

温度梯度对光纤激光器横向模式的影响

任亚杰 曹润秋 冷进勇 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 分析了温度梯度对光纤激光器横向模式的影响。通过建立简化的光纤截面热传导模型,得到了光纤截面温度的分布。利用场分析软件分析了在不同抽运功率、吸收系数、折射率温度系数下光纤激光器横向模式的变化,发现当抽运功率提高时,横向模式有向纤芯收缩的趋势,这可能是高功率条件下光纤激光器中高阶模式出现的原因之一。当吸收系数增加或折射率温度系数增加时,横向模式也有向纤芯收缩的趋势。

关键词 光纤激光器;横向模式收缩;热传导方程;温度分布;折射率变化

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102010

Effects of Temperature Gradient on Transversal Modes in Fiber Lasers

Ren Yajie Cao Jianqiu Leng Jinyong Guo Shaofeng

(College of Opto-Electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The impact of thermal induced temperature gradient on the properties of transversal modes propagating in fiber lasers is carefully investigated. The thermal distribution in the cross section of fiber laser is figured out through a predigested heat conductive model, and then, the properties of transversal modes are analyzed by using multiphysics software under different operating conditions or parameters of fiber. It is found that all the transversal modes have a trend of constriction to the core of fiber with rising power level, and this discovery may give one of the explanations how the high order modes appear in single mode high power fiber lasers. As well, when the absorption coefficient or the refractive index-temperature coefficient is growing, the transversal modes also present a constriction trend.

Key words fiber lasers; transversal mode shrinking; thermal conductive equation; temperature distribution; change of refractive index

OCIS codes 140.6810; 060.2320; 140.3510

1 引言

随着双包层抽运技术的提出及光纤元器件的发展,光纤激光器最近几年获得了很快的发展^[1],单模连续输出功率已达到 10 kW。光纤激光器的光束质量是衡量光纤激光器的重要指标之一,也是该领域研究的热点问题。最近德国与美国的研究人员^[2~5]发现光纤激光器在高功率的条件下存在模式不稳定性阈值,当激光器输出功率超过该阈值时,光束质量会突然下降,然而他们的结果是基于多模光纤而发现的。丹麦研究人员^[6]认为即使是单模的光纤激光器也会由于热光效应而导致多模行为的出现,进而

出现模式不稳定性及光束质量的退化。因此,分析光纤激光器中高阶模出现的机理变得尤为重要。耶拿大学的 Hädrich 等^[7]曾在 2006 年分析了热沉积对光子晶体光纤中本征模式特性的影响,他们认为随着功率的提升,光纤对高阶模的约束能力增强从而使得高阶模逐渐变为可在纤芯中传输的本征模。由于光纤本身是波导结构,其模式特性就会决定光纤激光器的光束质量。波导结构本质上来讲就是折射率分布,我们知道,折射率是温度的函数,光纤激光器中的温度变化必然会对光纤的波导结构,进而对光纤激光器的模式和光束质量造成影响。本文旨

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-02-22

作者简介: 任亚杰(1988—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: nudtrenyj@163.com

导师简介: 郭少锋(1975—),男,副研究员,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: jq_cao@126.com(通信联系人)

在分析温度变化对光纤激光器横向模式的影响。

2 光纤的热传导模型建立

为了分析方便,采用两层简化光纤模型:不区分内、外包层,两包层的热和力学特性假设是相同的;模型也忽略了实际光纤具有的涂覆层^[8]。抽运方式为前向抽运,所有抽运功率均在前端注入增益光纤。光纤模型如图1所示, a 和 b 分别为纤芯和包层的半径,采用极坐标系。

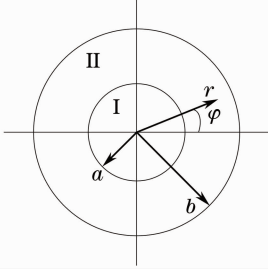


图1 光纤横截面结构示意图

Fig.1 Geometry of modeled fiber

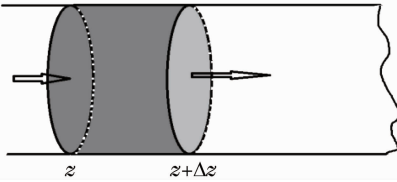


图2 光纤对抽运光的吸收

Fig.2 Absorbing of pump power

热传导方程如下:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_1(r, z)}{\partial r} \right] = -\frac{Q(z)}{k}, & 0 \leq r \leq a \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_2(r, z)}{\partial r} \right] = 0, & a \leq r \leq b \end{cases}, \quad (1)$$

式中 k 表示热导率, $Q(z)$ 为热密度,该方程忽略了光纤纵向的传热,因为只关注温度梯度对横向模式的影响。假定热源仅存在于纤芯且在横截面均匀分布,热源的存在是由于纤芯吸收抽运光的量子亏损而产生的,设抽运光沿轴向为指数分布,即

$$P_p(z) = P_0 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_p)z], \quad (2)$$

式中 $P_p(z)$ 为抽运光沿轴向的分布, P_0 为入纤功率, $\alpha_0 = \Gamma_p \sigma_{ap} N$ 为吸收系数, Γ_p 为抽运光填充因子, σ_{ap} 为抽运吸收截面, α_p 为散射损耗系数,由于散射损耗系数远小于吸收系数,可忽略。于是

$$P_p(z) = P_0 \exp(-\alpha_0 z), \quad (3)$$

则在光纤 z 处吸收的抽运光为

$$\Delta P = P_p(z) - P_p(z + \Delta z) \approx P_0 \exp(-\alpha_0 z) \alpha_0 \Delta z. \quad (4)$$

在光纤 z 处的热密度为

$$Q(z) = \frac{\Delta P \eta}{A \Delta z} = \frac{P_0 \exp(-\alpha_0 z) \alpha_0}{\pi a^2} \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right). \quad (5)$$

令

$$Q_0 = \frac{\alpha_0 P_0}{\pi a^2} \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right), \quad (6)$$

则

$$Q(z) = Q_0 \exp(-\alpha_0 z), \quad (7)$$

式中 Q_0 为光纤左端面处的热密度。从(1)~(7)式推导中可以看出,热密度与抽运光功率的纵向分布有一定的关系。要解出热传导方程还必须得到边界条件:

- 1) 纤芯处的温度应为有限值;
- 2) 在纤芯和包层的边界上温度应满足连续性,即

$$T_1|_{r=a} = T_2|_{r=a}, \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a}, \quad (8)$$

- 3) 在包层与冷却介质交界处应满足牛顿冷却定理

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=b} = \frac{h_c}{k} [T_C - T_2|_{r=b}], \quad (9)$$

式中 h_c 是传热系数, T_C 是冷却介质的温度。

3 光纤中温度的横向分布

由以上模型中热传导方程和边界条件可求得光纤中的温度分布^[8]为

$$\begin{aligned} T_1(r, z) &= T_C + \frac{Q_0 a^2}{4k} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} + 2 \ln \frac{b}{a} + \frac{2k}{h_c b}\right) \times \\ &\quad \exp(-\alpha_0 z), \quad 0 \leq r \leq a; \quad (10) \\ T_2(r, z) &= T_C + \frac{Q_0 a^2}{2k} \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{k}{h_c b}\right) \exp(-\alpha_0 z), \\ &\quad a \leq r \leq b. \quad (11) \end{aligned}$$

由(10)、(11)式可以看出温度沿纵向和横截面的分布是相互独立的,在纵向以指数规律衰减,在横截面内,由纤芯到包层,温度分别以二次方和对数规律衰减。影响温度分布的参数有:抽运功率 P_0 ,吸收系数 α_0 ,传热系数 h_c ,光纤横截面尺寸 b 。光纤参数设定如表1所示。

表1 光纤参数设定

Table 1 Parameters of fiber

Pump wavelength λ_p	Signal wavelength λ_s	Absorbing coefficient α_1
976 nm	1064 nm	2 dB/m
Core diameter $2a$	Clad diameter $2b$	Coolant temperature T_C
20 μm	400 μm	298 K
Thermal conductivity h_c	Convective coefficient k	Pump power P_0
100 W/(m ² ·K)	1.38 W/(m·K)	1000 W

因本文主要关注抽运光注入端面($z=0$)处的温度分布及折射率分布,所以以下计算所采用的端面均为左端面。将上述参数代入温度分布表达式,得到抽运功率为 1000 W 时的端面温度分布如图 3 所示。

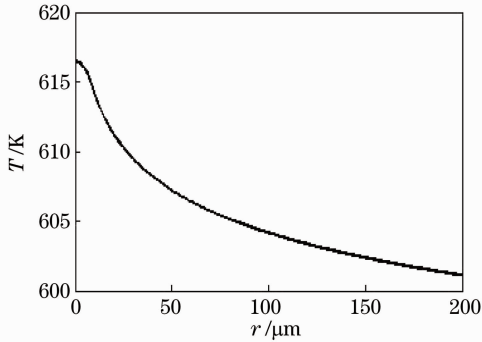


图 3 抽运功率为 1000 W 时光纤截面温度分布
Fig. 3 Temperature distribution at $z=0$ when the pump power is 1000 W

当抽运功率变化时温度分布会随之改变,如图 4 所示。可见随着抽运光功率增加(从下到上依次为 300、310、320 W)时,纤芯温度显著增加。光纤横截面的温度分布不仅与抽运功率有关,而且与传热系数、吸收系数、光纤尺寸等有关。随着传热系数的增加,即冷却条件变好时,纤芯温度显著降低,加强冷却强度是降低纤芯温度的很有效的措施;中心温度随着吸收系数的增加而线性增加;纤芯温度随着包层尺寸的增加而显著降低,大包层的光纤对于降低光纤温度有很好的效果。

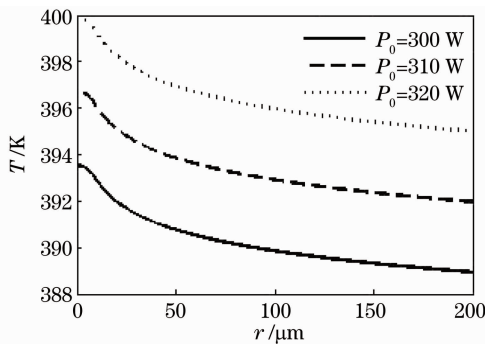


图 4 抽运功率改变时光纤截面温度分布的变化
Fig. 4 Temperature distributions with different pump powers

4 温致折射率变化对光纤模式影响的数值分析

4.1 抽运功率的影响

由温度梯度引起的折射率变化为

$$\Delta n_{\beta} = \beta(T - T_c), \quad (12)$$

式中 β 为折射率-温度系数,表征了折射率对温度的敏感程度。通过(10)~(12)式计算出不同抽运功率下温度分布及折射率的变化,其中光纤纤芯及包层折射率分别为 1.4596 和 1.4584,信号光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,折射率-温度系数为 $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,在此条件下得到光纤截面折射率分布随抽运功率的变化如图 5 所示。由图中可以看出,随着抽运功率的提高,折射率分布不再是阶跃型,而且纤芯和包层的折射率之差变大。纤芯半径为 $a=10 \mu\text{m}$,计算纤芯中心 $r=0$ 与贴近纤芯的内包层 $r=a$ 处的折射率差,即 $n_{r=0} - n_{r=a}$,画出此折射率差随抽运功率的变化如图 6 所示,发现当抽运功率提高后,折射率差线性增加,使得等效的数值孔径变大,作为波导结构,光纤纤芯对光场的约束能力更强了。

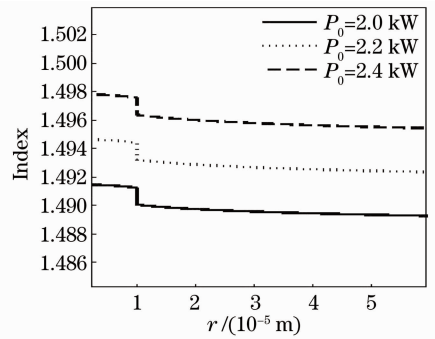


图 5 折射率分布随抽运功率的变化
Fig. 5 Refractive index profiles change with different pump powers

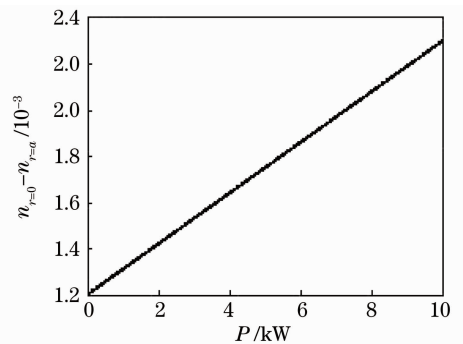


图 6 折射率差随抽运功率的变化
Fig. 6 Difference of refractive index at $r=0$ and $r=a$ changes with pump power

利用 COMSOL 软件计算不同抽运功率(0~20 kW)下光纤中可传输的横向模式,采用自然冷却,参数设置如表 1。图 7 分别给出了 LP_{01} 模、 LP_{11} 模、 LP_{21} 模和 LP_{02} 模随抽运功率提升而产生的变化,从图中可以看出,各阶模式的光场分布向纤芯收缩。数值分析结果显示,当抽运功率超过 7 kW 时,

LP₂₁模与LP₀₂模在包层中的能量已经很显著地约束在纤芯中,随着功率的进一步提升,更多的高阶模式会出现。分析原因为:高阶模的产生是由折射率变化引起的,折射率由阶跃变为渐变,纤芯中心与靠

近纤芯的内包层的折射率之差随着抽运光功率的增加线性增加(见图6),导致数值孔径变大,光纤对高阶模的约束更强,从而导致模式向纤芯收缩。

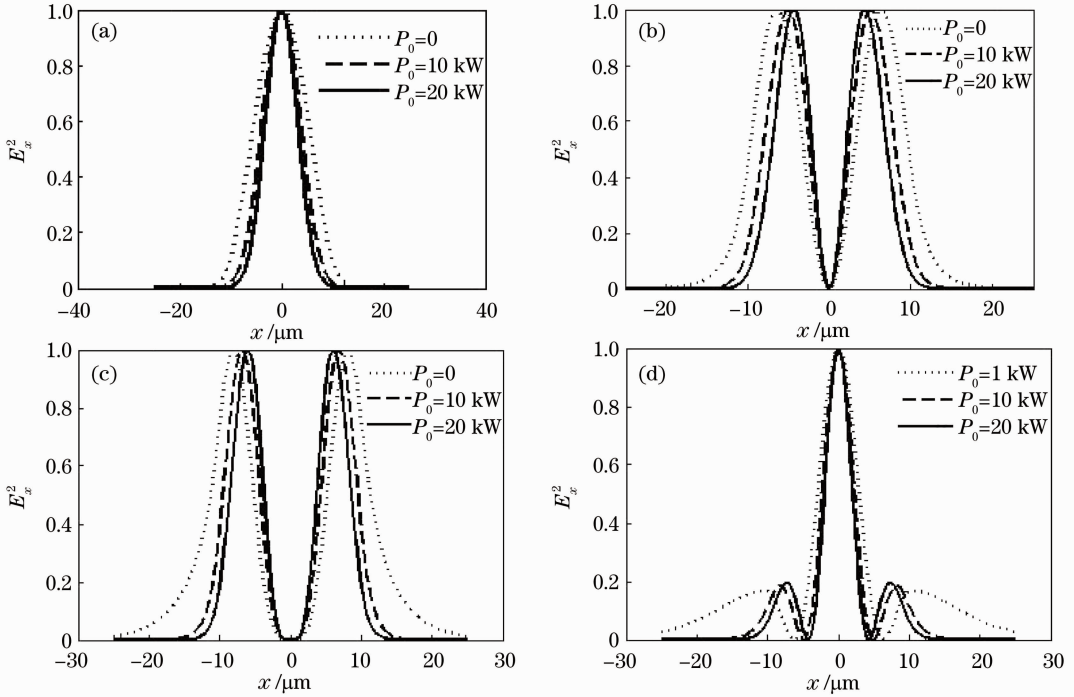


图7 (a) LP₀₁模、(b) LP₁₁模、(c) LP₂₁模和(d) LP₀₂模随抽运功率提升而产生的变化

Fig. 7 Profiles of modes (a) LP₀₁, (b) LP₁₁, (c) LP₂₁ and (d) LP₀₂ change with pump power

4.2 折射率-温度系数 β 的影响

折射率-温度系数 β 表征的是材料的折射率对温度的敏感程度。为研究折射率-温度系数 β 对光纤模式的影响,抽运功率设为 10 kW,其他参数设置不变。折射率随 β 的改变如图 8 所示,由图中可以看出,折射率随 β 的增大有明显改变,折射率总体抬高,纤芯较包层折射率提升得更快,折射率分布由近似阶跃分布变为近似渐变分布。

增大折射率差线性增加,使得等效的数值孔径变大,作为波导结构,光纤纤芯对光场的约束能力更强了。

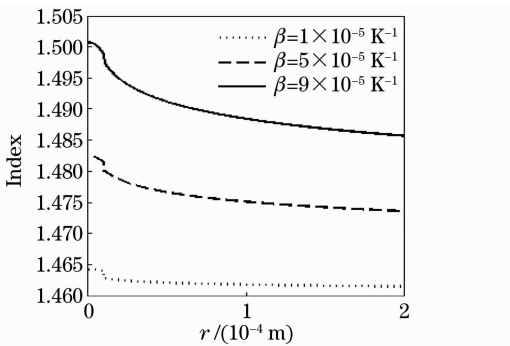


图8 不同 β 值下折射率分布

Fig. 8 Refractive index profiles change with different β

纤芯半径为 $a = 10 \mu\text{m}$,计算 $n_{r=0} - n_{r=a}$,画出此时折射率差随着 β 值的变化如图 9 所示,发现随着 β

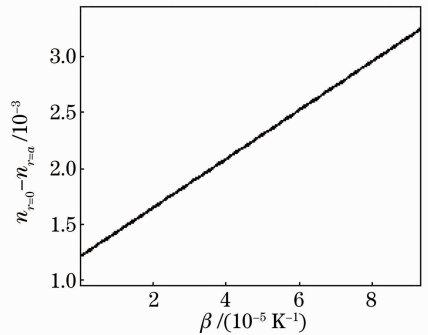


图9 折射率差随 β 值的变化

Fig. 9 Difference of refractive index at $r=0$ and $r=a$ changes with β

图 10 分别给出了在抽运功率为 10 kW 时,光纤中 LP₀₁模、LP₁₁模随 β 值的变化,从图中可以看出,随着 β 值的增加,模式的光场分布向纤芯收缩。仿真结果表明,当 β 值超过 $5 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ 时,LP₂₁模和 LP₀₂模在包层的能量已经变得极小,这是由于折射率-温度系数 β 值的变化引起折射率的变化,导致光波导结构的不同,从而本征模也发生了变化, β 值

增加时,有效数值孔径变大,从而导致光场分布向纤芯收缩。

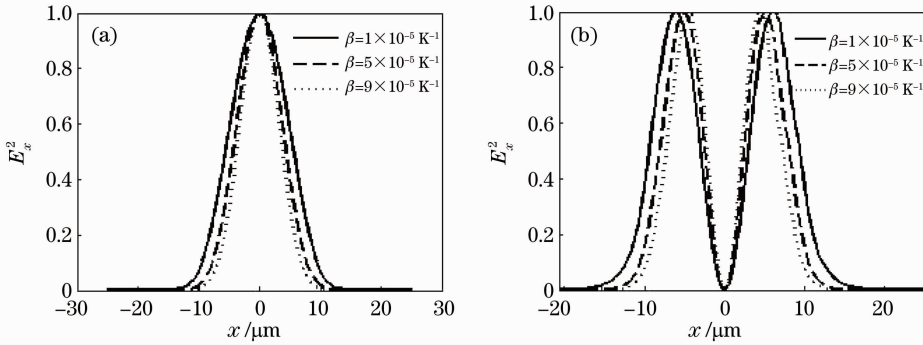


图 10 (a) LP₀₁ 模和(b) LP₁₁ 模(b)在不同 β 值下的变化

Fig. 10 Profiles of modes (a) LP₀₁ and (b) LP₁₁ change with different β

通过数值分析发现,随着 β 值的增加,光纤中传输模式的数量也会发生改变,当 β 值在 10^{-6} K^{-1} 量级时,模式的变化非常小,也不会产生高阶模;当 β 值的在 10^{-5} 时,模式的收缩已经比较明显,高阶模也随之出现;当 β 值超过 $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 时,LP₂₁ 模和 LP₀₂ 模大部分能量已经被约束在纤芯中。

4.3 抽运吸收系数的影响

为分析抽运吸收系数对光纤模式的影响,设定抽运功率为 10 kW, β 值为 $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。抽运光的吸收系数主要取决于纤芯掺杂浓度、纤芯包层面积

比、吸收截面等。吸收系数不同表明光纤对抽运光的吸收能力不同,产生的热量也不同,从而导致温度分布的不同,进一步导致折射率分布的不同。

图 11 分别给出了光纤中 LP₀₁ 模、LP₁₁ 模随吸收系数增加而产生的变化,随着抽运吸收系数的增加,模式的光场分布向纤芯收缩。这是由于随着抽运吸收系数的增加,折射率由阶跃变为近似渐变,纤芯中心与近纤芯内包层的折射率之差也随之增加,导致数值孔径变大,光纤纤芯对光场的约束更强,从而导致模式向纤芯收缩。

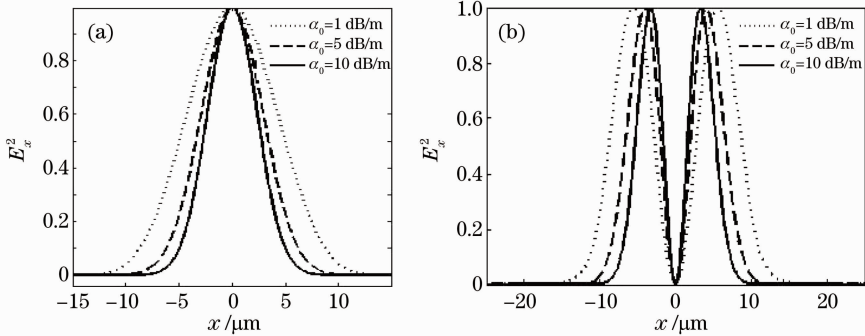


图 11 (a) LP₀₁ 模和(b) LP₁₁ 模(b)随吸收系数的变化

Fig. 11 Profiles of modes (a) LP₀₁ and (b) LP₁₁ change with different absorbing coefficients

5 结 论

建立光纤横截面热传导模型,分析了光纤截面上温度的分布,得到了温度分布与光纤参数如抽运功率、热交换系数、抽运吸收系数、光纤内包层尺寸的关系。发现光纤截面上的温度分布在纤芯内以二次方规律递减,而在包层区则以对数规律衰减。随着抽运光功率的增加,纤芯温度显著增加;随着传热系数的增加,即冷却条件变好时,纤芯温度显著降低,加强冷却强度是降低纤芯温度的很有效的措施;中心温度随着吸收系数的增加而线性增加;纤芯温

度随包层尺寸的增加而显著降低,大包层的光纤对于降低光纤温度有很好的效果。

依据温度分布得到了光纤截面的折射率分布,进一步分析了当光纤参数改变时,光纤中光场分布的变化。结果发现,随着抽运功率的提升,各阶模式的光场分布向纤芯收缩;随着 β 值的增加,模式的光场分布向纤芯收缩;随着抽运吸收系数的增加,模式的光场分布也向纤芯收缩。而高阶模也在这一过程中收缩到纤芯中,有可能获得增益并传输。这是高功率抽运的光纤激光器或放大器中高阶模出现的一

种机理。

参 考 文 献

- 1 A. Tünnermann, T. Schreiber, J. Limpert. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(25): F71~F78
- 2 C. Jauregui, T. Eidam, J. Limpert *et al.*. The impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3258~3271
- 3 A. V. Smith, J. J. Smith. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10180~10192
- 4 T. Eidam, C. Wirth, C. Jauregui *et al.*. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(14): 13218~13224
- 5 F. Stutzki, H. Otto, F. Jansen *et al.*. High-speed modal decomposition of mode instabilities in high-power fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(23): 4572~4574
- 6 K. R. Hansen, T. T. Alkeskjold, J. Broeng *et al.*. Thermo-optical effects in high-power ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 23965~23980
- 7 S. Hädrich, T. Schreiber, T. Lingert *et al.*. Thermo-optical behavior of rare-earth-doped low-NA fibers in high power operation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6091~6097
- 8 D. C. Brown. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 207~217

栏目编辑:李文喆