C, et al. 1.6 kW all-fiber ytterbium-doped laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0416001.
- [21] 王雪娇, 肖起榕, 闫平, 等. 国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 164204.
Wang X J, Xiao Q R, Yan P, et al. 3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164204.
- [22] 孙俊逸, 闫平, 肖起榕. 高功率光纤激光器拉曼特性研究[C]//*第二十二届全国激光学术会议*, 2016.
Sun J Y, Yan P, Xiao Q R, et al. Research on Raman characteristics of high power fiber lasers[C]. *The 22nd National Laser Academic Conference*, 2016.
- [23] Xiao Q R, Li D, Huang Y S, et al. Directly diode and bi-directional pumping 6 kW continuous-wave all-fibre laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(12): 125107.
- [24] Wang Z H, Yu W L, Tian J D, et al. 5.1 kW tandem-pumped fiber amplifier seeded by random fiber laser with high suppression of stimulated Raman scattering[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 6800109.
- [25] Du S S, Qi T C, Li D, et al. 10 kW fiber amplifier seeded by random fiber laser with suppression of spectral broadening and SRS[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(14): 721-724.
- [26] 楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1277.
Lou Q H, He B, Xue Y H, et al. 1.75 kW domestic Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5): 1277.
- [27] 代守军, 何兵, 周军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702001.
Dai S J, He B, Zhou J, et al. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0702001.
- [28] Zhang J P, Chen X L, Bai G, et al. Optimization of seed power for suppression of stimulated Raman scattering in all-fiber amplifiers[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(3): 035101.
- [29] 陈晓龙, 何宇, 徐中巍, 等. 10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的理论与实验研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1006001.
Chen X L, He Y, Xu Z W, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1006001.
- [30] 刘泽金, 冷进勇, 郭少锋, 等. 全光纤结构 2 kW 准单模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908003.
Liu Z J, Leng J Y, Guo S F, et al. 2 kW quasi-single-mode fiber laser with all-fiber structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0908003.
- [31] 王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502002.

- Wang X L, Zhang H W, Tao R M, et al. Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0502002.
- [32] Shi C, Su R T, Zhang H W, et al. Experimental study of output characteristics of bi-directional pumping high power fiber amplifier in different pumping schemes[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1502910.
- [33] 王鹏, 杨保来, 张汉伟, 等. 单模全光纤激光器实现 6 kW 稳定运行[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2416001.
Wang P, Yang B L, Zhang H W, et al. Single-mode all-fiber laser realizes 6 kW stable operation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2416001.
- [34] 王鹏, 张汉伟, 奚小明, 等. LD 直接泵浦的 8 kW 高光束质量全光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2316004.
Wang P, Zhang H W, Xi X M, et al. 8 kW high beam quality all-fiber laser directly pumped by LD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2316004.
- [35] 王鹏, 奚小明, 张汉伟, 等. LD 泵浦光纤激光放大器实现 13 kW 高光束质量输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 121001.
Wang P, Xi X M, Zhang H W, et al. LD pumped fiber laser amplifier realizes high beam quality output of 13 kW[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 121001.
- [36] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于自研光纤和器件实现 20 kW 高光束质量激光稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1616002.
Xiao H, Pan Z Y, Chen Z L, et al. Stable output of 20 kW high beam quality laser based on self-developed optical fiber and device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1616002.
- [37] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126022.
- [38] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power[J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [39] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. Mitigating transverse mode instability in all-fiber laser oscillator and scaling power up to 2.5 kW employing bidirectional-pump scheme[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27828-27835.
- [40] Yang B L, Zhang H W, Ye Q, et al. 4.05 kW monolithic fiber laser oscillator based on home-made large mode area fiber Bragg gratings[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(3): 031407.
- [41] Yang B L, Shi C, Zhang H W, et al. Monolithic fiber laser oscillator with record high power[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(7): 075106.
- [42] 杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 6 kW[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0116001.
Yang B L, Wang X L, Ye Y, et al. The output power of all-fiber laser oscillator exceeds 6 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0116001.
- [43] 奚小明, 王鹏, 杨保来, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 7 kW[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0116001.
Xi X M, Wang P, Yang B L, et al. The output power of all-fiber laser oscillator exceeds 7 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0116001.
- [44] Wang Y. Dynamics of stimulated Raman scattering in double-clad fiber pulse amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(6): 779-788.
- [45] 刘伟. 高功率光纤激光受激拉曼散射动力学特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
Liu W. Investigation on dynamics of stimulated Raman scattering in high-power fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [46] Wang M, Wang Z F, Liu L, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in half 10 kW tandem pumping fiber lasers using chirped and tilted fiber Bragg gratings[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 167-171.
- [47] Ippen E P, Shank C V, Gustafson T K. Self-phase modulation of picosecond pulses in optical fibers[J]. Applied Physics Letters, 1974, 24(4): 190-192.
- [48] Chen H, Cao J Q, Huang Z H, et al. Experimental investigations on TMI and IM-FWM in distributed side-pumped fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1502413.
- [49] Taverner D, Richardson D J, Dong L, et al. 158- μ J pulses from a single-transverse-mode, large-mode-area erbium-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 1997, 22(6): 378-380.
- [50] Lees G P, Taverner D, Richardson D J, et al. Q-switched erbium doped fibre laser utilising a novel large mode area fibre [J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 393-394.
- [51] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 94-96.
- [52] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [53] Li Z B, Huang Z H, Xiang X Y, et al. Experimental demonstration of transverse mode instability enhancement by a counter-pumped scheme in a 2 kW all-fiberized laser[J]. Photonics Research, 2017, 5(2): 77-81.
- [54] Lapointe M A, Chatigny S, Piché M, et al. Thermal effects in high-power CW fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951U.
- [55] Peng X A, Dong L A. Temperature dependence of ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 25(1): 126-130.
- [56] Aggarwal R L, Fan T Y. Thermal diffusivity, specific heat, thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, and refractive-index change with temperature in AgGaSe₂[J]. Applied Optics, 2005, 44(13): 2673-2677.
- [57] Tsunekane M, Inohara T, Ando A, et al. High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(2): 277-284.
- [58] 王传才. 电子辐照和温变环境对掺铒光纤放大器增益影响实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Wang C C. Experimental study of electronic radiation and temperature on the gain of erbium-doped fiber amplifier[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [59] 杜雪原, 粟荣涛, 王小林, 等. 工作温度对光纤激光器输出特性的影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102004.
Du X Y, Su R T, Wang X L, et al. Research on fiber laser performance working at different temperatures[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s102004.
- [60] 白家荣, 刘源, 钟朝阳, 等. 可低温工作的窄脉冲宽温激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0101004.
Bai J R, Liu Y, Zhong C Y, et al. Narrow pulse width lasers operating over wide range of low temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0101004.
- [61] Goldberg L, Nettleton J, Schilling B, et al. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6552: 65520G.
- [62] 程灿, 辛国锋, 皮浩洋, 等. 大功率半导体激光器热弛豫时间的测量[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1671-1674.
Cheng C, Xin G F, Pi H Y, et al. Measurement of thermal relaxation time of high power semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(12): 1671-1674.
- [63] Zhao Y, Liao Y B. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 1-18.
- [64] Liu X S, Hu M H, Caneau C G, et al. Thermal management strategies for high power semiconductor pump lasers[J]. IEEE

- Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(2): 268-276.
- [65] Nakwaski W, Osinski M. Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(6): 1391-1401.
- [66] 高琼. 工作温度对光纤激光器输出特性影响的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- Gao Q. Theoretical and experimental research on fiber laser performance working at different temperatures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [67] Brown D C, Hoffman H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(2): 207-217.
- [68] Newell T C, Peterson P, Gavrielides A, et al. Temperature effects on the emission properties of Yb-doped optical fibers[J]. Optics Communications, 2007, 273(1): 256-259.
- [69] Vazquez-Zuniga L A, Chung S, Jeong Y. Thermal characteristics of an ytterbium-doped fiber amplifier operating at 1060 and 1080 nm[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(2R): 022502.
- [70] Moore S W, Barnett T, Reichardt T A, et al. Optical properties of Yb³⁺-doped fibers and fiber lasers at high temperature[J]. Optics Communications, 2011, 284(24): 5774-5780.
- [71] Ilchi-Ghazaani M, Parvin P. Temperature effect on Yb-doped silica fiber laser performance[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(5): 1600407.
- [72] Song Y J, Zong N, Liu K, et al. Temperature-dependent thermal and spectroscopic properties of Yb: YAlO₃ perovskite crystal for a cryogenically cooled near IR laser[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(7): 1522-1530.
- [73] Brilliant N A, Lagonik K. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1669-1671.
- [74] Gruk D A, Kurkov A S, Paramonov V M, et al. Effect of heating on the optical properties of Yb³⁺-doped fibres and fibre lasers[J]. Quantum Electronics, 2004, 34(6): 579-582.
- [75] Kurkov A S, Paramonov V M, Medvedkov O I. Ytterbium fiber laser emitting at 1160 nm[J]. Laser Physics Letters, 2006, 3(10): 503-506.
- [76] Steinborn R, Koglbauer A, Bachor P, et al. A continuous wave 10 W cryogenic fiber amplifier at 1015 nm and frequency quadrupling to 254 nm[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22693-22698.
- [77] Zhang B, Zhang R L, Xue Y H, et al. Temperature dependence of ytterbium-doped tandem-pumped fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 159-162.
- [78] Wu P, Wang Y S, Zhao W, et al. Temperature dependence of Yb-doped superfluorescent fiber source[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 90: 48-52.
- [79] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [80] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1944-1971.
- [81] Hejaz K, Norouzey A, Poozesh R, et al. Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics, 2014, 24(2): 025102.
- [82] 陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- Tao R M. Study of thermal-induced modal instabilities in high power narrow-linewidth fiber amplifiers with near diffraction-limited beam quality[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [83] Wu J M, Gao Q, Zhang H W, et al. Experimental demonstration of the influence of cooling temperature on the thermal mode instability in the YB-doped fiber oscillator[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(5): 1500205.
- [84] Hart T R, Aggarwal R L, Lax B. Temperature dependence of Raman scattering in silicon[J]. Physical Review B, 1970, 1(2): 638-642.
- [85] Zheng Y H, Han Z G, Li Y L, et al. 3.1 kW 1050 nm narrow linewidth pumping-sharing oscillator-amplifier with an optical signal-to-noise ratio of 45.5 dB[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12670-12683.
- [86] McCarthy J C, Young Y E, Day R C, et al. Athermal, lightweight, diode-pumped, 1-micron transmitter[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5707: 237-243.
- [87] Tsunekane M, Taira T. Compact and wide temperature acceptance of VCSEL-pumped micro-laser for laser ignition[C]// Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: ATu3A.58.
- [88] 鲁绍文, 孟洁, 赵学强, 等. 高峰值功率窄脉宽宽温 Nd: GdVO₄激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401009.
- Lu S W, Meng J, Zhao X Q, et al. Temperature insensitive Nd: GdVO₄ laser with high peak power and narrow pulse width[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401009.
- [89] Lee S T, Silver M, Barron A, et al. A compact laser target designator[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9834: 98340Q.
- [90] 魏大康. 温度不敏感激光技术及单频双脉冲混合 MOPA 系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- Wei D K. Research on temperature insensitive laser technology and single frequency dual pulse hybrid MOPA system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [91] 陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL 侧面泵浦的全固态激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001001.
- Chen S L, Zhang X, Jiang J, et al. VCSEL side-pumped all solid-state laser[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 45(10): 1001001.
- [92] 乔占朵, 孟冬冬, 张铁亮, 等. 基于传导冷却端面泵浦板条和正交 Porro 棱镜谐振腔的宽温区工作激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1901006.
- Qiao Z D, Meng D D, Zhang T L, et al. Wide temperature range laser based on conduction-cooled end-pumped slab and crossed-Porro prism resonator[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 50(19): 1901006.
- [93] 吴金明. 低温对大功率光纤激光器输出特性影响的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- Wu J M. Theoretical and experimental research on high power fiber laser performance working at low temperature[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.

Research Progress on Wide Temperature Operation Fiber Laser

Wu Jinming¹, Li Fengchang¹, Wang Peng^{1,2,3}, Zhang Hanwei^{1,2,3***}, Xi Xiaoming^{1,2,3},
Yang Baolai^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3**}, Han Kai^{1,2,3}, Chen Jinbao^{1,2,3*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Significance High-power fiber lasers have been widely used in industrial processing, automobile manufacturing, national defense, scientific research, and other fields. It has been ten years since IPG Photonics demonstrated the fiber laser output of 20 kW in 2013, which is an important milestone. However, it has also marked a dark cloud in the field of high-power fiber lasers. Although fiber laser is still in full swing, it was not until 2021 that very individual units tied the record, let alone made breakthroughs. The higher output power of the laser indicates more waste heat produced in the laser, which brings thorny transverse mode instability (TMI) and many nonlinear effects such as stimulated Raman scattering (SRS), Brillouin scattering. This is a strong negative feedback mechanism, which means that it will be harder to improve the output power. Under the current limited conditions, high stability fiber laser has gradually become a demand, and researchers have gradually carried out in-depth research on the influence of temperature on fiber lasers.

Progress First, the research and results of the influence of temperature on optical fiber devices are discussed. The influence of temperature on LD is clear and direct, including the change of power and the drift of central wavelength. Optical fiber is different. The influence of small structural changes of optical fiber on devices such as gratings and combiners is difficult to be determined qualitatively. The physical parameters of optical fiber, such as thermal expansion coefficient, thermal diffusion coefficient, thermal conductivity, critical absorption, and emission cross sections, are difficult to be measured accurately. The experimental results of the central wavelength of laser diodes, the reflectivity of fiber grating, and the absorption and emission cross section of gain fiber with temperature are displayed, which is very helpful to simulate the behavior of laser at different temperatures.

Second, the research on the output efficiency of fiber lasers in a wide temperature range in China and abroad is reviewed. Among them, more studies focus on the temperature range higher than normal temperature. Under this condition, the efficiency of fiber lasers with longer wavelengths can be improved. On the contrary, some studies are based on cryogenic media such as liquid nitrogen to cool gain fibers, which often contribute to shorter-wavelength lasers. These studies are generally at a low level of output power, basically less than the order of 100 W, and the main body of temperature control is ytterbium-doped fiber (YDF).

Third, the experimental study on the effect of temperature on TMI and SRS of fiber laser is illustrated. As for TMI, the increase in the TMI threshold can be observed by fully strengthening YDF refrigeration. However, in some experimental studies, when the change in YDF cooling is not obvious, it is difficult to find the change in the TMI threshold. The influence of temperature on TMI is affected by laser structure, gain fiber type, fiber bending state, cooling condition, etc. The mechanism of the effect of operating temperature on the TMI threshold of fiber laser needs to be further studied. As for SRS, two experimental studies have demonstrated that lowering the temperature of YDF can inhibit SRS. At present, the preliminary analysis claims that the decrease in the working temperature of the optical fiber suppresses the spontaneous Raman noise and increases the stimulated Raman scattering threshold.

Forth, the research results of fiber lasers with high power and wide temperature operation in our research group are introduced. Due to the lack of research on the low temperature at present, our research group has carried out research on fiber laser which is at a wide temperature lower than room temperature based on the high-power fiber laser above kW level. In 2020, our research group demonstrated a fiber laser oscillator of 2 kW, which can maintain stable output in the temperature range of $-10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the power fluctuation is less than 7%. In 2021, our research group realized a kilowatt optical fiber oscillator with output power fluctuation of less than 7% in the range of $-30\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Conclusions and Prospects The characteristics of compact structure, small size, light weight, and flexible operation contribute to the high ease of use of fiber lasers. Due to the stagnation of the maximum output power, the development of a wider temperature range and more stable output power will become one of the development trends of optical fiber laser

technology in the coming period. Further expansion of the power and operating temperature range also requires in-depth study of the working mechanism of fiber lasers and the temperature characteristics of fiber devices. The development trend of wide-temperature operating fiber laser is prospected, and the research results provide a reference for the development of high-power wide-temperature operation fiber laser.

Key words laser optics; fiber amplifier; oscillator; wide temperature; high power