

高功率散热技术及高功率光纤激光放大器

代守军^{1,2} 何兵¹ 周军¹ 赵纯¹

(¹ 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)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 双包层光纤涂覆层的热损伤是高功率连续光纤激光器运转的主要限制因素之一。对高功率连续光纤激光器中的热效应进行研究, 并对于仅由于涂覆层的热损伤引起的功率极限给出了理论模拟。进行了千瓦级光纤激光器中无源光纤与增益光纤熔接冷却的理论及实验研究。对于不同的冷却结构分别测量光纤与热沉之间的热接触电阻, 并提供了有效的散热方案实现热量的有效传导。采用新型散热技术, 基于主振荡功率放大(MOPA)结构, 研制出 1080 nm 1.11 kW 全光纤激光器样机。放大级抽运光注入处熔接点表面最大温度为 327 K(54 °C), 运行过程中没有非线性效应和热损伤现象出现。

关键词 激光器; 光纤激光放大器; 热接触电阻; 高功率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0502003

Cooling Technology of High-Power and High-Power Fiber Laser Amplifier

Dai Shoujun^{1,2} He Bing¹ Zhou Jun¹ Zhao Chun¹

(¹ 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
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Double-cladding fiber coating thermal damage is one of the prime limiting factors for the operation of high-power continuous-wave (CW) fiber lasers. The thermal effects in high power CW fiber lasers are studied, and the maximum output power of fiber lasers limited by the thermal degradation of coatings is theoretically simulated. Theoretical and experimental studies of splice points cooling in 1 kW CW fiber lasers are presented. Thermal contact resistances between the fiber and its heat sink are measured separately for different geometries and efficient cooling methods to achieve effective heat conduction are proposed. By using these optimized methods, based on the master oscillator power amplifier (MOPA) architecture, a 1080 nm 1.11 kW all-fiber laser prototype is obtained. The maximum surface temperature at the pump light launching end splice of the booster amplifier is 327 K (54 °C). Moreover, thermal or nonlinear effects have not been observed during operation.

Key words lasers; fiber laser amplifier; thermal contact resistance; high power

OCIS codes 140.3510; 140.3460; 140.3325

1 引言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、易于散热和易于实现高功率等特点, 在很多领域具有广泛应用, 如工业加工、通讯、医疗、科学研究

和军事等。因为掺镱光纤激光器具有高效率、高掺杂浓度、较大的抽运吸收带等特点, 在高功率激光领域得到了巨大发展。双包层光纤(DCOF)结构允许低亮度的高功率抽运光耦合进入光纤的包层里, 并

收稿日期: 2012-11-10; **收到修改稿日期:** 2013-01-04

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX04013)、国家 863 计划(2011AA030201)、国家自然科学基金(60908011, 60907045)和上海市青年科技启明星计划(12QH1401100)资助课题。

作者简介: 代守军(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: dd459074770@163.com

导师简介: 何兵(1975—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

使其信号光在小纤芯里得到有效放大,可以得到高光束质量的激光^[1]。双包层光纤结合高功率抽运源,连续(CW)光纤激光器已经达到千瓦级和数千瓦级^[2~6]。尽管光纤激光器具有大的表面积体积比,但在大功率的激光运转中,热效应已经成为必需考虑的重要问题,直接影响了光纤激光器输出功率的提高和进一步发展^[7]。

双包层光纤涂覆层的热损伤是高功率连续光纤激光器运转的主要限制因素之一,极大地影响了激光器的最大输出功率和激光系统稳定性。传统双包层光纤本身的低折射率聚合物涂覆层对温度很敏感,当温度达到 150 °C~200 °C 时往往会引起热损伤,长时间稳定运行一般要求温度低于 80 °C^[8]。因此,尽管光纤纤芯温度常常低于石英的熔点温度,仍然要对光纤进行冷却以保证涂覆层在安全温度范围来确保激光器的安全运行。

2 热效应分析

虽然已有文献利用热接触电阻来分析千瓦级光纤激光器的热效应^[9,10],但并没有使用热界面材料(TIM)。在光纤与热沉之间填充具有良好的导热系数且对光纤涂覆层没有伤害的热界面材料,这可以等效地提高接触表面的光洁度^[11~13],于是光纤与热沉之间的热接触电阻大大减小,加强了光纤与热沉之间有效热量传递。为了降低熔点温度,本文分别分析了光纤与不同设计的热沉之间的热接触电阻,从实验结果上确定哪种冷却结构最有效。可以实现表面温度温升仅为 0.0214 K/W,能够通过 2.5 kW 激光的熔点。

首先分析受限于光纤涂覆层损伤的光纤激光功率极限。若抽运光与激光间的量子亏损是增益光纤内的唯一发热因素,理论上单端抽运的光纤激光器或放大器的最高输出功率为^[14]

$$P_{L,max} \approx \frac{4\pi(T_d - T_\infty) \left[\frac{2}{k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) + \frac{2}{hc} \right]^{-1} \eta_{abs} \left(\frac{\eta_i v_L}{v_p - \eta_i v_L} \right)}{\alpha_p} \quad (1)$$

式中 T_d 为光纤涂覆层所能承受的最高温度, T_∞ 为周围环境的温度(或者是热沉的温度), k_3 为外包层的导热系数, b 为内包层半径, c 为外包层半径, h 为对流换热系数, α_p 抽运光吸收系数, v_L 为激光频率, v_p 为抽运光频率, η_{abs} 为光纤吸收的抽运光比例, η_i 为量子效率。

图 1 为 25/400 μm 掺镱双包层光纤(YDCF)理论上所能承受的最高输出功率 $P_{L,max}$ 随对流换热系数 h 的变化曲线(在 975 nm 波长处 $\alpha_p = 1.26 \text{ dB/m}$)。 $P_{L,max}$ 在很大程度上依赖于 h , 即依赖于制冷条件。若要使 YDCF 在千瓦输出功率水平无热损的安全运行, h 应大于 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。对于光纤的散热来说,接触传导要比自由空间对流更加有效,高达 10 倍以上^[15], 于是引入刻了凹槽的金属热沉来冷却光纤。热接触电阻可以用来衡量光纤与热沉导热程度的高低。

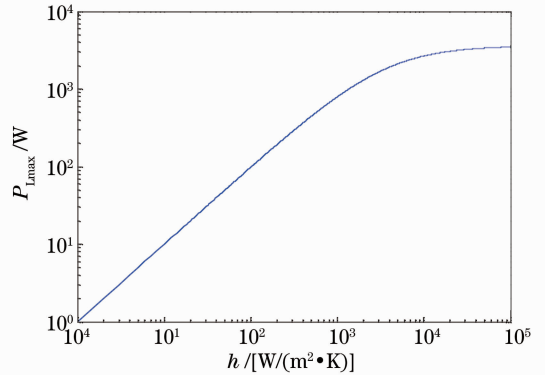


图 1 光纤涂覆层完好时最高输出功率 $P_{L,max}$ 与对流换热系数 h 的关系图

Fig. 1 Maximum output power $P_{L,max}$ as a function of h before the onset of coating damage

根据文献^[10], 光纤与热沉间单位面积的热接触电阻 R''_{tc} [单位为 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$] 可以表示为

$$R''_{tc} = \frac{T_s - T_\infty}{q''} \quad (2)$$

式中 T_s 表示光纤表面温度(单位为 K), T_∞ 表示热沉温度(单位为 K), q'' 为热流量[单位为 (W/m^2)]。 (2)式引入了一种概念,即穿越光纤层的热流可以类比于穿越导体的电荷,温度差类比于电压差,驱使热流通过一段热阻。

对于双包层增益光纤,可以认为在纤芯处产生均匀的热量 q_0 [单位为 (W/m^3)], 如图 2 所示, 这些热绝大部分来自于量子亏损。根据文献^[8]热功率密度 q_0 、热负荷 q' [单位为 (W/m)] 以及吸收系数 α [单位为 (dB/m)] 存在以下关系:

$$q_0 = [1 - 10^{-(\alpha \cdot dL)/10}] \frac{P \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right)}{\pi a^2} = \frac{q' dL}{\pi a^2} \quad (3)$$

式中 P 为通过一段特定长度 dL 的抽运功率, λ_s 及 λ_p 分别为信号光和抽运光的波长, 而 $q' = \frac{q'}{L_c}$, L_c 为周长。

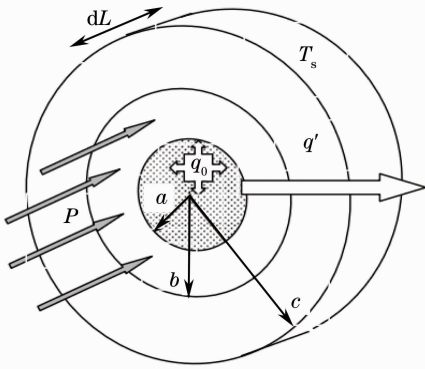


图 2 纤芯均匀产热的增益光纤描绘图

Fig. 2 Representation of a gain fiber with uniform heat generation in its core

图 3(a)中光纤与热沉间的热接触电阻主要由并联的两部分组成:1)在光纤与热沉相接触的点上

存在的传导热阻 R_{cond} ; 2)在光纤与热沉没有接触的区域上存在的辐射热阻 R_{air} (这个辐射热阻值非常大)。图 3(b)中两界面间填充了理想的 TIM,使得原本很大的辐射热阻 R_{air} 变成了 TIM 的传导热阻 $R_{cond-TIM}$, 因此,相较于图 3(a)、(b)的热接触电阻要小得多。增大两接触面间的接触压力会降低热接触电阻,这是因为压力增大会使光纤与热沉间的实际接触面积增加,从而减小热接触电阻;但另一方面,压力也不能过大,以免损伤光纤涂覆层。为了提高光纤与热沉间的接触紧密度,可以利用铜胶皮带对光纤施压并固定。由于金属铜具有良好的延展性及导热性,铜胶皮带可以与光纤有较好的接触;又因为其拥有与热沉相当的良好导热性,可近似认为它们拥有相同的温度。

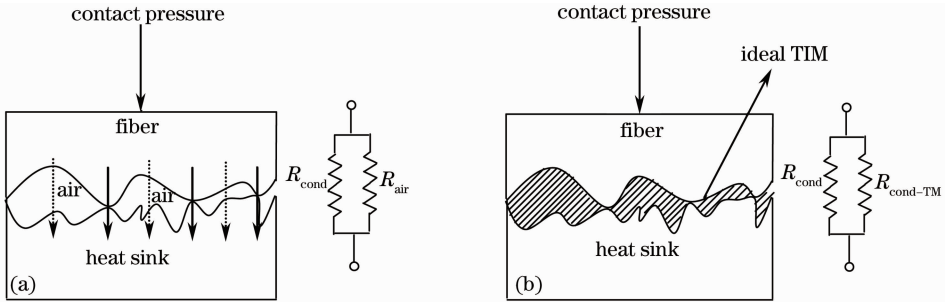


图 3 热接触电阻剖面图。(a)无 TIM; (b)理想 TIM

Fig. 3 Exploded view of thermal contact resistance. (a) Without a TIM; (b) with an ideal TIM

图 4 为 3 种不同形状的凹槽热沉。同一增益光纤熔点被分别置于 3 种凹槽内,自然放置不施加外力。参照文献[8],为了利用(2)式获得如图 4 所示的 R''_{tc} 的近似值,需先做一些假设:1)从光纤传递到空气中的热量足够小,小到可以认为空气是一个绝热体;2)暴露于空气中的光纤待测表面温度十分接近实际温度,且同一半径处的温度相同;3)热接触电

阻不随温度变化;4)热沉的温度 T_{∞} 被认为是始终不变的,并且没有热负荷时 T_s 应该等于 T_{∞} 。考虑所有的假设后,可利用(3)式求得热负荷 q' ,然后将其沿周长(热沉与光纤连接带的长度)均分来得到热流量 q'' 。在有 TIM 和无 TIM 时,分别计算了 3 种不同槽型热沉与光纤间的热接触电阻,实验及数值计算结果如表 1 所示,其中温升数值为实验值。

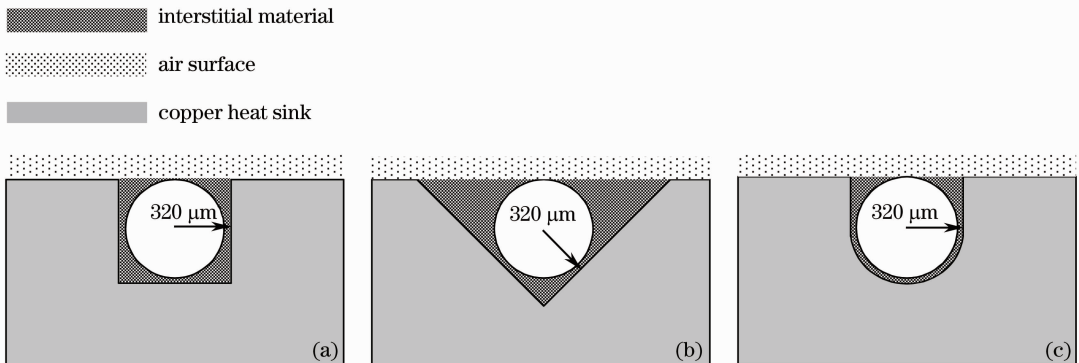


图 4 不同槽型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of different grooves

表 1 3 种槽型下光纤与热沉间的 R''_{tc}

Table 1 Thermal contact resistances R''_{tc} for three groove geometries

Parameters	Values		
Recoated fiber splice parameter / μm	20/400/600		
Geometry	Fig. 4(a)	Fig. 4(b)	Fig. 4(c)
Perimeter of the geometry / μm	1860	2128	1605
Recoated fiber splice external radius / μm	600	600	600
Pump absorption at 976 nm / (dB/m)	8	8	8
Quantum defect	0.90	0.90	0.90
Pump power at test position / W	150	150	150
Heat load at test power / (W/m)	12.6	12.6	12.6
Temperature elevation of fiber without a TIM / K	25	41	22
Temperature elevation of fiber with a TIM / K	10.5	17.2	10.9
$R''_{tc} \times 10^{-3}$ without a TIM / [($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)/W]	3.69	6.92	2.8
$R''_{tc} \times 10^{-3}$ with a TIM / [($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)/W]	1.55	2.9	1.39

从表 1 中可以看出,对于给定的凹槽,有 TIM 时的热接触电阻要小于无 TIM 的情况,也即有 TIM 时冷却效果较好。另一方面,对于确定的 TIM,热接触电阻会随着凹槽形状的不同而不同。计算结果显示,就冷却效果而言,U 型槽散热好于方形槽,两者又都好于 90° 的 V 型槽。总的来说,热接触电阻随热沉设计及质量的不同会有很大改变,光纤与热沉接触越紧密,热接触电阻越低。但是,实际使用过程中,有很多因素限制了接触的紧密度,如

施加于光纤上的压力、热沉表面的粗糙程度、光纤径向厚度的均匀性、再涂覆后的光纤与凹槽的匹配程度等,凹槽与光纤接触越完美越好。另一方面, R''_{tc} 是在做了很多假设后得到的近似值,因此其不确定性很高。实际上, R''_{tc} 可能比测定值大 2 倍或小一半。虽然给出的 R''_{tc} 测量值很粗糙,但是其量级说明热接触电阻是光纤发热的主要原因。由图 5 可见,槽的表面较为粗糙,加工精度可以进一步提高。

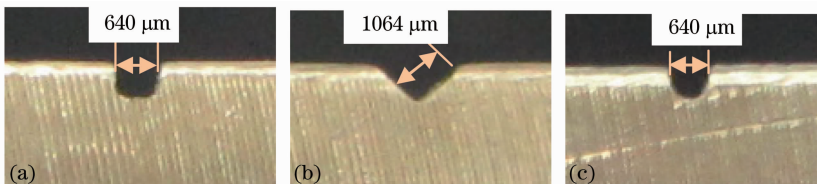


图 5 3 种不同槽型的细节图片

Fig. 5 Microscope images of three kinds of grooves

3 高功率光纤放大器

采用新型散热技术(即填充 TIM,采用 U 型槽),基于主振荡功率放大(MOPA)结构,研制出了 1080 nm 千瓦级全光纤激光器样机,其结构原理如图 6 所示。采用一级放大方案,各器件间采用光纤熔接的方式连接,形成全光纤结构,且各熔点都已利用低折射率匹配液再涂覆。种子源激光腔由一对光纤布拉格光栅(FBG)、YDCF 以及一个 $(6+1) \times 1$ 抽运合束器组成。YDCF(Nufern 公司)长度为 35 m,纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.06,内包层为八角形,直径为 $400 \mu\text{m}$,NA 为 0.46,对 915 nm 抽运光的吸收系数为 0.42 dB/m。采用 6 个尾纤输出、中心波长在 915 nm 的半导体激光器

(LD)作为抽运源,抽运光先经过 $(6+1) \times 1$ 的抽运合束器进行合束,再经高反 FBG1 后进入增益介质 YDCF 吸收。FBG1 为激光高反腔镜,对中心波长在 1079.81 nm 的 LP_{01} 基模激光的反射率 $R > 99.5\%$,3 dB 带宽为 1.53 nm;FBG2 为输出耦合腔镜,对中心波长在 1079.85 nm 的 LP_{01} 基模激光的反射率约为 10%,3 dB 带宽为 0.79 nm。功率放大器由一段长度为 12 m 的大模场面积 YDCF(LMA-YDCF)和一个 $(6+1) \times 1$ 抽运合束器组成,抽运合束器的信号光纤与种子源输出光纤相熔接。LMA-YDCF(Nufern 公司)纤芯直径为 $25 \mu\text{m}$,八角形内包层直径为 $400 \mu\text{m}$,对 976 nm 抽运光的吸收系数为 1.8 dB/m。主放大器由 6 个尾纤输出中心波长在 976 nm 的 LD 抽运。为了降低光纤输出端面纤

芯处的激光功率密度,使用带传能光纤的准直筒(包含光纤端帽及光束准直透镜)与放大器增益光纤的

输出端进行熔接。

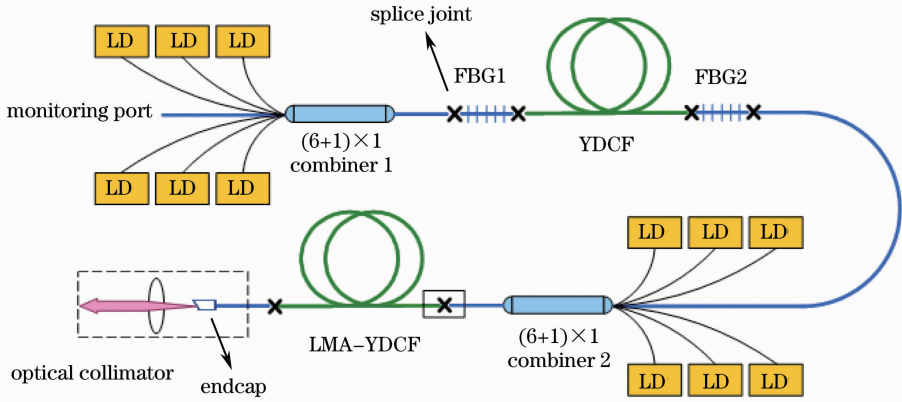


图 6 千瓦级全光纤 MOPA 结构放大器实验装置图

Fig. 6 Experimental arrangement of kW all-fiber MOPA

因为 MOPA 系统中种子源功率相对于放大器较低,温度最高处在放大级合束器输出纤与放大级增益光纤的熔点。所以重点测量此熔点的温升情况,以保证系统安全运行。图 7 为 MOPA 主放大器输出激光功率及此熔点表面温度随抽运功率的变化曲线。当信号光功率为 132 W、抽运光功率为 1.26 kW 时,输出激光功率为 1.11 kW,放大器输入输出斜率效率为 84.8%。熔点表面温度随着抽运功率的增加而升高,对应的表面温升为 0.0214 K/W。图 8 为抽运光功率 1.2 kW 时输出功率随时间的变化曲线,10 min 内功率波动量约为 1.2%。由于采用了较好的制冷措施,激光器最高功率时熔点表面温度为 327 K(54 °C),符合长期稳定运行的要求。整个过程中,激光功率未出现饱和,系统无热损伤运行。输出激光光谱如图 9 所示,种子激光 83.4 W 时激光

中心波长为 1079.8 nm,3 dB 带宽约为 0.99 nm, MOPA 主放大器输出激光功率 1.015 kW 时激光中心波长为 1079.7 nm,3 dB 带宽约为 1.8 nm,放大光谱基本没变化,未见异常。

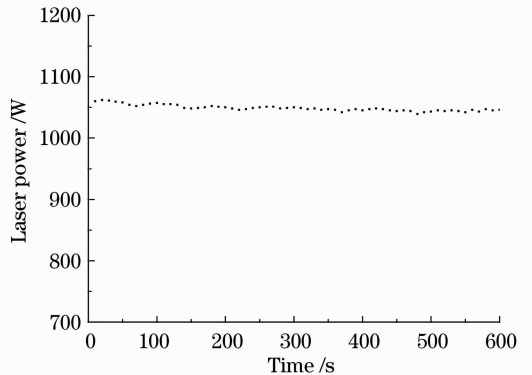


图 8 输出激光功率随时间变化曲线

Fig. 8 Laser output power versus time

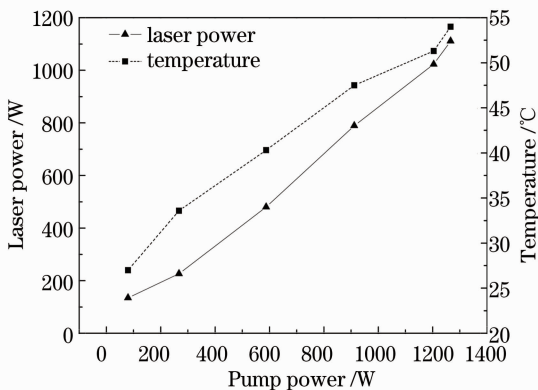


图 7 放大器输出激光功率及熔点表面温度随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Laser output power and splice surface temperature versus pump power

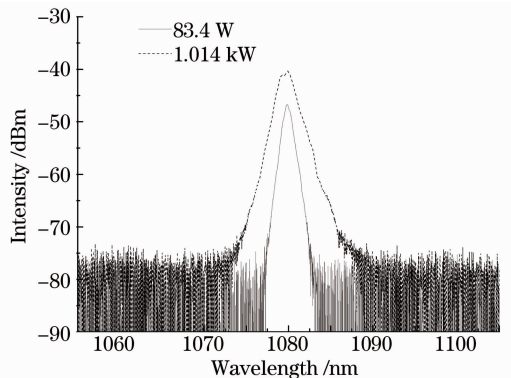


图 9 输出激光光谱图

Fig. 9 Spectra of output laser

4 结 论

分别测量了3种槽型下光纤与热沉间的热接触电阻,基于理论与实验提出了一种有效的光纤冷却方法实现热量的传导,即利用铜胶带固定光纤和使用U型槽并引入TIM填充空隙。采用此这种新型散热技术研制出1080 nm千瓦级全光纤激光器样机,最热熔点表面温度温升仅为0.0214 K/W,最高功率时熔点表面温度为327 K(54 ℃),激光器连续运行10 min无异常,运行过程中没有非线性效应和热损伤现象出现。

参 考 文 献

- 1 B. Morasse, S. Chatigny, C. Desrosiers *et al.*. Simple design for singlemode high power CW fiber laser using multimode high NA fiber[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719505
- 2 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao *et al.*. 1.75 kW Yb-doped double cladding fiber laser made in China[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1277
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
- 3 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0416001
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
- 4 Hu Xiao, Yanxing Ma, Pu Zhou *et al.*. Experimental study on kilowatt fiber laser in an all-fiber configuration[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(2): 021404
- 5 IPG Photonics Corporation. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [EB/OL]. [2012-09-01]. <http://www.ipgphotonics.com>
- 6 Nufern. KW-Power Single-Mode Fiber Lasers Using 20- μ m Core Yb-Doped DC Fibers [EB/OL]. [2012-09-02]. <http://www.nufern.com/library/>
- 7 D. C. Brown, H. J. Hoffman. Thermal, stress, and thermal-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 207~217
- 8 M. A. Lapointe, S. Chatigny, M. Piché *et al.*. Thermal effects in high power CW fiber lasers[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951U
- 9 Yuanyuan Fan, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(16): 15162~15172
- 10 B. Zintzen, T. Langer, J. Geiger *et al.*. Heat transport in solid and air-clad fibers for high-power fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16787~16793
- 11 J. P. Gwinn, R. L. Webb. Performance and testing of thermal interface materials [J]. *Microelectron.*, 2003, **34**(3): 215~222
- 12 C. P. Chu, G. L. Solbrekken, Y. D. Chung. Thermal modeling of grease-type interface material in PPGA application [C]. 13th IEEE SEMI-THERM XIII, 1997. 57~63
- 13 Yuanyuan Fan, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Efficient heat transfer in high-power fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(11): 111401
- 14 J. W. Kim, D. Y. Shen, K. Jayanta *et al.*. Fiber-laser-pumped Er:YAG laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 361~371
- 15 P. Yan, A. Xu, M. Gong. Numerical analysis of temperature distributions in Yb-doped double-clad fiber lasers with consideration of radiative heat transfer [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(12): 124201

栏目编辑: 王晓球