

高功率光纤激光器热效应的研究进展

胡志涛^{1,2} 何兵² 周军^{2,3*} 张建华¹

¹ 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

² 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

³ 南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 为实现光纤激光器的高功率输出, 光纤热效应是必须考虑的重要因素之一, 研究高功率光纤激光器的温度分布特性并对产生的热量采取相应抑制措施, 以保证高功率光纤激光器在合适的温度下正常运行, 对研究高功率光纤激光器具有重要意义。对已报道的主要的高功率光纤激光器热效应相关研究进行了综述, 逐类说明了光纤温度理论研究、热效应对光纤激光器输出特性的影响以及热效应的抑制方法, 讨论了这些研究中存在的优缺点, 并对其未来的研发趋势进行了展望。

关键词 激光器; 光纤激光器; 热效应; 散热设计

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080002

Research Progress in Thermal Effect of High Power Fiber Lasers

Hu Zhitao^{1,2} He Bing² Zhou Jun^{2,3} Zhang Jianhua¹

¹ School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³ Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract Thermal effect of fiber lasers should be taken into account in order to achieve high power output. Research of the thermal distribution and the control measures available are of great significance for normal and stable operation of the high power fiber lasers. We review the primary reported studies related to thermal effect of the high power fiber lasers, and introduce the fiber temperature theory, impact of the thermal effect on the output properties of fiber lasers, and the approaches for thermal effect controlling. Meanwhile, their merits and drawbacks are discussed, and the development prospect is predicted.

Key words lasers; fiber lasers; thermal effect; heat dissipation design

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.6810

1 引言

光纤激光器具有结构紧凑、稳定性好、转换效率高、光束质量好、易于散热等优点, 在激光先进制造、激光医疗、国防军事等领域有着重要应用, 是目前激光技术领域最为热门的研究方向之一。

光纤激光器采用细长的掺杂光纤作为增益介质, 其表面积/体积比是传统的固体块状激光器的 1000 倍

收稿日期: 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-04-05; **网络出版日期:** 2016-07-15

基金项目: 国家 863 计划(2014AA041901)、国家自然科学基金(U1330134, 61308024)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)

作者简介: 胡志涛(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器热管理及结构轻量化方面的研究。

E-mail: lohashzt@163.com

导师简介: 张建华(1972—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电材料器件与系统、先进封装等方面的研究。

E-mail: jhzhang@shu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: junzhousd@siom.ac.cn

以上,因此散热性能良好。对于百瓦量级的光纤激光器而言,自然散热即可满足散热要求。近年来,双包层光纤激光器快速发展,其输出功率逐年提高,单根光纤激光输出功率达到数百瓦甚至千瓦量级,但由于量子亏损,光纤会产生严重的热效应^[1-3]。基质材料热扩散引起应力和折射率变化^[1],低折射率的聚合层容易发生热损伤,严重时会导致光纤热炸裂^[4];随着热量不断累积,掺杂纤芯温度会升高,激光下能级的粒子数增加导致激光器阈值功率提高和斜率效率下降,同时量子效率降低会引起输出波长的变化^[2,5-6]。因此,在高功率光纤激光器的研究中,热效应的研究尤为重要,光纤内部温度和热量的分布以及采取有效措施来抑制光纤热效应的影响成为关键要素。

本文综述了近年来国内外高功率光纤激光器热效应的相关研究,包括光纤温度分布特性、热效应对光纤激光器输出特性的影响以及有效抑制热效应的方法等。讨论了不同热管理技术的优缺点,并在理论和实验研究的相关方面进行了展望。

2 光纤激光器光纤温度分布

2.1 理论模型的探究

双端抽运的理论模型主要通过抽运功率的轴向理论模型来研究光纤温度的轴向分布^[6-8]。如图1所示,假设有源光纤的热生成可视为均匀产生于纤芯, a 、 b 、 c 分别为光纤的纤芯、内包层和外包层半径。在光纤长度较小的 dL 纤芯区域内产生的热量即为该区域的热功率密度 q ,热负载为 q' ,光纤抽运功率为 P_0 ,通过该长度区域的抽运功率为 P 。

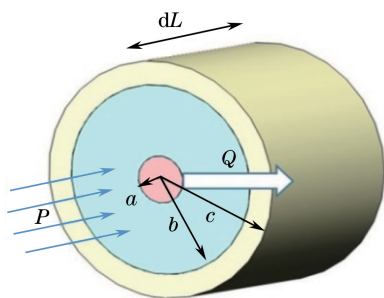


图1 有源光纤纤芯热生成及传导模型

Fig. 1 Model of an active fiber with uniform heat generation in the core

对于单端抽运,若抽运光从端面进入光纤,在纤芯中被逐步吸收,其功率分布表示为^[9]

$$P = P_0 \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

在 $L \sim L + dL$ 处,纤芯的吸收功率为

$$\Delta P = P_0 \exp(-\alpha L) - P_0 \exp[-\alpha(L + dL)] = \alpha P_0 \exp(-\alpha L) dL, \quad (2)$$

仅考虑量子亏损发热,则

$$q = \frac{\Delta P \eta}{dL \pi a^2} = \alpha P_0 \exp(-\alpha L) \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) / \pi a^2 = q' dL / \pi a^2, \quad (3)$$

式中 α 为抽运光吸收和损耗系数之和, λ_s 和 λ_p 分别为吸收波长和抽运波长, η 为热转换系数。

关于光纤径向热传导模型理论,国内外相关理论研究进行了大量推导^[9-11]。根据热微分方程

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dT(r)}{dr} \right] + \frac{q}{k} = 0, \quad (4)$$

代入边界条件,推导得到各区域的温度分布为

$$T_1(r) = T_0 - \frac{qr^2}{4k_1}, \quad (5)$$

$$T_2(r) = T_0 - \frac{qa^2}{4k_1} - \frac{qa^2}{2k_2} \ln \frac{r}{a}, \quad (6)$$

$$T_3(r) = T_0 - \frac{qa^2}{4k_1} - \frac{qa^2}{2k_2} \ln \frac{b}{a} - \frac{qa^2}{2k_3} \ln \frac{r}{b}, \quad (7)$$

$$T_0 = T_c + \frac{qa^2}{2hc} + \frac{qa^2}{4k_1} + \frac{qa^2}{2k_2} \ln \frac{b}{a} + \frac{qa^2}{2k_3} \ln \frac{c}{b}, \quad (8)$$

式中 $T(r)$ 表示半径 r 处的温度, $T_1(r)$ 、 $T_2(r)$ 和 $T_3(r)$ 分别为光纤纤芯、内包层和外包层区域的温度, T_0 为纤芯中心温度, T_c 为环境温度; k 表示热传导系数, k_1 、 k_2 和 k_3 分别为纤芯、内包层和外包层区域的热传导系数; h 为光纤表面的对流换热系数。

图 2 为抽运功率为 1.25 kW 时的光纤轴向温度分布^[10]。光纤轴向高温区主要集中在抽运前端, 呈指数下降。径向温度在纤芯中心最高, 沿径向至涂覆层表面不断下降。光纤的径向平均温度梯度约为 10^5 K/m (25 K/250 μm), 光纤轴向平均温度梯度为 35.5 K/m (355 K/10 m), 热量主要沿光纤的轴向进行传递。

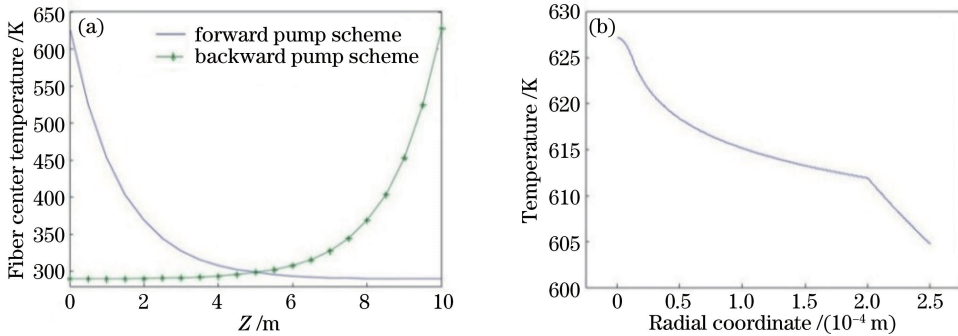


图 2 有源光纤温度分布示意图。(a) 轴向温度; (b) 径向温度

Fig. 2 Temperature distribution of active fiber. (a) Axial temperature; (b) radial temperature

2.2 光纤温度分布探究方法

除了上述理论模型对光纤温度的数值模拟外, 光纤温度分布的探究方法还有许多。Li 等^[12]分别采用单端和双端抽运结构的钕镱共掺光纤激光器(EYDFL)进行了实验研究, 采用多模光纤收集钕离子上转换效应产生的绿色上转换荧光 (UPF), UPF 光谱对于掺钇材料具有良好的温度指示, 即不同的 UPF 光谱曲线对应材料的不同温度。将纤芯直径为 100 μm 的多模光纤置于抽运端面附近接收 UPF。沿光纤抽运端轴向长度 100 μm 以及纤芯直径 20 μm 以内的圆柱体发射出的 UPF 才能被接收, 因此实际上测量结果为一定体积内温度的平均值, 与模拟结果进行比较证明该平均值充分接近纤芯温度的最高值。

Jeong 等^[13]探究了光纤的轴向温度分布, 在自然对流状况下, 975 nm 端面抽运时 2.4 m 的钕镱共掺光纤(YSEDF)的轴向温度分布如图 3 所示。选择用镱离子敏化的钕镱共掺材料作为增益介质, 其量子亏损在 975 nm 附近抽运时相对较高, 同时单位长度的吸收率也较通常的掺镱光纤高。温度测量原理则基于光纤布拉格光栅(FBG)传感阵列的温度传感技术, 实验所用光栅传感器对温度的灵敏度为 12 pm/K, 使用波长偏移将其转换为所需的温度变化。该实验为光纤温度分布研究提供了实质性的测量方法, 但其光纤温度测量的准确性受限于光纤间的接触热阻以及光纤布拉格光栅的灵敏度。

鉴于布拉格光栅的波长-温度特性, 何兵等^[14]将布拉格光栅应用到光纤内部纤芯温度的测量中, 提出了在待测光纤纤芯的不同位置刻写具有不同中心波长的布拉格光栅的方法, 并利用相应波长的信号光进行监

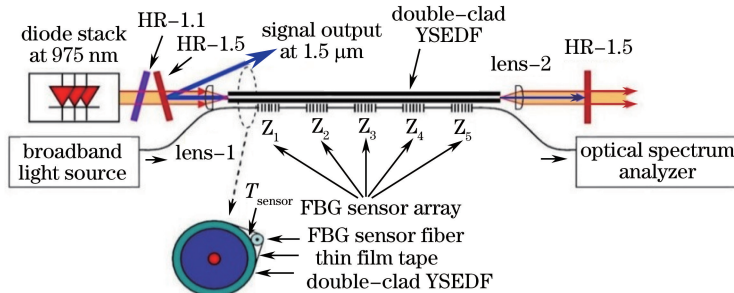


图 3 端面抽运的钕镱共掺激光器光纤温度测量实验

Fig. 3 Experimental arrangement for an end-pumped YSEDF laser

测,实现了对相应纤芯位置处温度的实时监测,难度在于光纤中多处布拉格光栅的刻蚀。

对于光纤的温度分布探究,许多研究提出有限元仿真的方法^[15-16],通过对光纤或者光纤散热结构进行建模和热加载,对光纤温度分布进行动态以及稳态的仿真模拟,为获取光纤温度的变化过程和分布提供了很好的依据。有限元仿真方法参数设置的准确性取决于实际环境的复杂性,但其可靠性受模型参数影响较大。

耶拿大学 Beier 等^[17]基于光频域反射计(OFR)提出了一种测量光纤纤芯温度的方法,如图 4 所示。OFDR 输出的 1300 nm 信号光与 1070 nm 的种子源耦合进入波分复用器(WDM),包层光滤除器(MS)滤除反向抽运的剩余抽运光。OFDR 接收由于纤芯温度变化产生的反馈信号并进行数据处理,该方法能达到毫米量级的空间分辨率,比光纤布拉格光栅的测量方法更精准。

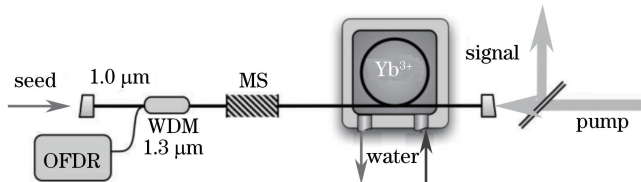


图 4 基于 OFDR 的纤芯温度测量装置

Fig. 4 Experimental setup of core temperature measurement based on OFDR

3 热效应对光纤激光器输出特性的影响

3.1 热效应对光纤的影响

常见的双包层光纤低折射率聚合物层对于热沉积非常敏感,当热量沉积使光纤温度达到 150~200 °C 时,高热负载会导致光纤聚合层的热损伤,光纤聚合层的温度应该控制在 80 °C 以下,才能保证光纤的安全稳定工作^[11]。

关于光纤激光器光纤热应力的研究指出,抽运端附近的热应力对光纤的破坏作用表现为纤芯中心的压应力和包层附近的拉应力,由于材料内外层热膨胀系数不均匀,径向、切向和轴向热应力不同,超出光纤的承受极限时就会出现热炸裂^[4]。

光纤激光器中光纤的温升会引起光纤折射率的变化,导致热透镜效应,从而降低模场面积。即便在单模光纤激光器中,热透镜效应也可能会导致多模现象的产生,对输出激光的光束质量产生一定的影响^[18]。

光纤的熔接点处也有较为严重的热效应^[19-20],热效应的产生主要来源于两个方面:1)光纤材料及重新涂覆材料对光的吸收转换会产生热量,在较短的长度范围内,几乎完全透明的重涂覆层对光的吸收甚微,但其表面或者交界面的瑕疵会产生一些微型空洞,空气是热的不良导体,空洞的存在使得热阻变大,因此熔点处容易产生热沉积,导致温度明显偏高;2)熔接参数不合适或者两段光纤结构参数不匹配,会导致熔接处产生损耗,热阻的存在使得熔点处温度上升。温度的升高使光纤发生热损伤,同时对光纤的数值孔径造成较大影响,数值孔径的变化会显著影响光的导向性。

3.2 热效应对输出特性的影响

光纤激光器热效应对输出特性的影响是多方面的,国内外关于热效应对光纤激光器输出特性影响的研究主要集中在输出波长、效率、功率、能级、光束质量以及非线性效应与光纤温度的关系等^[1,5,21-23]。

Brilliant 等^[2]以 915 nm 抽运波长,在 0~100 °C 温度范围内研究输出波长、斜率效率和阈值功率等随温度的变化。如图 5(a)所示,输出波长(1100~1120 nm)变化与温度变化呈正相关,变化率为 0.2 nm/°C,斜率效率则从 0 °C 时的 44% 降至 100 °C 时的 41.5%。由图 5(b)可知,在 6.0 W 抽运功率下,激光器的输出功率随温度增加而下降 20%,但其阈值功率却增至原来的 2 倍。

Grukh 等^[5]针对掺铒光纤激光器温度变化对能级粒子数分布、光谱变化以及输出效率的影响进行了理论分析。图 6(a)揭示了铒离子在 a~d 能级粒子数随温度变化的趋势,不同能级粒子数会影响到能级的跃迁,从而直接或间接影响激光的波长及功率等的变化,图 6(b)则表明三种不同波长的激光输出随温度的变化。

Ward 等^[21]从理论和实验方面探讨了温度对不同冷却方式下阈值功率的影响,如图 7(a)所示。自然对流散热比传导散热方式效果差,不良散热方式会降低输出激光的阈值功率,因此光纤热管理技术对光纤激光

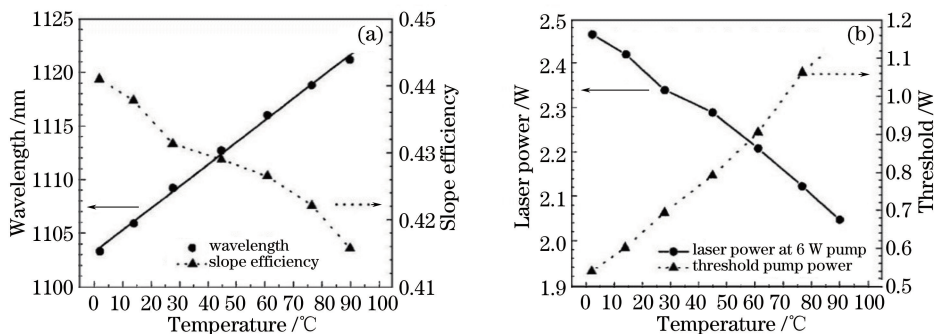


图 5 (a) 输出波长和斜率效率与光纤温度的关系; (b) 输出功率和阈值功率与光纤温度的关系

Fig. 5 (a) Laser wavelength and slope efficiency as functions of fiber temperature;

(b) threshold pump power and laser output power as functions of fiber temperature

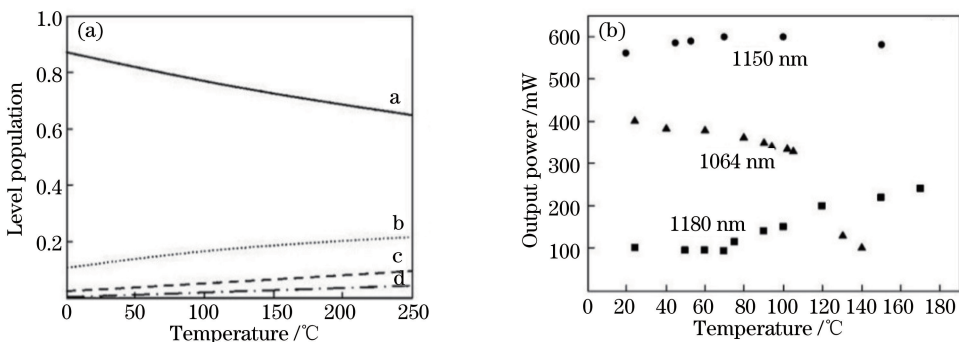


图 6 (a) Yb^{3+} 能级粒子数与 (b) 不同波长输出功率随温度的变化

Fig. 6 Temperature dependence of (a) Yb^{3+} level population and (b) output power

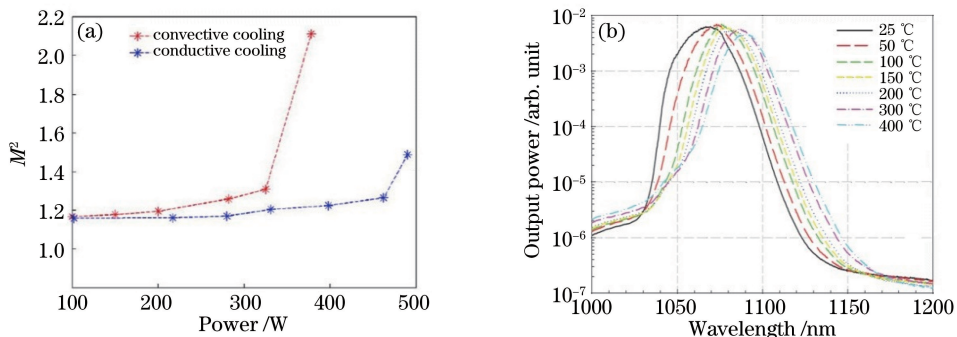


图 7 (a) 不同冷却方式下光束质量与输出功率的关系; (b) 热沉温度为 25~400 °C 时 ASE 输出光谱

Fig. 7 (a) Beam quality as a function of output power under different cooling conditions;

(b) ASE output spectra at heat sink temperatures ranging from 25 °C to 400 °C

器的模式控制研究意义重大。Daniel 等^[22]研究了掺 Yb 光纤激光器放大自发辐射(ASE)效应随温度的变化,结果如图 7(b)所示。ASE 输出功率为 300 mW,温度变化范围为 25~400 °C,实验观察到随着温度的提升,小于 1050 nm 波长的功率降低,而大于 1100 nm 波长的功率则有所增大。

4 热效应的抑制方法

光纤激光器的热效应对光纤和输出特性都有不可忽略的影响,因此降低热效应带来的负面影响意义重大。热效应的抑制主要集中在以下三方面:

- 1) 根据光纤的温度理论模型合理选择光纤参数;
- 2) 合理选择抽运结构和抽运方式有利于实现温度的均匀分布,减少热效应的产生;
- 3) 选择高效的外部散热方案可以极大地降低热效应带来的负面影响。

4.1 光纤参数的优化

影响光纤温度分布的主要因素有纤芯和内外包层的导热系数、径向尺寸、吸收系数以及光纤长度等。合理选择光纤参数可以有效控制光纤的热量分布,保证光纤的正常稳定工作。

光纤纤芯变大可降低纤芯温度,但纤芯尺寸过大会影响光束质量^[23-25]。涂覆层作为光纤热传导的最外层介质,其厚度对光纤的工作温度影响很大。理论上涂覆层的内外表面温差与厚度呈正相关,涂覆层越薄,热传导阻值越小,整个涂覆层的内外表面温差越小,系统可承受的功率越高^[25-26]。但由于光纤表面对流换热的影响,且涂覆层有保护光纤的作用,因而需要合理选择涂覆层厚度。

光纤在空气中冷却时,光纤热传导阻值 R_{cond} 、热对流阻值 R_{conv} 及总热阻值 R_{tot} 与涂覆层厚度的关系如图 8(a)所示^[27]。涂覆层厚度与 R_{cond} 呈正相关,而与 R_{conv} 呈负相关,因此需合理选择涂覆层厚度,以保证总热阻值较低。光纤长度与吸收系数和温度的关系如图 8(b)所示,通过降低光纤吸收系数,可以有效减少对抽运功率的吸收^[25,28],对抽运功率吸收的降低意味着热沉积的减少,从而降低光纤温度,但要实现相同的输出则需要增加光纤长度^[6-8]。Wang 等^[6]研究了总抽运功率为 1000 W、双端抽运功率均为 500 W 时,采用 0.25 dB 吸收系数的 60 m 长光纤时输出功率为 630 W,而采用 1.0 dB 20 m 长的光纤时输出功率为 725 W,但后者光纤最高温度比前者高约 200 °C。

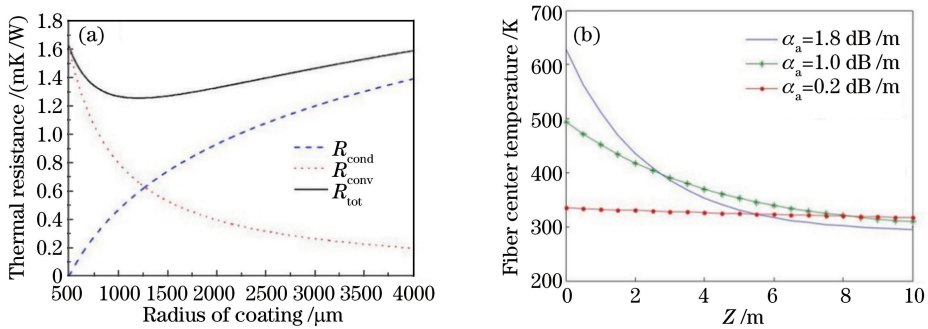


图 8 (a) 涂覆层厚度与热阻的关系; (b) 吸收系数与温度的关系

Fig. 8 (a) Thermal resistance as a function of radius of coating; (b) relationship between absorption coefficient and temperature

由于抽运端的抽运功率最强,虽然降低光纤吸收系数可以有效减少对抽运功率的吸收,但在兼顾抽运吸收效率的前提下,激光器若完全采用低掺杂、低吸收率的光纤,需增加光纤长度,这样又会导致其他问题的产生,如非线性效应以及输出效率的下降等。

4.2 抽运方式的选择

采用双端抽运、分布式侧面抽运以及不同吸收系数的多段光纤结构等抽运方式,在理论上可以有效解决温度分布问题,减少热效应的产生^[6-8,29-30]。

Wang 等^[6,8]在分析热沉积分布的基础上,对双包层掺镱光纤激光器(YDFL)的温度分布进行了理论方面的研究,主要集中在不同抽运结构对光纤运行温度的影响。在空气冷却情况下,总抽运功率为 1000 W 时三种不同抽运结构及其光纤轴向理想温度分布如图 9 所示。图 9(e)所示的非均匀系数下光纤中间几段的吸收系数高于两侧,在保证温度分布基本均匀的情况下,输出功率与图 9(d)相同时所需光纤缩短了 20 m 以上;图 9(f)中将抽运功率分成 7 段,温度分布更为均匀,且温度可控制在十分理想的范围内。

抽运方式对光纤激光器而言意义重大。2011 年耶拿大学利用分布式侧面抽运光纤搭建了千瓦量级的侧面抽运光纤激光器,2014 年 SPI 公司推出了千瓦量级侧面抽运光纤激光器产品,2015 年国内报道了国防科学技术大学和中国电子科技集团第二十三研究所联合研发了分布式侧面耦合包层抽运光纤,并搭建了全国产化光纤激光器,实现了千瓦量级的功率输出^[31]。

采用多段非均匀抽运或分布式侧面抽运结构可以保证光纤温度均匀,降低热效应影响的同时有效缩短光纤的长度。但分布式侧面抽运光纤的拉制、降低各段光纤的熔接耦合损耗并提高效率是技术关键。随着光纤设计、拉制及熔接等关键技术的突破和发展,更多的抽运方式将会应用于高功率光纤激光器的研发中,

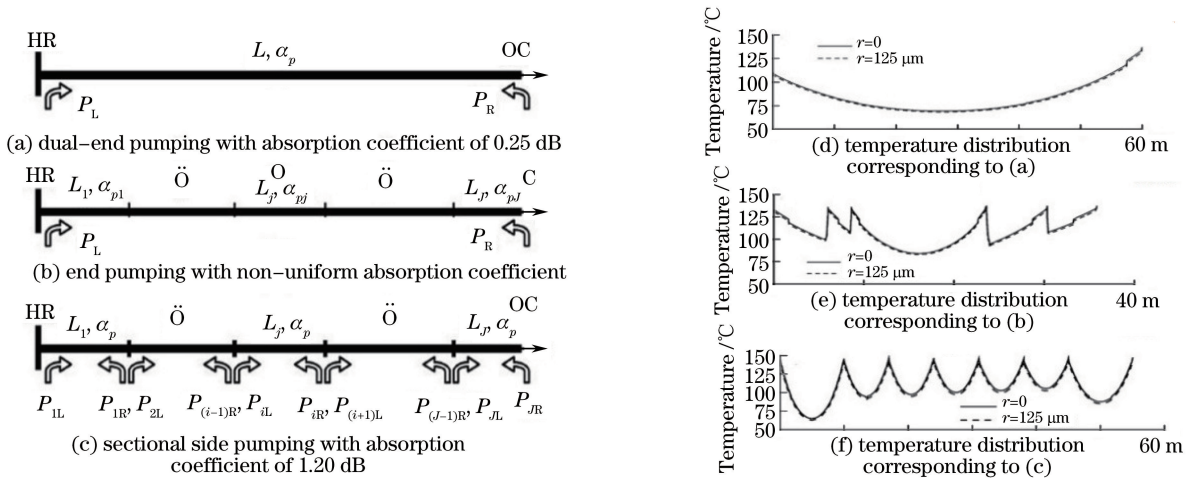


图9 (a)~(c)不同抽运结构示意图及(d)~(f)对应的温度分布图

Fig. 9 (a)-(c) Configurations and (d)-(f) temperature distributions of YDFL under different pumping conditions

与有效的外部散热技术结合以有效抑制光纤热效应的产生,实现更高功率激光的稳定输出。

4.3 散热设计

为最大程度降低光纤激光器的热效应带来的不利影响,在优化光纤参数以及抽运方式的基础上,还要进行光纤外部散热的设计。有效的散热方式可以保证激光器在高功率输出时的稳定运行。国内外对光纤的外部散热设计主要集中在有源光纤及其熔点的热管理方面。

热传导、热对流和热辐射是三种主要的传热方式,由于热辐射系数较小,一般情况下可以忽略其影响,传导和对流为主导性散热方式^[32]。对于功率较小的光纤激光器,通常只考虑光纤自然对流散热,热辐射影响较小,可适当予以考虑^[33]。

对流换热主要包括自然对流换热和强制对流换热。对流散热的决定因素为对流换热系数的大小。对流换热系数 h 与流体性质、流速及对流面积有关。如表1所示,在同等条件下,强制对流换热系数高于自然对流换热系数,水的对流换热系数是空气对流换热系数的数倍^[9]。对流换热系数越大,光纤的散热越好^[9,11]。自然空气对流散热一般应用于功率较低的光纤激光器中。

表1 不同介质的对流换热系数

Table 1 Heat convection coefficients of different media

Medium	Heat convection coefficient $h / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	
	Natural convection	Forced convection
Air	3-10	20-100
Water	200-1000	1000-10000

光纤激光器输出数百瓦或上千瓦量级的功率时,单纯的对流冷却方式难以满足散热需求,需选择特定的热传导方式,将光纤热量传导至特定的热沉上,然后通过热沉进行高效的热量传导或对流扩散。光纤和热沉的接触形状或者加工表面不完全贴合,如图10所示,在接触界面存在空隙,会阻碍热量的传导^[34-35]。影响光纤与热沉热传导的主要因素是热阻,热阻是热交换界面之间热传导水平的衡量标准。

光纤和热沉之间的热阻理论模型可简化为

$$R''_{tc} = \frac{T_s - T_\infty}{q''} = R_{\text{contact}} + R_{\text{cond}}, \quad (9)$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA}, \quad (10)$$

式中 T_s 为光纤表面温度, T_∞ 为热沉温度, q'' 为热通量 (W/m^2), 是热负载 q' (W/m) 与周长之比, R_{contact} 为热接触阻值, R_{cond} 为间隙层的热阻, L 为间隙层厚度, k 为间隙中填充物质的热导率, A 为热流通过的表面积。

通过(9)式和(10)式可知,保证较小的热阻可以降低光纤的温度。由于两接触界面的空气具有极低的热

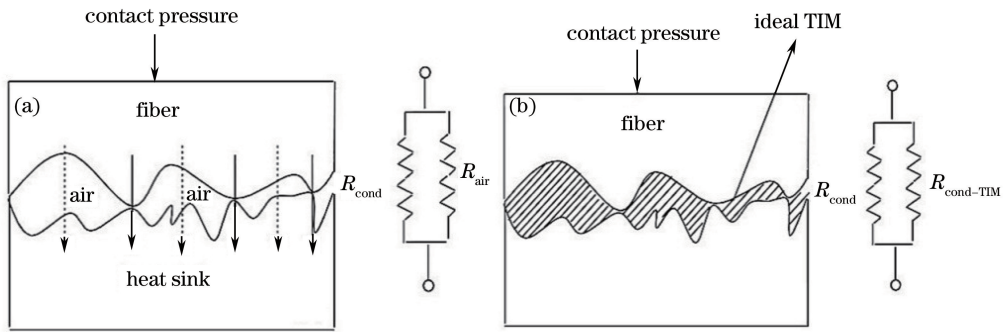


图 10 光纤和热沉之间的热阻分解示意图。(a) 无填充；(b) 理想填充材料

Fig. 10 Exploded view of thermal resistance between fiber and heat sink. (a) Without TIM; (b) with ideal TIM

传导系数($k_{\text{air}}=0.026 \text{ W/mK}$),通过填充高热导率的热界面材料(TIM)可有效减小热阻^[19],同时间隙层厚度 L 越小越好。

除了减小间隙厚度和提高热导率以外,还可以通过控制热沉的形状来降低光纤表面温度。图 11 所示为常见矩形、V 型和 U 型凹槽热沉散热结构。针对重涂覆光纤熔点的三种不同凹槽结构进行了热阻的评估,其他参数均一致的情况下,周长最短的 U 型槽热阻最小,冷却效果较好,而周长最长的 V 型槽热阻最大,冷却效果较差^[34-35],实际应用中区别不明显,U 型和 V 型结构使用较多,散热效果明显优于纯平面热沉。

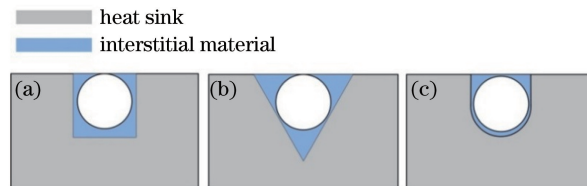


图 11 三种不同凹槽热沉示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of three groove geometries

光纤激光器以较小功率运行时,可以通过半导体致冷模块(TEC)和热沉进行风冷,当光纤激光器功率较高时,可通过水冷来保证稳定的工作温度。

Li 等^[12]将 TEC 应用于 EYDFL 的外部冷却,采用双端抽运结构,将 TEC 用于高功率运行下的前 10.2 cm 长光纤外围铝热沉上,采用的 U 型槽如图 12(a)所示。图 12(b)中蓝色曲线表示光纤与热沉接触温度分布,红色曲线为光纤的理论温度分布,TEC 和热沉的使用有效降低了光纤的温度。

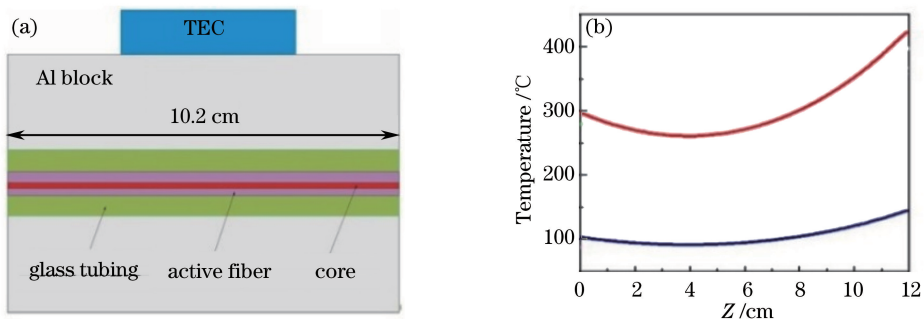


图 12 (a) TEC 制冷光纤段示意图；(b) 双端抽运温度分布

Fig. 12 (a) Schematic of short TEC-cooled fiber; (b) temperature distribution of dual-end-pumped EYDFL

对于高功率光纤激光器,大量研究采用有针对性的散热处理,获得了千瓦量级以上的高输出功率^[9,25,27,35-38],没有非线性效应和热损伤现象出现,良好的热管理技术保证了光纤激光器的稳定运行。研究中主要通过平面缠绕和圆筒缠绕方式进行光纤散热,采用刻有 U 型或 V 型凹槽的金属热沉,光纤与凹槽的接触间隙用导热硅脂(热导率一般大于 2 W/mK)填充,通过水冷的方式带走热量,其结构如图 13 所示。

随着高功率光纤激光器热管理技术、半导体抽运、光纤耦合以及包层光滤除等关键技术的发展^[38-40],热

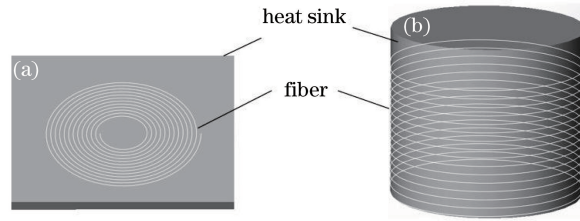


图 13 增益光纤的冷却结构。(a) 散热平板；(b) 散热圆筒

Fig. 13 Cooling structure of active fiber. (a) Metal plate; (b) metal cylinder

效应作为功率提升的瓶颈之一,将会得到良好的控制,光纤激光器的功率将会不断提高。同时有效的热管理技术还可以促进光纤激光器集成封装技术的发展^[41],使高功率光纤激光器能适用于更为广泛的环境中。

5 结束语

对已报道的高功率光纤激光器热效应相关研究进行了综述,详细介绍了光纤温度理论、热效应对光纤激光器输出特性的影响以及热效应的抑制方法,并对研究中存在的优缺点进行了评述。随着光纤激光器功率的不断提升,热效应相关研究意义重大,通过光纤激光器结构的不断优化和外部散热方式的有效设计,高功率光纤激光器的热管理技术将日益发展和成熟,使光纤激光器在功率不断提升的同时能够稳定地运行。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Brilliant N A, Lagonik K. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1669-1671.
- 3 Canat G, Mollier J C, Jaouën Y, *et al.* Evidence of thermal effects in a high-power Er^{3+} - Yb^{3+} fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3030-3032.
- 4 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.
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.
- 5 Grukh D A, Paramonov V M, Kurkov A S, *et al.* Effect of heating on the optical properties of Yb^{3+} -doped fibres and fibre lasers [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(6): 579-582.
- 6 Wang Y, Xu C Q, Hong P. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(1): 63-65.
- 7 Xiong Yue, Pan Wei, Luo Bin, *et al.* Thermal effects in Yb-doped double-clad high power fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 495-499.
熊悦, 潘炜, 罗斌, 等. 掺镱双包层高功率光纤激光器热效应的理论研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 495-499.
- 8 Wang Y. Heat dissipation in kilowatt fiber power amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 731-740.
- 9 Zhu Hongtao, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.* Experimental and theoretical study on designing of cooling device for the kilowatt-level double cladding fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4966-4971.
朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 等. 千瓦级双包层光纤激光器冷却方案设计理论和实验研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4966-4971.
- 10 Fan Y Y, He B, Zhou J, *et al.* Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15162-15172.
- 11 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Lin Zhifeng, *et al.* Numerical analysis of the temperature distribution of high power double cladding fiber laser [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(11): 998-1002.

- 高雪松, 高春清, 林志锋, 等. 高功率双包层光纤激光器温度分布的数值分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(11): 998-1002.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 He Bing, Fan Yuanyuan, Zhou Jun. Method for measuring temperature of optical fiber core: CN101762343A[P]. 2010-06-03.
何 兵, 范元媛, 周 军. 光纤纤芯温度的测量方法: CN101762343A[P]. 2010-06-30.
- 15 Chen Z, Hou J, Jiang Z. Theoretical analysis of thermal effects in fiber laser from the moment when pump is turned on to steady-state[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(3): 178-180.
- 16 Liu T, Yang Z M, Xu S H. Analytical investigation on transient thermal effects in pulse end-pumped short-length fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12875-12890.
- 17 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, Berlin, 2015: ATh2A.23.
- 18 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.
- 19 Lapointe M-A, Chatigny S, Piché M, *et al.* Thermal effects in high-power CW fiber lasers[C]. SPIE, 2009, 7195: 71951U.
- 20 Huang Z Y, Ng T Y, Seah C P, *et al.* Thermal modeling of active fiber and splice points in high power fiber laser[C]. SPIE, 2011, 7914: 79142W.
- 21 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.
- 22 Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, *et al.* A double clad ytterbium fibre laser operating at 400 °C [C]. SPIE, 2015, 9344: 934414.
- 23 Jiang Qiujie, Yan Ping, Zhang Jinge, *et al.* Analysis on thermal characteristic of ytterbium-doped fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 827-829.
蒋秋洁, 闫 平, 张金戈, 等. 掺镱光纤激光器温度特性分析[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 827-829.
- 24 Gorjan M, Marinček M, Čopič, *et al.* Pump absorption and temperature distribution in erbium-doped double-clad fluoride-glass fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19814-19822.
- 25 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.
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.
- 26 Zintzen B, Langer T, Geiger J, *et al.* Heat transport in solid and air-clad fibers for high-power fiber lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(25): 16787-16793.
- 27 Zintzen B, Langer T, Geiger J, *et al.* Optimization of the heat transfer in multi-kW-fiber-lasers[C]. SPIE, 2008, 6873: 687319.
- 28 Li P, Zhu C, Zou S, *et al.* Theoretical and experimental investigation of thermal effects in a high power Yb³⁺-doped double-clad fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(2): 360-364.
- 29 Shen Yueguo, Lü Xuliang, Zhu Hongtao, *et al.* A numerical analysis on the distribution of temperatures in the double-cladding fiber laser[J]. Journal of Nanjing University, 2010, 46(4): 412-418.
申岳国, 吕绪良, 朱洪涛, 等. 双包层光纤激光器温度分布数值分析[J]. 南京大学学报, 2010, 46(4): 412-418.
- 30 Huang Zhihe, Cao Jianqiu, Guo Shaofeng, *et al.* Simulation of the distributed side-coupled cladding-pumped fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040605.
黄值河, 曹涧秋, 郭少锋, 等. 分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040605.
- 31 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(2): 0219002.

- 32 Chen Shuang, Feng Ying. Temperature distribution in high power photonic crystal fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1134-1138.
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.
- 33 Yan P, Xu A, Gong M. Numerical analysis of temperature distributions in Yb-doped double-clad fiber lasers with consideration of radiative heat transfer[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124201.
- 34 Fan Y Y, He B, Zhou J, *et al.* Efficient heat transfer in high-power fiber lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(11): 111401.
- 35 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.* Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502003.
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(5): 0502003.
- 36 Li Tenglong, Sun Yinhong, Ma Yi, *et al.* Theoretical and experimental study on kW all fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8): 081001.
李腾龙, 孙殷宏, 马毅, 等. kW级全光纤激光器理论与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 081001.
- 37 Dong Fanlong, Ge Tingwu, Zhang Xuexia, *et al.* Heat management of 1 kW Yb-doped all-fiber amplifier[J]. Laser & Infrared, 2015(7): 790-794.
董繁龙, 葛廷武, 张雪霞, 等. 1 kW 掺 Yb 全光纤放大器的散热处理[J]. 激光与红外, 2015(7): 790-794.
- 38 Zhang Y, Zhao L, Li C, *et al.* Study on the thermal distribution and thermal management of high average power fiber lasers[C]. SPIE, 2015, 9255: 92550N.
- 39 Du Xueyuan, Su Rongtao, Wang Xiaolin, *et al.* Research on fiber laser performance working at different temperatures[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s102004.
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.
- 40 Mu W, Si X, Lin Y J, *et al.* Research of new packaging and cooling technique for high power fiber laser used pump coupler[C]. SPIE, 2015, 9671: 96710T.
- 41 Creeden D, Johnson B R, Jones C, *et al.* Packaging of fiber lasers and components for use in harsh environments[C]. SPIE, 2016, 9730: 973013.