



·激光的热和力学效应·

高功率连续光纤激光系统热效应及其抑制措施*

林傲祥, 彭 昆, 俞 娟, 倪 力, 戴晓军, 向 恒

(中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 热效应是影响高功率光纤激光系统安全运行的重要因素之一。探索光纤激光系统热效应产生的源头, 积极开展热效应控制技术研究, 采取合理措施抑制热集中现象, 大幅提高光纤激光系统的模式不稳定阈值以避免模式劣化现象, 对于进一步提升光纤激光系统安全稳定输出功率具有非常重要的现实意义。以广泛使用的端面集中泵浦技术为例, 概述了高功率连续光纤激光系统的主要热效应来源, 提出了针对不同热效应需要采取的解决方案与合理化建议。最后着重介绍了长距离分布式侧面泵浦技术和泵浦增益一体化复合功能激光光纤, 展望了万瓦级超高功率光纤激光器的未来发展前景。

关键词: 光纤激光器; 热效应; 模式不稳定; 长距离分布式侧面泵浦; 泵浦增益一体化。

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210336

Thermal effect and its suppression in high-power continuous-wave fiber laser system

Lin Aoxiang, Peng Kun, Yu Juan, Ni Li, Dai Xiaojun, Xiang Heng

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Thermal effect is one of the important factors affecting the safe operation of high-power fiber laser system. Exploring the source of thermal effect of optical fiber laser system, actively carrying out research on heat-control technology, taking reasonable measures to suppress heat concentration, and greatly improving the mode instability threshold of optical fiber laser system to avoid mode degradation, are of great practical significance to further improve the safe and stable output power of optical fiber laser system. Taking widely-used concentrated end-pumping technology as an example, this paper summarizes the main sources of thermal effect of high-power continuous-wave fiber laser system, and puts forward practical solutions and reasonable suggestions for different thermal effects. Finally, this paper focuses on long-distance distributed side-pumping technology and pump-gain integrated functional fiber, and looks forward to the future development of 10 kW-level ultra-high power fiber laser.

Key words: fiber laser; thermal effect; mode instability; long-distance distributed side-pumping; pump-gain-integrated

光纤激光器是指用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的激光器, 属于固体激光器的一种, 但因为增益介质形状特殊且具有典型的技术和产业优势, 行业中一般将其与其他固体激光器分开进行研究。典型的光纤激光器主要由光学系统、电源系统、控制系统和机械结构等四个部分组成。其中, 光学系统由泵浦源、增益光纤、光纤光栅、信号/泵浦合束器及激光传输光缆等光学材料器件通过熔接形成全光纤激光器, 并在电源系统、控制系统的驱动和监控下实现激光输出。根据不同应用场景需求, 高功率连续光纤激光器结构大致包括单谐振腔结构和 MOPA 主震放大结构两种方式, 前者有利于抗高反金属加工, 后者有利于获得窄线宽高光束质量激光输出。同时, 光纤激光器根据功率大小不同采用了风冷和水冷两种不同方式, 以保证激光器在工业环境条件下可靠稳定运行。根据激射机理、器件结构和输出激光特性进行分类, 光纤激光器可分为脉冲光纤激光器和连续光纤激光器。根据输出激光功率大小不同, 可分为低功率连续光纤激光器(平均输出功率 $P < 100\text{W}$)、中功率连续光纤激光器($100\text{W} \leq$

* 收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-12-15

基金项目: 光纤激光技术所级重大专项

联系方式: 林傲祥, linaoxiang@caep.cn。

$P < 1000 \text{ W}$)、高功率连续光纤激光器 ($1000 \text{ W} \leq P < 10 \text{ kW}$) 和超高功率连续光纤激光器 ($P \geq 10 \text{ kW}$), 本文将集中讨论高功率及超高功率连续光纤激光器的热效应问题。

1990 年以来, 随着激光光纤、光纤器件、泵浦半导体等材料器件制造技术的快速发展, 连续光纤激光器的输出功率在三十年里实现了从 mW 量级至 100 kW 量级^[1-2] 的 8 个数量级的快速提升。国际上美国 IPG 公司在 2009 年率先实现了单纤单模光纤 10 kW 激光输出, 并于 2012 年前后实现了单纤少模光纤 17 kW 功率输出^[3-4]。国内的清华大学、中国工程物理研究院和中国科学院等研究机构在 2018—2019 年陆续实现了单纤 10 kW 激光功率输出^[5-7], 2020—2021 年清华大学使用中国工程物理研究院化工材料研究所研制生产的 LMA-48/400-YDF 有源激光光纤已经实现了单纤 20 kW 激光功率输出, 总体技术达到了世界先进水平^[8]。同时, 得益于效率高、光束质量好、结构紧凑、稳定免维护、成本低、易于终端批量化使用等诸多优点, 光纤激光器被广泛应用于工业、科研、医疗、国防等激光应用领域, 在工业加工市场份额已经超过 50%, 激光产业全面进入了“光纤激光时代”^[9]。

随着高功率连续光纤激光器系统输出功率超越单纤 10 kW , 激光系统中存在的热效应、非线性效应、模式不稳定现象等相继出现并关联叠加, 造成了光束质量劣化和功率提升受限等诸多“瓶颈”问题, 严重影响着高功率连续光纤激光系统的安全稳定性和长期可靠性。为进一步提升激光输出功率, 光纤激光系统将承受更大功率的泵浦光注入和能量密度更大的信号光输出, 光纤之间焊点熔接损耗、固有波长差引起的量子亏损、受激拉曼效应、光子暗化效应和背景损耗等引起的热效应是高功率光纤激光系统所面临的严峻挑战。因此, 高功率光纤激光系统中的热效应已经逐步成为激光功率提升的重要障碍, 必须寻找合适措施抑制它以降低其危害。

本文以广泛使用的端面集中泵浦技术为例, 系统概述了高功率连续光纤激光系统的热效应来源, 提出了针对不同热效应需要采取的解决方案与合理化建议。最后, 本文着重介绍了长距离分布式侧面泵浦技术和泵浦增益一体化复合功能激光光纤, 展望了万瓦级超高功率光纤激光器的未来发展前景。

1 光纤激光系统的热效应来源

1.1 量子亏损效应

2001 年 Brown D C 等提出量子亏损效应是引起光纤芯区发热的主要来源^[10]。因泵浦波长和信号光波长的固有差异, 所有光纤激光系统都会伴随一定比例的量子亏损^[11-13]。以 1080 nm 激光输出波长为例, 915 nm 泵浦波长的量子亏损比重约 15.3%, 976 nm 泵浦波长的量子亏损比重约为 9.6%, 1018 nm 泵浦波长的量子亏损比重约 5.7%。因此, 泵浦波长的选择首先决定了光纤激光系统热冗产量的大小, 这是基本的技术路线选择问题, 量子亏损是光纤激光系统的固有热量来源。

1.2 光纤熔接损耗

高功率连续光纤激光器系统使用的稀土掺杂双包层有源激光光纤 (YDF 光纤), 大多采用低折射率丙烯酸酯有机涂覆材料 (光纤涂层) 作为激光反射面和光纤保护层。kW 级连续高功率光纤激光在运行时, 并未达到光纤玻璃结构本身的损伤阈值或热承载能力极限^[14], 但却超过了光纤涂料所能耐受的热负载极限, 光纤涂料在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 临界温度以上会产生材料变性、玻璃化或表层皴裂等现象, 从而导致包层光的泄漏, 最终能引起激光器的整体烧毁^[15-17]。不同光纤之间的焊点熔接损耗是不可避免的技术缺陷, 也是理论上的必然烧毁风险点。因此, 光纤焊接工艺水平客观决定了光纤激光系统集成的整体安全性和长期可靠性。

1.3 自发辐射效应

常用光纤激光系统结构主要包括单谐振腔 (图 1) 和 MOPA 主震放大 (图 2) 两种结构类型。激光震荡的产生或激光放大过程中, 通常伴随有一定概率的自发辐射放大 (ASE) 现象。在 MOPA 结构中, 当信号光较弱时, 大量泵浦光注入可能会导致光纤自发辐射的概率升高。ASE 自发辐射光的发射方向是随机的, 不再像激光信号一样会被束缚到光纤波导结构中, 所以 ASE 增强会导致大量的自发辐射光从纤芯泄露至玻璃包层以及光纤涂层而使有机涂层过热烧毁。另外, ASE 的产生也会伴随有更多的量子亏损效应, 量子亏损增大后也会导致光纤芯区的发热加剧。在 MOPA 激光放大系统结构中, 在未开启种子光源的情况下, 直接开启 MOPA 放大级会导致 ASE 的产生并直接烧毁 YDF 光纤。因此, ASE 是导致光纤激光系统烧毁的可能热源之一。

1.4 受激拉曼散射效应

随着超高功率光纤激光器的出现, 纤芯区域的激光功率密度逐渐增大, 受激拉曼散射效应 (SRS) 随之出现并逐渐成为功率提升的主要限制因素。在高功率运行过程中, 当激光信号光功率达到 SRS 的阈值条件, 信号激光会

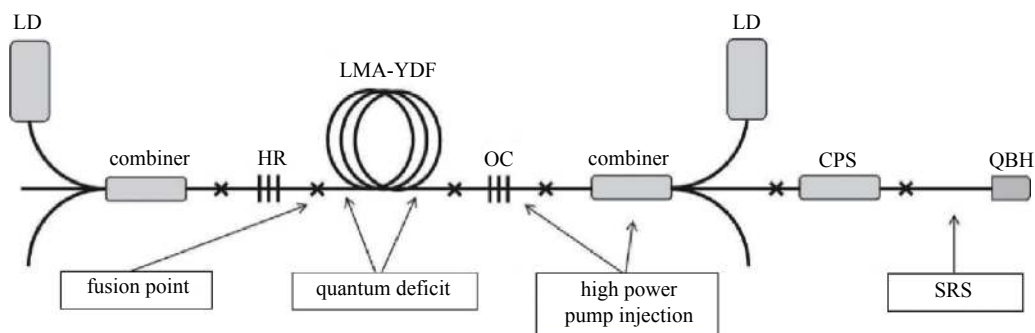


Fig. 1 Thermal effects in fiber laser oscillator
图 1 常规谐振腔结构的光纤激光器发热区域

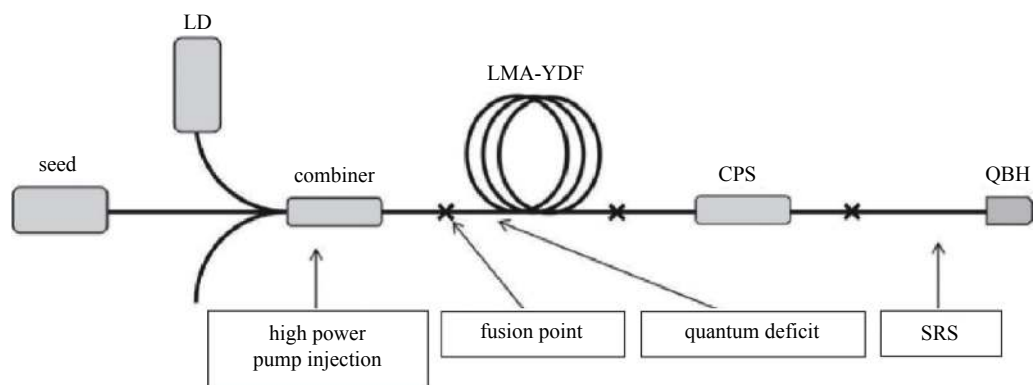


Fig. 2 Thermal effects in MOPA configuration
图 2 MOPA 结构光纤光纤激光器系统发热位置

激发并泵浦频率更低的拉曼光,从而产生拉曼光放大过程。同时,伴随着量子亏损,SRS 会加剧光纤芯区的发热问题。与增益放大过程的量子亏损不同,没有稀土离子掺杂的 GDF 无源匹配纤也会产生拉曼放大,因此 SRS 所致热效应问题已经不再局限于增益光纤中。例如工业加工机床上光纤激光输出所用的 10 m 以上传能光纤进一步降低了 SRS 产生阈值,这些部分的传能光纤如果无法得到充分冷却而造成热累积,极易造成光纤激光输出器件的烧毁^[18]。

1.5 光子暗化效应

1997 年 R Paschotta 等^[19]首次在 YDF 光纤中观察到光子暗化现象(PD)。研究发现,光子暗化现象不仅产生了附加损耗直接引起激光输出功率的降低^[20],还会引起激光系统中的抽运功率损失^[21]。普通掺镱铝硅二元体系光纤(Yb-AS 光纤)存在较为严重的光子暗化现象,引起的功率损失可达 10% 以上^[22-25]。目前通过纤芯共掺 Ce、P 等方式能部分抑制光子暗化效应,但是高功率光纤激光器在长时间的高功率运转情况下,仍然会引起一定的功率损失。由于光子暗化效应集中在 YDF 光纤的纤芯区域,其引起的能量损失最终都会进一步加剧纤芯区的热负载,从而使整个光纤激光系统面临烧毁风险。降低光子暗化效应的有效手段是增加磷(P)元素含量,营造“富氧”的配位环境以减少氧缺陷等“色芯”结构,制造“富磷少铝”的三元体系光纤 Yb-AP⁺S 光纤,或研制“纯磷无铝”的磷硅二元体系光纤 Yb-P⁺S 光纤^[8]。简而言之,光子暗化现象是除增益放大量子亏损外的另一个重要热源,属于光纤基体材料所决定的固有所征热源。

1.6 传输背景损耗

YDF 高功率光纤激光器的激光输出波长通常为 1030~1090 nm。在光纤激光传输过程中,纤芯区域的激光散射、本征吸收、模式漏光、熔接点漏光等因素都会导致光纤激光输出功率的下降。其中,纤芯区域的激光散射效应和材料本征吸收共同构成了光纤纤芯的传输背景损耗,这些损耗会导致纤芯的热负载增大和整体激光效率下降。不均匀的材料组分直接引起光纤折射率的起伏而导致激光散射损耗。水分或其他杂质等引入的材料本征吸收进一步增加了纤芯传输损耗。随着 YDF 光纤预制棒制备工艺的持续改进,YDF 大模场石英光纤在 1095、1200 和 1300 nm 处的激光传输背景损耗均已经降到 15 dB/km 以下,超低损耗 YDF 光纤传输背景损耗达到了 3 dB/km 以下^[8]。传输背景损耗和激光增益效率是一个互相制约的参数,所以,降低传输背景损耗等同于提升了光纤激光

斜率效率。

2 热效应对光纤激光系统的影响

2.1 系统安全性

前文提到光纤发热的各种原因,在激光振荡器或MOPA结构中具体表现为如图1和图2中标记的各个位置的热效应集中位置。包层光泄露引起涂层发热现象主要存在于FBG光栅与YDF光纤之间的光纤熔接点。端面集中泵浦方式中,大功率半导体二极管(LD)泵浦注入给FBG光栅及泵浦/信号合束器带来了较大的热负载压力。量子亏损效应及ASE引起的发热现象主要发生在YDF光纤上,但是沿光纤纵向的热分布并不均匀,局部区域过热甚至烧毁的风险较高。SRS引起的热效应贯穿整个光纤激光系统,其中链接激光器与激光输出头(QBH)之间的GDF无源匹配传能光纤因无法进行有效冷却而存在烧毁的风险。

2.2 应力变化

YDF光纤的各层材料成分差异,热膨胀系数互不相同,加之高功率运转过程中光纤受不均匀的热效应影响,光纤将产生轴向及径向上的应力分布^[26]。2009年X Han等人发现在光纤激光系统高功率运转过程中,芯区表现为压应力,包层表现为拉应力。当光纤内部应力超出光纤承载能力时,可能导致YDF光纤炸裂^[16]。

2.3 折射率变化

光纤芯区受温度升高、内部应力和激光功率密度过高引起的非线性效应等因素的共同影响,光纤芯区折射率分布会出现异常变化和波动。2011年K Rymann等人^[27]用数值模型模拟了高功率YDF光纤放大器中温度分布与折射率变化关系。折射率变化会引起热透镜“自聚焦”效应,进而导致光纤芯区传播模式增多,严重影响激光输出的光束质量,存在光纤自我熔断的风险。

2.4 模式不稳定

模式不稳定现象首先由德国耶拿大学在啁啾脉冲放大飞秒光纤激光系统中公开报道^[28],研究人员发现激光系统中出现模式不稳后光束质量会急剧变差,且模式不稳定具有一定的阈值性^[29]模式不稳定阈值前后如图3所示。

模式不稳定现象是目前限制光纤激光器功率进一步提升的主要限制因素之一。模式不稳定现象是光纤激光输出功率达到一定阈值后,输出光由稳定的基模变化为ms时间尺度上基模与高阶模的动态耦合过程。模式不稳定性达到阈值条件后会导致光束质量的突然退化^[30-35]。在激光放大过程中,种子光在注入到放大级时,总是会或多或少激发起一定数量的高阶模。基模和高阶模在光纤纵向传播过程中会产生干涉效应并引起光场强度的周期性分布。在LD泵浦光注入实现增益放大时,基模和高阶模相互干涉所形成的周期性强度分布将会对激光增益形成周期性提取。伴随着量子亏损发热,周期性增益提取就直接引发了热效应的周期性分布,进而通过热-光效应形成周期性的折射率分布,形成了所谓的“热致折射率光栅”。

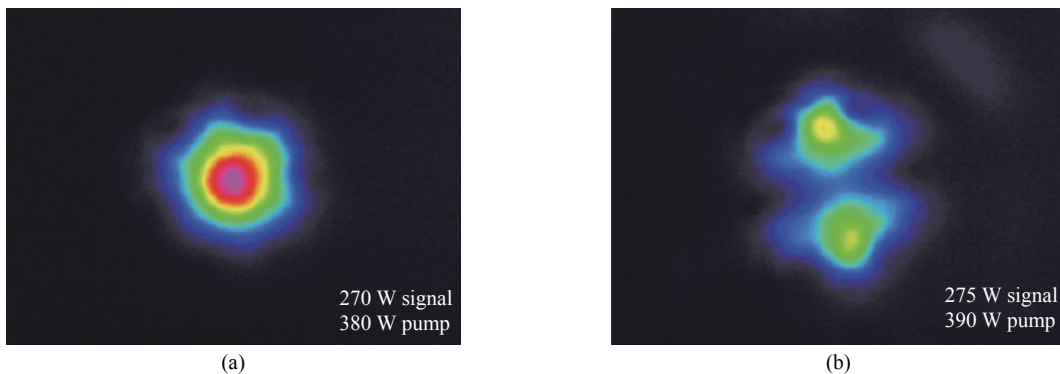


Fig. 3 Beam spots before mode instability threshold(a) and after the system reached mode instability threshold(b)^[25]

图3 模式不稳定阈值前(a),模式不稳定阈值后(b)^[25]

芯区热累积效应产生的方式主要有前文提到的增益放大的量子亏损、非线性效应、光子暗化效应以及光纤传输背景损耗等因素。其中,由增益放大量子亏损产生的热效应最强,也是引起光纤模式不稳定的主要因素。拉曼放大过程会同时存在于YDF有源光纤和GDF无源匹配光纤,进而贯穿了整个光纤激光器系统,所以SRS拉曼效应也是引起光纤激光系统模式不稳定的重要原因。2017年K Hejaz等研究了SRS受激拉曼散射与模式不稳定的关系,认为抑制拉曼光的产生能有效提高非线性阈值^[36]。另外,光子暗化效应同样是引起芯区发热的重要因素,

2013年 A Smith 等研究了光子暗化效应对模式不稳定的影响,结果表明光子暗化效应会导致模式不稳定阈值和放大器效率下降^[37]。引起模式不稳定其他因素还包括信号光波长、泵浦光波长和 YDF 光纤结构等^[38-40]。

3 热效应解决方案

3.1 激光热沉设计

为了降低光纤热效应带来的不利影响,需要针对光纤熔接点及量子亏损引起发热的 YDF 有源激光光纤段进行表面散热。超高功率连续光纤激光器的量子亏损热积累非常严重,在没有采取有效散热措施保护的情况下,光纤表面的有机涂层会迅速变性,直接导致光纤激光系统烧毁失效。

光纤激光器的散热方式主要包括自然对流、风冷导热、水冷导热、相变蓄冷、TEC 冷却等多种方式^[41-42]。功率较低的种子级光纤激光器的发热量较小,可以简单采用空气对流散热方式。中低功率光纤激光器为了减少系统的复杂程度和重量,一般会采用风冷导热的方式。风冷光纤盘绕板背面是密集的齿状结构,风扇加速散热齿的空气流动达到散热的目的。大功率光纤激光器的 YDF 光纤长期处于高热负载状态,水冷散热板能将热量快速带走以降低光纤表面温度^[43-44]。在系统体积重量严格受限且不能使用液体冷却的特殊应用场景中,相变蓄冷材料可以用于光纤短时间快速散热。TEC 散热相比其他散热方式更加稳定准确,一般运用于需要精准控温或局部冷却的情况^[45],却较难满足大功率的散热需求。

常见光纤激光系统中使用的 YDF 增益光纤长度在数 m 到数十 m 不等,需将光纤盘绕于冷却板上进行散热。光纤盘绕板的设计将直接影响光纤的散热效果,通常有方形、U 型和 V 型三种凹槽结构(如图 4 所示),研究表明 U 型结构能减少光纤与冷却板之间的空隙,减少导热膏填充厚度,因而具有更好的散热效果^[44]。

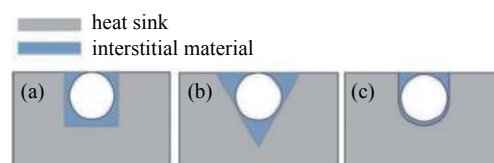


Fig. 4 Different kinds of fiber colling groove structures^[44]

图 4 光纤冷却凹槽的不同结构^[44]

3.2 双向端面集中泵浦

我国工业激光市场上使用的连续光纤激光器,大多采用端面集中泵浦注入方案,激光系统的主要发热区是泵浦能量注入点以及注入点后的一段 YDF 有源光纤。为了减小泵浦注入点附近的热负载,可采用双向泵浦方案实现激光输出。双向泵浦方式是将泵浦光从正向和反向的双向同时注入到 YDF 光纤,降低单向泵浦注入能量过大的光纤熔点烧毁风险。另外,双向泵浦注入方式能使 YDF 光纤在纵向方向上获得更均匀的热区分布。双向泵浦注入方式不但可以增强系统安全性,大幅提高激光输出功率,还可以有效抑制光学非线性效应并提高模式不稳定性阈值。基于双向泵浦注入方式,国产光纤激光器以 LMA-20/400-YDF 光纤可以实现 3 kW 激光输出,以 LMA-25/400-YDF 光纤可以实现 5 kW 激光输出,同时可以保持近单模衍射极限的光束质量,代表了国产工业光纤激光器的最高系统集成水平。

3.3 1018 nm 激光同带泵浦

除了 LD 泵源本身发热外,连续光纤激光系统的最大热源是增益放大的量子亏损效应。因成本控制需要,工业光纤激光器的常用泵源通常选用 915 nm-LD 和 976 nm-LD 产品,但不同波长的 LD 泵源所引起的量子亏损效应是明显不同的。采用 915 nm-LD 和 976 nm-LD 放大 1064 nm 激光带来的量子亏损分别约为 14% 和 8.3%,所以 976 nm-LD 泵源能有效降低系统的量子亏损发热。同时,YDF 光纤在 976 nm 波长处的泵浦吸收系数是 915 nm 波长处的三倍左右,可大幅缩短 YDF 光纤的使用长度进而提高系统的非线性阈值。目前,976 nm-LD 泵源的市场产品价格已经接近 915 nm-LD 泵源,因此,越来越多的工业光纤激光器开始选择采用 976 nm-LD 泵源,可以满足 5~10 kW 单纤激光输出功率要求。

面对 10 kW 以上超高功率光纤激光输出需求,为降低量子亏损效应需要采用 1018 nm 光纤激光同带泵浦。以 1018 nm 光纤激光同带泵浦放大获得 1080 nm 信号激光,量子亏损效应仅为 5.7%,远低于 915 nm-LD 和 976 nm-LD 波长泵浦方式,因而其光纤激光系统本身的热管理相对容易了很多,安全性和稳定性获得大幅提升。2020 年 10 月林傲祥、肖起榕等基于国产自研 LMA-48/400-YDF 光纤采用 1018 nm 同带泵浦方案实现了单纤 20 kW 级激光输出(如图 5 所示)^[8],2021 年 7 月单纤激光输出功率再次突破 23 kW,实验结果进一步证明了 1018 nm 同带泵浦方案在减少增益光纤热负载、提升输出功率阈值和确保优质光束质量等方面具有巨大优势,为超高功率连续光纤激光器研发提供了典型示范。目前,业界更加关注的问题是如何获得低成本 1018 nm 光纤激光泵源。

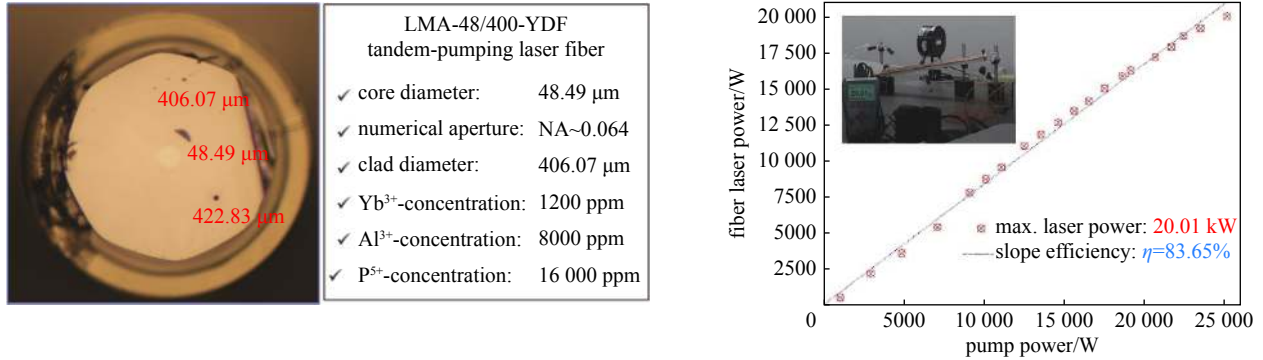


Fig. 5 20 kW laser output of local LMA-48/400-YDF fiber by 1018 nm-tandem-pumping^[8]

图 5 国产 LMA-48/400-YDF 激光光纤采用 1018 nm 同带泵浦实现 20 kW 激光输出^[8]

3.4 氟层辅助三包层光纤

氟层辅助三包层光纤结构是在大模场双包层光纤结构的基础上,在其外表面增加了一层含氟的低折射率玻璃包层(第二玻璃包层),连同原来的更低折射率有机涂层共同构成了三包层反射光波导结构(如图 6 所示)。氟层辅助三包层光纤的最大优势是大部分泵浦光在传输过程中被约束在第一玻璃包层以内,少部分泵浦光会进入到含氟的第二玻璃包层内传播。在含氟第二玻璃包层的强力保护作用下,光纤熔接点扰动所导致的包层泵浦光泄露到涂层的概率大幅降低,减轻了光纤低折射率有机涂层的反射光和热负载压力,可以有效地保护光纤有机涂层,从而大幅提升超高功率连续光纤激光系统的整体安全性^[46-47]。

目前,氟层辅助三包层 MM-LMA-34/460/530-YTF 光纤^[48],广泛用于集成 6~10 kW 级高功率连续光纤激光器研发与生产。2021 年张磊等基于自研 50/350/400 μm 氟层辅助三包层光纤,采用双向 1018 nm 同带泵浦实现约 9 kW 激光输出(图 7)^[49],进一步证明氟层辅助三包层光纤结构相较于普通双包层光纤的独特优势。

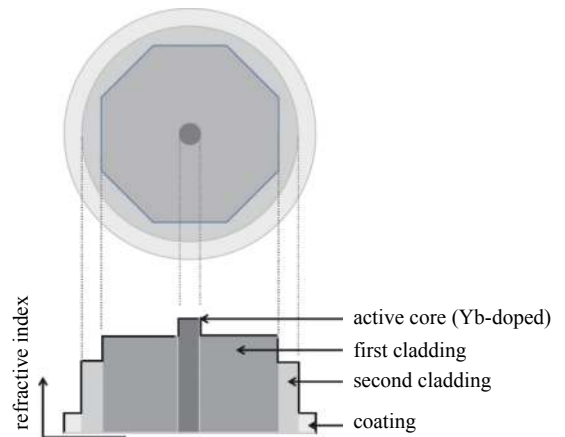


Fig. 6 F-layer assisted triple-clad laser fiber

图 6 氟层辅助三包层光纤的基本结构

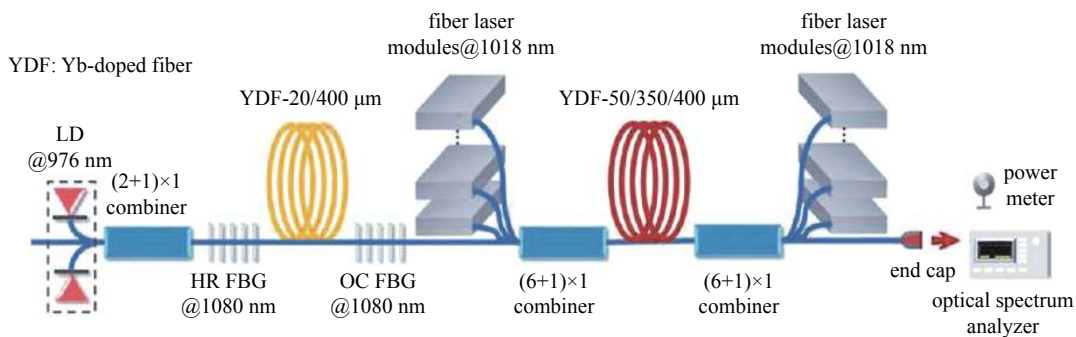


Fig. 7 High-power laser system using F-layer-assisted triple-clad fiber^[49]

图 7 氟层辅助三包层高功率光纤激光系统^[49]

3.5 长距离分布式侧面泵浦

工业光纤激光器最常见的泵浦方式为端面集中泵浦技术,该方式具有熔接处理简单、成本低廉、兼容性强等优点。但是,当大量 LD 泵浦光从单个熔接点一次性注入到 YDF 有源光纤时,光纤之间的熔接点及 YDF 有源光纤纵向热负载分布是极不均匀的。端面集中泵浦技术给高功率光纤激光系统带来了不可避免的安全隐患。同时,过于集中的能量注入使得光纤的非线性效应陡增,模式不稳定性阈值也相对较低。简而言之,端面集中泵浦方式是工业光纤激光器发展的“权宜之计”,尽管可以满足现有 kW 级高功率光纤激光器的需求,却无法长期有效地满足 10 kW 级超高功率光纤激光系统的未来发展需求。

为解决端面集中泵浦能量过于集中的固有热效应缺陷,国内外陆续开发了多种结构的侧面泵浦方案^[50]。根据耦合方式的不同,可以进一步细分为V型槽耦合、嵌入反射镜耦合、角度磨抛耦合以及倏逝波耦合等^[51-54]。基于倏逝波耦合原理的侧面泵浦技术是国际上最为先进、输出功率最高的侧面泵浦技术路线。2002年英国南安普顿大学率先开发了该项技术并申请了专利技术保护,将其具备该结构的特种光纤命名为“GTwave 光纤”^[55],之后英国 SPI 公司以及美国 IPG 公司也陆续开发了各种类型的 GTwave 光纤材料器件^[56-58]。2009年美国 IPG 公司通过 1018 nm 激光泵源实现了高亮度泵浦注入,基于侧面泵浦技术实现了单纤单模 10 kW 激光输出(图 8)^[59]。2012年美国 IPG 公司报道了单纤少模 17 kW 激光输出,虽然并未明确描述其所采用的具体泵浦方案,但可推测仍为侧面泵浦方式^[60]。

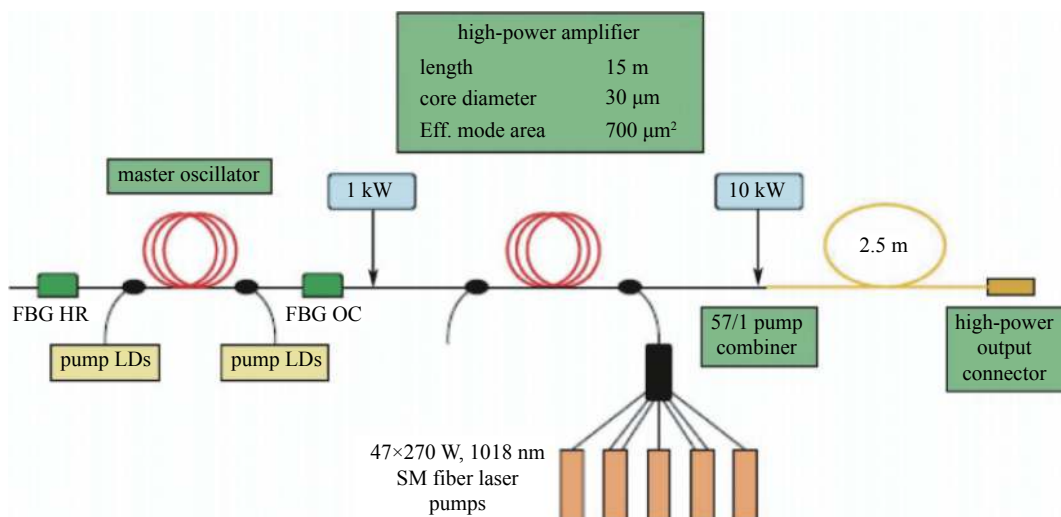


Fig. 8 10kW-level side pumping technique of IPG company, USA^[56]

图 8 美国 IPG 公司 10kW 侧面泵浦光纤激光方案^[56]

国内的中国工程物理研究院、清华大学、国防科技大学等单位也相继开展了侧面泵浦技术路线的实验研究^[6, 60-73]。2013年国防科技大学与中国电子科技集团 23 研究所合作研发的 GTwave 光纤,获得了百瓦级激光输出^[74]。2018年国防科技大学潘志勇研究团队研制的多级泵浦的 GTwave 光纤将激光振荡器输出功率提升到了 4 kW 量级(图 9)^[75]。

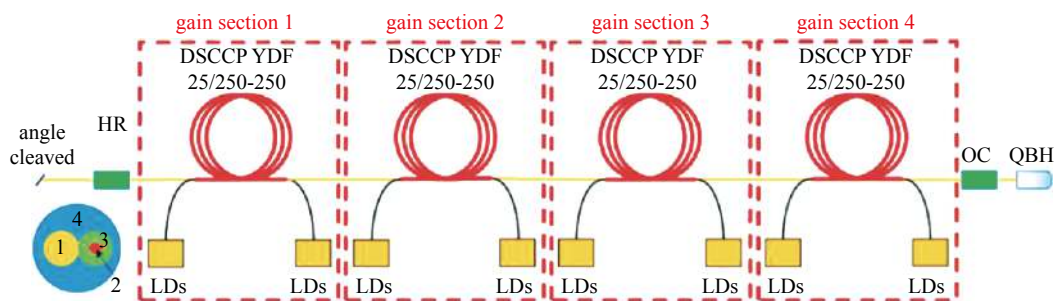


Fig. 9 Configuration of GTwave cascaded fiber oscillator^[72]

图 9 GTwave 级联光纤激光振荡器^[72]

基于长距离分布式侧面泵浦技术,2011—2018年中国工程物理研究院林傲祥研究团队陆续设计并制备了(N+1)型泵浦增益一体化复合功能激光光纤(PIFL 光纤),可以实现“2N 路、多端、双向、任意波长、超大泵浦功率泵浦注入”。

PIFL 光纤结构设计灵活多变,极大地拓展了光纤泵浦注入能力,克服了常规 LD 泵源的泵浦亮度受限问题,最终可获得万瓦级超高功率连续光纤激光稳定输出。林傲祥团队先后成功设计并制备了(3+1)型、(6+1)型和(8+1)型 PIFL 光纤样品(图 10),在 2018年基于(8+1)型结构顺利实现了单纤 11.23 kW 高品质激光输出,线宽可控,斜率效率呈线性分布^[5-6],充分证明了长距离分布式侧面泵浦技术的先进性和可行性,为 10 kW 级以上超高功率连续光纤激光器的研制奠定了坚实的技术基础(图 11 和图 12)。

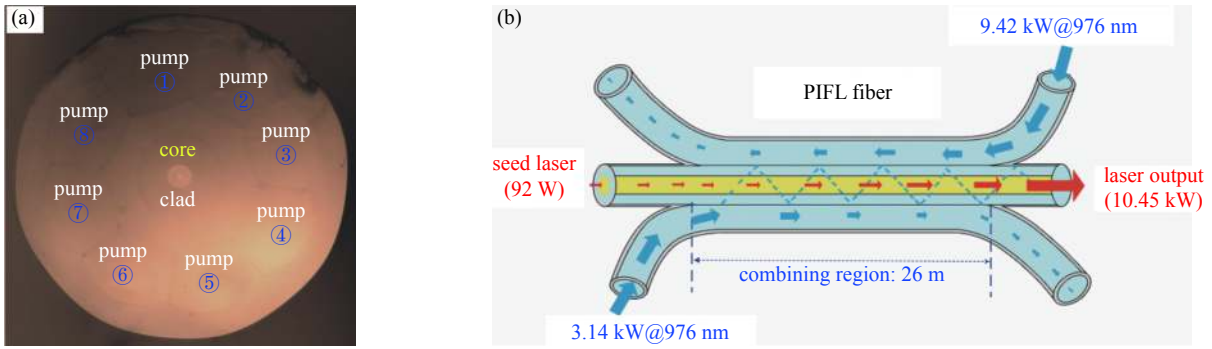


Fig. 10 (8+1) Pump gain Integrated Functional Laser (PIFL) fiber: (a) end cross-section; (b) pump-coupling method^[5-6]

图 10 (8+1) 型泵浦增益一体化复合功能激光光纤: (a) 实物端面示意图; (b) 泵浦耦合示意图^[5-6]

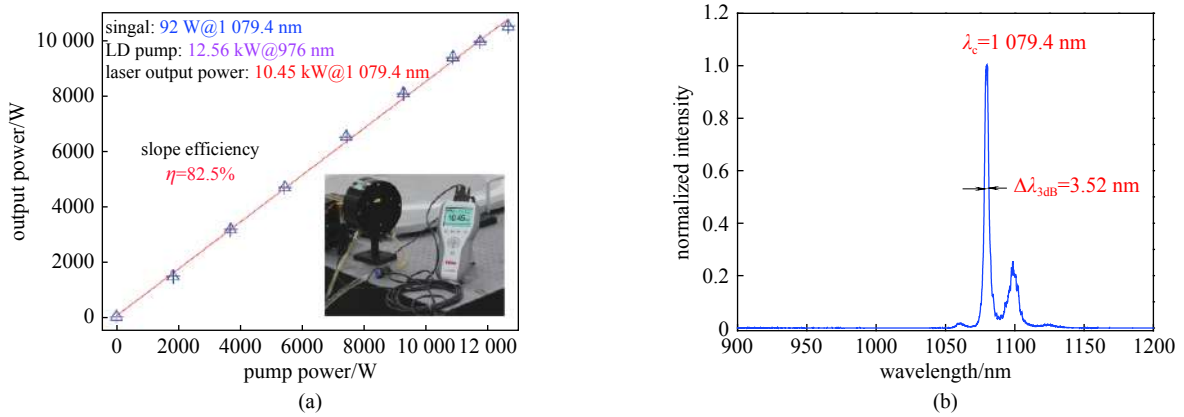


Fig. 11 (8+1) PIFL fiber laser: (a) output signal power and optical-to-optical efficiency; (b) laser beam spectrum^[5-6]

图 11 万瓦级 (8+1) 型 PIFL 光纤的现场测试数据: (a) 信号输出功率及功率率示意图; (b) 激光光谱^[5-6]

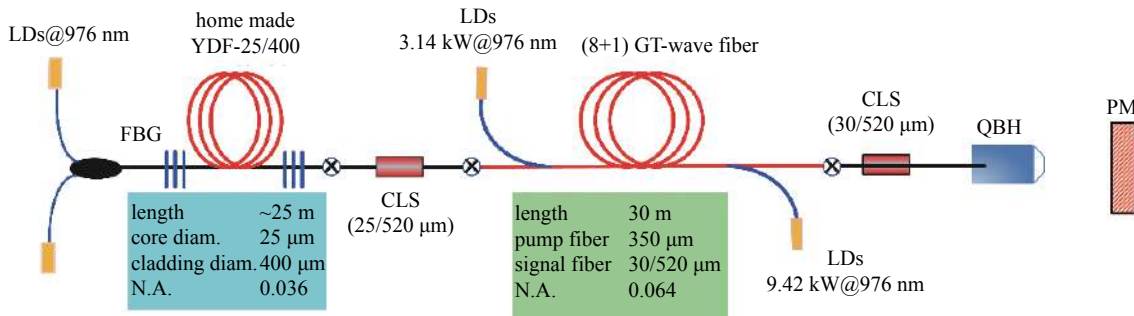


Fig. 12 10 kW-level PIFL fiber laser configuration^[5-6]

图 12 10 kW 级 PIFL 光纤激光系统结构^[5-6]

无论是主震放大(MOPA)结构还是单谐振腔结构的光纤激光系统中,侧面泵浦技术相较于端面泵浦技术都有其独特的技术优势和更优秀的热管理效果(图 13)。在 MOPA 结构中,PIFL 光纤通常被用于放大级。研究表明,分布式长距离侧面泵浦方案比端面集中泵浦方案具有更加均匀的泵浦吸收过程和热量分散效果。在双向泵浦情况下,热均匀分布的优势将更加明显,也会获得更高的模式不稳定阈值^[61]。光纤激光系统中未被完全吸收的残余泵浦光可以用泵浦纤将其导出光纤激光系统之外,这样便不会转嫁给光纤有机涂层形成余热而升温,同时也大幅降低了包层光剥离器的滤波压力。

在特殊激光应用场景中,客观上要求大幅缩短 YDF 光纤长度,以获得高光束质量、高非线性效应阈值和极窄光谱线宽。长距离分布式侧面泵浦技术容许在较短长度和较高残余泵浦的情况下使用,采用全反向泵浦注入方式可以将 YDF 光纤有效使用长度 L_{eff} 严格控制在 3~10 m 范围内,从而可以获得光束质量优良、线宽可控和无 SRS 拉曼效应的窄线宽激光输出效果(图 12)^[76]。

为了实现对铝、铜等高反射金属材料的加工能力,工业光纤激光器普遍采用单谐振腔结构实现抗高反功能。在端面泵浦技术方案中,高能量密度信号光的输入输出和高功率的泵浦能量注入需要同时经过 FBG 光栅和多个

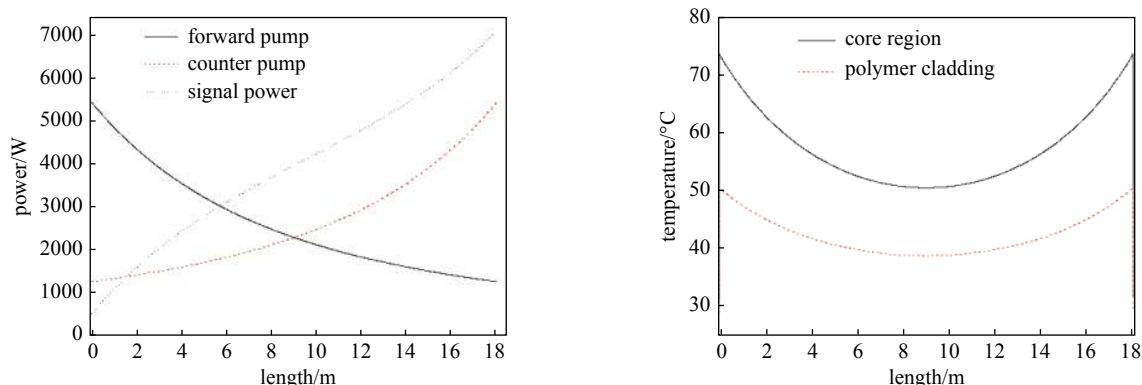


Fig. 13 (a) absorption evolution; (b) temperature distribution of core region and polymer clad along PIFL fiber^[71]

图 13 PIFL 光纤纵向的 (a) 包层泵浦吸收和 (b) 热分布及实测表面温度^[71]

光纤熔接焊点, 让整个光纤激光系统面临烧毁风险。如图 14 所示的侧面泵浦谐振腔结构中, 高功率泵浦能量可以避开 FBG 光栅而直接注入到谐振腔的 YDF 光纤中形成激光振荡, 加之数量更少的光纤熔接点, 侧面泵浦结构的谐振腔光纤激光器将具有更好的热管理效果, 具有输出更高激光输出功率的发展潜力^[76]。若将具有残余泵浦尾纤进行对接“尾-尾相接”, 则可以实现非对称的双端侧面泵浦效果, 真正实现包层泵浦光的“百分百”全利用, 以提高整个光纤激光器系统的电-光转换效率。

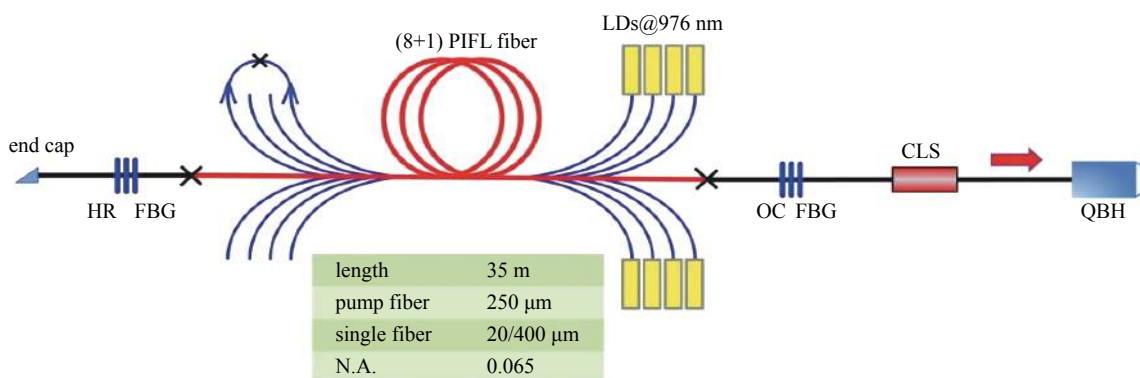


Fig. 14 (8+1) PIFL oscillator structure^[76]

图 14 (8+1) 型 PIFL 谐振腔激光结构^[76]

4 总结与展望

随着连续光纤激光系统输出功率的不断攀升, 光纤激光系统累积的热效应越来越引起人们的关注。光纤激光热效应不是独立的热负载过高或散热不足的问题, 而是与 YDF 有源激光光纤的泵浦吸收速率、量子亏损效应、泵浦波长选择、光学非线性效应及模式不稳定等多种因素密切相关。热效应会引起 YDF 有源激光光纤的应力变化、折射率变化及模式不稳定等问题, 影响着整个光纤激光器的产品性能和系统安全。本文概述了光纤激光系统中热效应的主要来源, 如光纤焊点发热、自发辐射效应、量子亏损效应、受激拉曼散射、光子暗化效应、纤芯传输背景损耗等多个方面, 部分热源会引起光纤有机涂层发热直至烧毁, 部分热源会引起芯区发热产生热致光栅效应, 不同热源之间也可能相互关联并叠加。

为了有效降低高功率连续光纤激光系统的热累积问题, 本文提出了光纤散热优化、双向端面泵浦注入结构、1018 nm 同带泵浦技术、氟层辅助三包层光纤、长距离分布式侧面泵浦技术等多个可行的解决途径。基于倏逝波耦合原理和长距离分布式侧面泵浦技术, 本文着重介绍了泵浦增益一体化复合功能激光光纤 (PIFL 光纤) 及其激光输出实验的最新研究进展。相比于端面集中泵浦方式, 全反向泵浦的 PIFL 复合功能激光光纤谐振腔和 MOPA 放大结构, 自身无泵浦波长选择性, 能够实现超大泵浦能量的均匀注入, 能有效降低 FBG 光栅热负载, 大幅提高系统的非线性阈值和模式不稳定性阈值, 全反向泵浦可大幅提高电-光转换效率, 进而获得万瓦级光纤激光输出。随着特种光纤产品制备工艺的逐渐成熟, PIFL 复合功能激光光纤产品即将逐渐进入市场, 万瓦级超高功率光纤激光器将成为未来市场的主流激光产品。

参考文献:

- [1] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [3] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10kW[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2009. Optical Society of America, 2009: CThA3.
- [4] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO: Applications and Technology 2013. Optical Society of America, 2013: AF2J. 1.
- [5] Zhan H, Peng K, Liu S, et al. Pump-gain integrated functional laser fiber towards 10 kW-level high-power applications[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 095107.
- [6] 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 060101. (Lin Aoxiang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 060101)
- [7] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化10 kW光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0336001. (Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0336001)
- [8] 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: 0916003. (Lin Aoxiang, Xiao Qirong, Ni Li, et al. Single-fiber 20kW laser output of domestic YDF active fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0916003)
- [9] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [10] 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.
- [11] Brilliant N A, Lagonik K. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1669-1671.
- [12] Canat G, Mollier J C, Jaouën Y, et al. Evidence of thermal effects in a high-power Er³⁺-Yb³⁺ fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3030-3032.
- [13] Beier F, Heinzig M, Walbaum T, et al. Determination of thermal load from core temperature measurements in single mode ytterbium-doped fiber amplifiers[C]//Advanced Solid State Lasers. Optical Society of America, 2015: ATTh2A. 23.
- [14] 薛冬, 周军, 楼祺洪, 等. 高功率双包层光纤激光器热效应及功率极限[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(7): 1013-1018. (Xue Dong, Zhou Jun, Lou Qihong, et al. Thermal effect and power limit in high power double-clad fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(7): 1013-1018)
- [15] Fan Yuanyuan, He Bing, Zhou Jun, et al. Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15162-15172.
- [16] 韩旭, 冯国英, 韩敬华, 等. 高功率掺镱双包层光纤激光器中光纤损伤及其理论分析[J]. *光子学报*, 2009, 38(10): 2468-2472. (Han Xu, Feng Guoying, Han Jinghua, et al. Fiber damage and theoretical analyses for high power Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2468-2472)
- [17] 胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 8-18. (Hu Zhitao, He Bing, Zhou Jun, et al. Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 8-18)
- [18] Ter-Mikirtychev V. Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers[M]. Cham: Springer, 2019.
- [19] Paschotta R, Nilsson J, Barber P R, et al. Lifetime quenching in Yb-doped fibres[J]. *Optics Communications*, 1997, 136(5/6): 375-378.
- [20] Jelger P, Engholm M, Norin L, et al. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(2): 338-342.
- [21] Li Nanxi, Yoo S, Yu Xia, et al. Pump power depreciation by photodarkening in ytterbium-doped fibers and amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 115-118.
- [22] 朱宗玖, 许立新, 毛庆和, 等. 高掺杂浓度掺镱光纤的光子暗化效应[J]. *光子学报*, 2007, 36(1): 26-29. (Zhu Zongjiu, Xu Lixin, Mao Qinghe, et al. Photodarkening in ytterbium-doped fiber with high doping concentration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 26-29)
- [23] Chen Gui, Xie Lu, Wang Yibo, et al. Photodarkening-induced absorption and fluorescence changes in Yb fibers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30: 104208.
- [24] 李海清, 陈瑰, 王一礴, 等. 光纤中光子暗化效应研究[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(4): 26-30. (Li Haiqing, Chen Gui, Wang Yibo, et al. Study on the photo-darkening in fiber[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(4): 26-30)
- [25] 尤洁, 于海龙, 王小林, 等. 掺稀土光纤的光子暗化研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 010003. (You Jie, Yu Hailong, Wang Xiaolin, et al. Advance in study on photodarkening of rare-earth doped fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 010003)
- [26] Jeong Y, Baek S, Dupriez P, et al. Thermal characteristics of an end-pumped high-power ytterbium-sensitized erbium-doped fiber laser under natural convection[J]. *Optics Express*, 2008, 16(24): 19865-19871.
- [27] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Thermo-optical effects in high-power Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23965-23980.
- [28] 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.
- [29] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2kW[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [30] 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.
- [31] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, et al. Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15710-

15722.

- [32] Stutzki F, Otto H J, Jansen F, et al. High-speed modal decomposition of mode instabilities in high-power fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4572-4574.
- [33] Tao Rumao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, et al. Study of mode instabilities in high power fiber amplifiers by detecting scattering light[C]//Fiber-Based Technologies and Applications 2014. Optical Society of America, 2014: FTh2F. 2.
- [34] 陶汝茂, 周朴, 肖虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 020001. (Tao Rumao, Zhou Pu, Xiao Hu, et al. Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 020001)
- [35] 史尘, 陶汝茂, 王小林, 等. 光纤激光模式不稳定的新现象与新进展[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0201004. (Shi Chen, Tao Rumao, Wang Xiaolin, et al. New progress and phenomena of modal instability in fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0201004)
- [36] Hejaz K, Shayganmanesh M, Rezaei-Nasirabad R, et al. Modal instability induced by stimulated Raman scattering in high-power Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5274-5277.
- [37] Smith A V, Smith J J. Mode instability thresholds of fiber amplifiers[C]//Proceedings of SPIE 8601, Fiber Lasers X: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2013: 860108.
- [38] Brar K, Savage-Leuchs M, Henrie J, et al. Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high-power fiber amplifiers based on large mode area fibers[C]//Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2014: 89611R.
- [39] Otto H J, Modsching N, Jauregui C, et al. Wavelength dependence of maximal diffraction-limited output power of fiber lasers[C]//Advanced Solid State Lasers 2014. Optical Society of America, 2014: AM5A. 44.
- [40] Hejaz K, Norouzey A, Poozesh R, et al. Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2014, 24: 025102.
- [41] 陈爽, 冯莹. 高功率光子晶体光纤激光器温度分布研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(6): 1134-1138. (Chen Shuang, Feng Ying. Temperature distribution in high power photonic crystal Fiber Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6): 1134-1138)
- [42] Fey A, Ulrich S, Jahn S, et al. Numerical analysis of temperature distribution during laser deep welding of duplex stainless steel using a two-beam method[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(4): 623-632.
- [43] Fan Yuanyuan, He Bing, Zhou Jun, et al. Efficient heat transfer in high-power fiber lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(11): 111401.
- [44] 代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40: 0502003. (Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, et al. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40: 0502003)
- [45] Li L, Li H, Qiu T, et al. 3-dimensional thermal analysis and active cooling of short-length high-power fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3420-3428.
- [46] Liu Shuang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. Fabrication and laser performance of triple-clad Yb-doped aluminophosphosilicate fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 297-301.
- [47] Laperle P, Paré C, Zheng Huimin, et al. Yb-doped LMA triple-clad fiber for power amplifiers[C]//Proceedings of SPIE 6453, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2007: 645308.
- [48] Kalyoncu S K, Mete B, Yemay A. Diode-pumped triple-clad fiber MOPA with an output power scaling up to 4.67 kW[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1870-1873.
- [49] 张磊, 楼风光, 王孟, 等. 同带泵浦的千瓦级三层掺镱光纤[J]. *中国激光*, 2021, 48: 1315001. (Zhang Lei, Lou Fengguang, Wang Meng, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 1315001)
- [50] 黄值河, 曹涧秋, 陈金宝. 高功率GTWave光纤激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401010. (Huang Zhihe, Cao Jianqiu, Chen Jinbao. Research progress on high-power GTWave fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401010)
- [51] Ripin D J, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(25): 2204-2205.
- [52] Koplou J P, Moore S W, Kliner D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(4): 529-540.
- [53] Hakimi F, Hakimi H. Side pumped optical amplifiers and lasers: 6370297[P]. 2002-04-09.
- [54] Herda R, Liem A, Schnabel B, et al. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(3): 276-277.
- [55] Codemard C, Yla-Jarkko K, Singleton J, et al. Low noise, intelligent cladding pumped L-band EDFA[C]//Proceedings of the 28th European Conference on Optical Communication. IEEE, 2002: 1-2.
- [56] Norman S, Zervas M N, Appleyard A, et al. Latest development of high-power fiber lasers in SPI[C]//Proceedings of SPIE 5335, Fiber Lasers: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2004: 229-237.
- [57] Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness[C]//Proceedings of 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe. IEEE, 2005: 508.
- [58] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers. 2009: 2.
- [59] Ferin A, Gapontsev V, Fomin V, et al. 17 kW CW laser with 50 μm delivery[C]//Proceedings of the 6th Int. Symp. on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, IPG Photonics Corporation. 2012.
- [60] Huang Zhihe, Cao Jianqiu, Guo Shaofeng, et al. The characteristics of pump light in side-coupled cladding-pumped fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(4): 293-297.
- [61] Huang Zhihe, Cao Jianqiu, Guo Shaofeng, et al. Comparison of fiber lasers based on distributed side-coupled cladding-pumped fibers and double-cladding

- fibers[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2187-2195.
- [62] Huang Zhihe, Cao Jianqiu, An Yingye, et al. A kilowatt all-fiber cascaded amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1683-1686.
- [63] 陈金宝, 曹涧秋, 潘志勇, 等. 全国产分布式侧面抽运光纤激光器实现千瓦输出[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0219002. (Chen Jinbao, Cao Jianqiu, Pan Zhiyong, et al. Domestic kW-level output of distributed side pumped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0219002)
- [64] Ying Hanyuan, Yu Yu, Cao Jianqiu, et al. 2 kW pump-light-stripper-free distributed side-coupled cladding-pumped fiber oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14: 065102.
- [65] 陈金宝, 曹涧秋, 潘志勇, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现2kW的功率输出[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0415002. (Chen Jinbao, Cao Jianqiu, Pan Zhiyong, et al. 2kW multistage cascade distributed side-pumped optical fiber oscillator based on domestic optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0415002)
- [66] 陈金宝, 曹涧秋, 黄值河, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现强拉曼抑制的3 kW量级功率输出[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0315002. (Chen Jinbao, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. 3 kW laser output of multistage cascaded distributed side pumped fiber oscillator based on domestic optical fiber with strong Raman suppression[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 0315002)
- [67] Chen Heng, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. 3-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillator with high SRS suppression[C]//Proceedings of 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). 2018.
- [68] Chen Heng, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. Experimental investigations on multi-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators[J]. *Laser Physics*, 2019, 29: 075103.
- [69] 陈霄, 肖起榕, 金光勇, 等. 光纤激光器侧面泵浦(N+1)×1耦合器泵浦臂数量[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(2): 190-193. (Chen Xiao, Xiao Qirong, Jin Guangyong, et al. The pump arm numbers of (N+1)×1 couplers[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(2): 190-193)
- [70] Zhan Huan, Wang Yuying, Peng Kun, et al. 2 kW (2+1) GT-wave fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13: 045103.
- [71] Zhan Huan, Liu Qinyong, Wang Yuying, et al. 5kW GTWave fiber amplifier directly pumped by commercial 976nm laser diodes[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27087-27095.
- [72] Zhan Huan, Peng Kun, Wang Yuying, et al. 6kW GTWave fiber amplifier[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2017. Optical Society of America, 2017: M1A. 3.
- [73] Lin Aoxiang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[C]//Proceedings of 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). IEEE, 2018: 1-3.
- [74] Chen Heng, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. 4-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators[C]//Advanced Solid State Lasers 2018. Optical Society of America, 2018: AM6A. 18.
- [75] 余宇, 黄值河, 曹涧秋, 等. 双向分布式侧面抽运单模光纤放大器的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 108-112. (Yu Yu, Huang Zhihe, Cao Jianqiu, et al. Experimental study on bidirectional distributed side-pumped single mode optical fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 108-112)
- [76] Peng Kun, Zhan Huan, Wang Xiaolong, et al. (8+1) pump-gain integrated functional fiber oscillator[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2018. Optical Society of America, 2018: Su1A. 3.