

# 高功率激光运转条件下大模场掺镱石英光纤模式特性的仿真研究

沈超超<sup>1</sup>, 于飞<sup>1,2\*</sup>, 于春雷<sup>1,2</sup>, 胡丽丽<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>国科大杭州高等研究院物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024

**摘要** 在高功率激光运转条件下, 掺杂稀土离子的量子亏损和玻璃材料的本征吸收均会造成光纤放大器中增益光纤温度的整体上升与梯度分布。在热平衡状态下, 光纤材料的热光效应将会诱导光纤横向折射率的再分布, 引发高功率激光运转条件下增益光纤模式特性的改变。为此, 利用多物理场有限元建模的数值计算方法对高功率激光运转条件下大模场掺镱石英光纤的热致模式特性展开系统研究, 分析总结大模场增益光纤的模式特性在不同激光运转功率、增益光纤设计参数(纤芯直径、数值孔径、热光系数)和光纤弯曲使用条件下的变化规律。结果表明, 随着激光运转功率的增加, 纤芯和包层之间的温差会变大, 从而导致光纤的归一化参数  $V$  值增大, 最终使模式的传输损耗系数减小, 模式在纤芯区域的功率因子增大。

**关键词** 激光光学; 大功率激光光纤放大器; 有限元仿真; 大模场掺镱石英光纤; 模式特性; 热光效应

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1014003

## Numerical Study of Modal Properties of Large-Mode-Area Yb-Doped Optical Fiber in High-Power Laser Amplification

Shen Chaochao<sup>1</sup>, Yu Fei<sup>1,2\*</sup>, Yu Chunlei<sup>1,2</sup>, Hu Lili<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

**Abstract** Under the condition of high power laser operation, the quantum defect of rare earth ions and the intrinsic absorption of glass materials will lead to the overall increase and gradient distribution of the temperature of the gain fiber in the optical fiber amplifier. In the state of thermal equilibrium, the thermo-optic effect of optical fiber materials will induce the redistribution of transverse refractive index of optical fiber and cause the change of mode characteristics of gain fiber under the condition of high power laser operation. For this reason, the numerical calculation method of multi-physical field finite element modeling is used to systematically study the thermally induced mode characteristics of large mode field ytterbium doped quartz fiber under the condition of high power laser operation. The changes of mode characteristics of large mode field gain fiber under different laser operating power, gain fiber design parameters (core diameter, numerical aperture, thermo-optical coefficient) and fiber bending are analyzed and summarized. The results show that with the increase of laser power, the temperature difference between the core and the cladding will increase, which leads to the increase of the parameter  $V$  of the fiber, the decrease of the transmission loss coefficient of the mode and the increase of the power factor of the mode in the core region.

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-12-06; 录用日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61935002, 61775224, 61875216)、中国科学院基金(ZDBS-LY-JSC020)、国家重点研发计划(2020YFB1805900)

通信作者: \*yufei@siom.ac.cn; \*\*hulili@siom.ac.cn

**Key words** laser optics; high-power laser fiber amplifiers; finite-element simulation; large-mode-area Yb-doped optical fiber; modal properties; thermo-optical effect

## 1 引言

大模场增益光纤因具有较大的纤芯增益面积、较短的使用长度,所以可以降低光纤非线性效应的影响,有效提高光纤放大器的输出功率<sup>[1]</sup>。大模场光纤具有独特的纤芯结构设计,这可以使高阶模具有更高的离域性,为此在达到高功率输出的同时保证了输出光束的单模稳定性<sup>[2]</sup>。近年来,掺镱大模场光纤的输出功率稳步提升<sup>[3]</sup>,通过功率为 6.7 kW、波长为 915 nm 的半导体激光器来泵浦大模场掺镱石英光纤,可以在波长为 1080 nm 处实现 4.05 kW 的输出<sup>[4]</sup>,采用半导体激光器来多路泵浦掺镱大模场光纤,可以在 1079.4 nm 处实现 10 kW 级的高功率输出<sup>[5]</sup>。

目前,热致光纤的横向模式不稳定性(TMI)是影响大功率激光光纤放大器进一步提高激光输出功率的主要因素。在高功率激光运转条件下,增益光纤内部温升会造成光纤折射率的再分布,当激光运转功率超过一定阈值时,纤芯区域中的基模与高阶模之间会发生能量交换,从而导致输出光束质量的大大降低<sup>[6]</sup>。

由于 TMI 现象的形成机理复杂,一般采用受激热瑞利散射(STRS)模型来描述 TMI 中高阶模激发与能量耦合的现象<sup>[7]</sup>。高阶模被激发后,少模增益光纤中基模与高阶模的干涉会形成沿光纤轴向方向的行波,热光效应下其会诱导光纤轴向的温度发生周期性改变。一定条件下,由于热致折射率的扰动可形成较为稳定的长周期折射率光栅,其可将基模(FM)的能量高效转移至高阶模(HOM),即形成 TMI 现象<sup>[8]</sup>。

实验与理论研究表明,TMI 现象与纤芯区域的掺杂浓度、纤芯与包层的几何比例、种子光源的输入功率、泵浦光的吸收率、纤芯的横模数量以及高阶模的传输损耗<sup>[9-12]</sup>等因素存在复杂关联。在高功率激光运转条件下,总结热致光纤模式特性的变化规律是深入研究 TMI 现象形成机制的基础。本文在大功率激光运转条件下,将大模场掺镱增益光纤的模式特性作为研究对象,建立基于固体传热和波动光学的多物理场有限元仿真模型,系统研究不同激光运转功率、光纤设计参数和光纤使用弯曲半径等对光纤模式特性的影响,这为进一步深入理解 TMI 现

象的物理形成机制提供参考。

## 2 基于有限元法的多物理场数值计算模型

### 2.1 物理建模分析

在高功率激光运转条件下,泵浦波长和激光波长处的模场光强呈特定分布,在稀土离子的量子亏损、光纤基质材料的吸收作用下将会引发光纤温度的迅速升高。当光纤截面温度在热传导作用下平衡时,光纤内部的温度呈梯度分布,在热光效应的作用下将诱导光纤横向折射率的再分布,进而改变泵浦波长与激光波长处模场光强的分布特性,而模场光强的再分布将会再次引发光纤温度梯度与折射率的改变。在不同功率的激光运转条件下,模场光强分布、光纤温度梯度分布和光纤折射率分布三者平衡状态不同,这会造成增益光纤的模式特性在不同激光放大功率下发生改变。

使用商用有限元软件 COMSOL Multiphysics 并联合固体力学和光学模块对上述复杂的平衡状态进行物理建模,计算不同激光运转功率下大模场掺镱石英光纤的稳态模式特性。计算迭代流程如图 1 所示,其中  $i$  为迭代次数,  $(x, y)$  为二维坐标点,  $dA$  为横截面积分面元,  $M$  为光场迭代收敛常数,  $\Sigma_a$  为

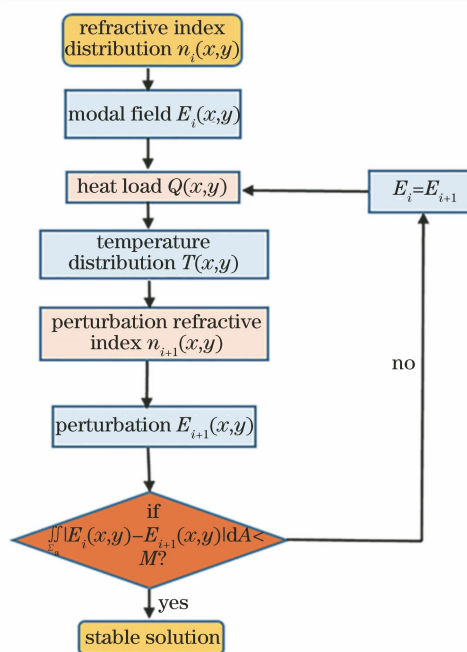


图 1 光束迭代流程图

Fig. 1 Flowchart of beam iteration

光纤端面。

弱导近似条件下,使用线偏振模来描述大模场增益光纤的模式。线偏振模对光纤折射率分布的依赖由标量亥姆霍兹方程来描述,表达式为

$$\nabla^2 E(x, y, z) + k^2 E(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

式中: $\nabla$ 为哈密顿算符; $(x, y, z)$ 为三维坐标点; $E(x, y, z)$ 为线偏振模的电场分布; $k$ 为光纤中光波的波数。如果定义 $z$ 轴为光纤的轴向,那么模式电场分布可表示为

$$E(x, y, z) = E(x, y) \exp(-i\beta_z z), \quad (2)$$

式中: $\beta_z$ 为轴向的等效传播常数。在光泵浦条件下的激光受激放大过程,量子亏损和材料本征吸收可将模式的光强分布转化为热量分布,当在热传导条件下达到热平衡时,将形成稳定的光纤温度梯度分布。忽略 $z$ 轴方向的光功率衰减和热传导,仅对光纤横向上热致模式特性的变化展开研究。

对模型进行简化,假设条件如下:假设泵浦光场的模式场强在纤芯内均匀分布<sup>[13-14]</sup>,由量子亏损产生的热负荷也均匀分布在纤芯区域;假设材料吸收所引发的热负荷主要来自激光能量,决定于基模功率下的光纤损耗。因此,在激光运转条件下,大模场掺镱石英光纤由光场引发的热源分布 $Q(x, y)$ 可近似表示为

$$Q(x, y) = \frac{1}{A_{\text{core}}} \times \bar{P} \times \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) + P(x, y) \times \sigma, \quad (3)$$

$$\bar{P} = \frac{\iint_{\Sigma_c} P(x, y) dA_{\text{core}}}{A_{\text{core}}}, \quad (4)$$

式中: $A_{\text{core}}$ 为纤芯面积; $\bar{P}$ 为激光的平均面功率密度; $\lambda_p$ 和 $\lambda_s$ 分别为泵浦光和种子光的波长;

$P(x, y) = \frac{\epsilon}{2} E^2(x, y)$ 为激光的面功率密度,其中 $\epsilon$ 为介电常数; $\sigma = 1 - \exp(-\alpha/4.343)$ 为激光波长下光纤损耗所引发的每米长度功率吸收系数,其中 $\alpha$ 为光纤损耗,单位为 dB/m; $\Sigma_c$ 为纤芯区域。

在模型中采用水冷方式对光纤进行降温,假设光纤外壁的边界条件为自然对流散热。在二维条件下采用稳态热传导方程来描述光纤端面的温度分布,根据牛顿冷却定理来描述光纤外壁的散热过程,表达式分别为

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y)}{\partial t} + \nabla[-K_c \cdot \nabla T(x, y)] = Q(x, y), \quad (5)$$

$$q = h \times (T_{\text{ext}} - T_w), \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为石英密度; $C_p$ 为石英比热容; $T(x, y)$ 为温度场分布; $t$ 为时间变量; $K_c$ 为固体的导热系数; $q$ 为对流热通量; $h$ 为导热系数; $T_{\text{ext}}$ 为外壁温度; $T_w$ 为水温。

联立式(1)~(6),可以求解得到初始模式光场下光纤的稳态温度分布 $T(x, y)$ 。光纤内部材料的折射率因热光效应而产生的变化为

$$\Delta n(x, y) = T_{\text{oc}} \times [T(x, y) - T_0], \quad (7)$$

式中: $\Delta n(x, y)$ 为截面上折射率的变化量; $T_{\text{oc}}$ 为纯石英的热光系数; $T_0 = 293.15$  K 为环境温度。此处,仅考虑由热光效应引起的折射率变化,忽略由热应力引起的材料折射率变化<sup>[15-16]</sup>。

将式(7)的结果代入亥姆霍兹方程中,得到折射率分布的改变会导致模式场分布的改变,最终得到新光场分布 $E'(x, y)$ 。将 $E'(x, y)$ 作为初始光场来重复计算上述物理过程,经过多次迭代后,当模场分布的计算结果收敛于特定解时,认为该模场即为该激光功率运转条件下大模场增益光纤的稳态基模场。

## 2.2 仿真参数

模型中计算所需的参数均来自中国科学院上海光学精密机械研究所自研的大模场掺镱石英光纤在光纤放大器运转条件下的实测参数,具体仿真参数如表 1 所示,其中 $d_{\text{core}}$ 为纤芯直径, $d_{\text{clad}}$ 为包层直径, $R_b$ 为弯曲半径,此处弯曲半径分别取 80, 85, 90, 95, 100 mm<sup>[17-18]</sup>。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

Parameter	Value
$d_{\text{core}}/\mu\text{m}$	25
$d_{\text{clad}}/\mu\text{m}$	400
$R_b/\text{mm}$	80-100
$K_c/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.38
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2200
$C_p^{[19]}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1172
$\lambda_p/\text{nm}$	976
$\lambda_s/\text{nm}$	1080
$T_{\text{oc}}/\text{K}^{-1}$	$1.04 \times 10^{-5}$
$T_0/\text{K}$	293.15

纤芯区域的相对折射率如图 2 所示,其中石英玻璃在激光波长处的折射率为 1.4441。该光纤在实际使用过程中可以实现最大功率为 2.2 kW 的单模激光输出<sup>[20]</sup>,因此在仿真中结合实际情况,激光运转功率由 0 逐渐增大至 3.5 kW。

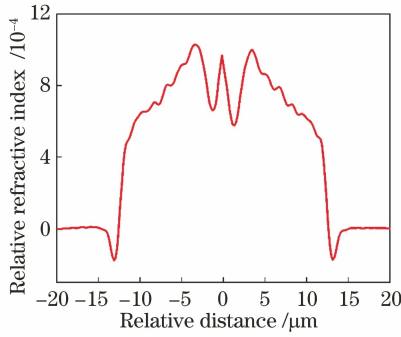


图 2 纤芯区域的相对折射率

Fig. 2 Relative refractive index of fiber core region

在迭代过程中定义了迭代模场误差因子  $M_i$ , 即电场差值的绝对值在光纤端面  $\Sigma_a$  上的积分, 表达式为

$$M_i = \iint_{\Sigma_a} |E_i(x, y) - E_{i+1}(x, y)| dA_{\text{core}}, \quad (8)$$

式中:  $E_i(x, y)$  为迭代第  $i$  次计算得到的模式场分布。通过监测误差因子  $M_i$  是否收敛于零, 来判断光场分布的循环计算结果是否为稳态解。

### 3 仿真结果讨论与分析

#### 3.1 激光运转功率对输出光束质量的影响

掺铋石英光纤在不同弯曲半径下, 基模 ( $LP_{01}$ ) 和高阶模 ( $LP_{11}$ ) 的传输损耗均随着激光运转功率的改变而发生变化, 如图 3 所示。从图 3 可以发现, 激光功率的增加能够有效降低基模与高阶模的传输损耗, 即弯曲损耗; 当弯曲半径为 100 mm、运转功率为 3500 W 时, 高阶模的传输损耗可降低到  $10^{-2}$  dB/m。此时, 仅通过弯曲光纤的方式难以有效增大高阶模的传输损耗, 而达到抑制高阶模激光输出的目的。在高功率激光运转条件下, 随着高阶模传输损耗的降低, 大模场掺铋石英光纤的激光输出模式质量将不可避免地出现下降。

在光纤的弯曲半径为 90 mm 时, 不同激光运转功率下纤芯区域的温度分布如图 4 所示。从图 4 可以看到: 在激光运转条件下, 纤芯区域的温度沿光纤径向逐渐下降; 随着运转功率的增加, 纤芯和包层的温度均整体升高, 同时芯包之间的温差也随之增加, 最终在热光效应作用下引发光纤数值孔径 (NA) 和归一化常数  $V$  的增加。一般地, 光纤模式的弯曲传输损耗与  $V^2$  成反比<sup>[21]</sup>, 因此激光运转功率的升高将有效降低弯曲传输损耗。

为了进一步评估高功率激光运转条件下的光束质量, 仿真中引入模式区分度 (MD) 进行评估<sup>[22]</sup>。

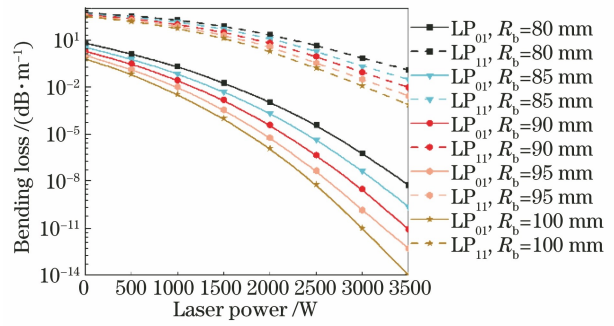


图 3 不同弯曲半径下光纤的基模与高阶模损耗随激光运转功率的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of fundamental mode and higher-order mode loss of optical fiber with laser operating power under different bending radius

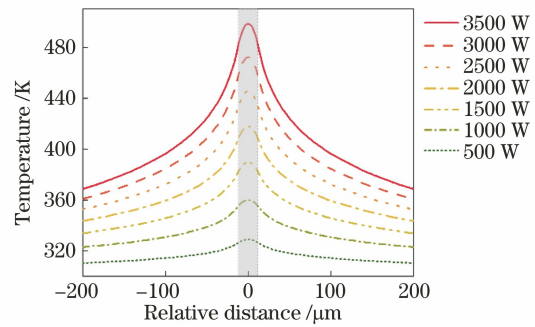


图 4 90 mm 的弯曲半径下不同激光运转功率的横向温度分布曲线

Fig. 4 Transverse temperature distribution curves of different laser operating powers at bending radius of 90 mm

定义纤芯功率因子  $\eta$  为某一模式在纤芯区域的功率占该模式在全光纤截面的功率比例, 表达式为

$$\eta = \frac{\iint_{\Sigma_c} |E(x, y)|^2 dA}{\iint_{\Sigma_a} |E(x, y)|^2 dA}. \quad (9)$$

$\eta$  决定着光纤模式的功率在芯包中所占的比例, 直接影响着该模式能否被纤芯区域的增益离子有效放大。在少模光纤中, 比较基模和高阶模在纤芯区域的功率因子, 可以衡量该光纤输出光束的基模质量。因此, 模式区分度表示基模与高阶模在纤芯区域的功率因子之差, 表达式为

$$\Delta\eta = \eta_{\text{FM}} - \eta_{\text{HOM}}, \quad (10)$$

式中:  $\eta_{\text{FM}}$  为基模在纤芯区域的功率因子;  $\eta_{\text{HOM}}$  为高阶模在纤芯区域的功率因子。当  $\Delta\eta$  大于 30% 时, 可以认定基模得到了优先放大<sup>[22]</sup>。当  $\Delta\eta$  越大时, 高阶模对纤芯区域中光束的贡献越小, 故输出光束的质量越高。

在不同弯曲半径下,模式区分度随激光运转功率的变化趋势如图 5 所示。从图 5 可以看出,当弯曲半径为 80 mm 时,30% 的模式区分度处的激光阈值达到 1290 W,而在弯曲半径为 100 mm 时,基模的优先放大阈值只有 750 W。光纤弯曲显著增大了光纤内部基模的优先放大阈值,模式区分度随着激光运转功率的增加而逐渐下降,这一现象与高功率下光纤数值孔径的增大密切相关。

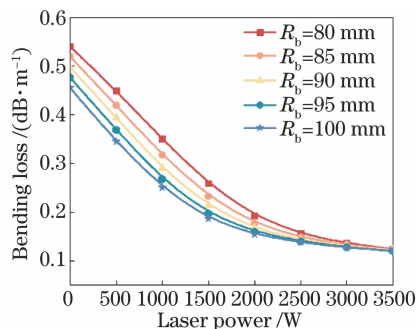


图 5 不同弯曲半径下模式区分度随激光运转功率的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of mode differentiation with laser power under different bending radii

假设光纤的弯曲半径为 90 mm,当激光运转功率为 0,1000,2000 W 时,高阶模场的分布情况如图 6 所示。从图 6 可以看到:随着激光功率的增加,芯包之间的折射率差值变得更大,V 开始增大,这会导致高阶模在纤芯区域的功率因子逐渐增大<sup>[23]</sup>;随着模式分布向纤芯区域的收缩,光纤的模式区分度开始下降。

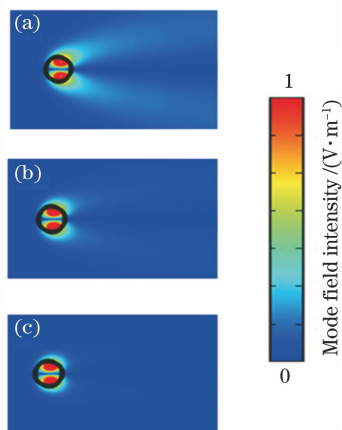


图 6 90 mm 的弯曲半径下不同激光功率的高阶模分布情况。(a) 0; (b) 1000 W; (c) 2000 W

Fig. 6 Higher-order mode distribution of different laser powers at bending radius of 90 mm. (a) 0; (b) 1000 W; (c) 2000 W

### 3.2 纤芯直径对光束质量的影响

如图 7 所示,通过线性放大纤芯折射率沿光纤

径向的分布,数值计算纤芯直径对激光光束质量的影响。

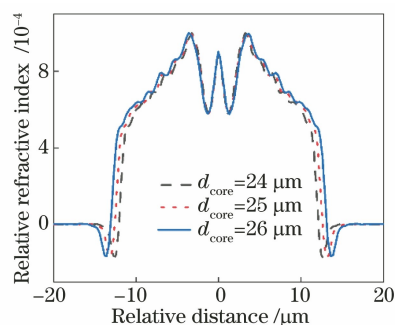


图 7 不同纤芯直径的折射率分布曲线

Fig. 7 Refractive index distribution curves of different core diameters

不同纤芯直径对输出光束模式特性的影响如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以看出:当纤芯直径的波动为 1 μm 时,基模与高阶模的传输损耗变化都很微小;在纤芯直径更小时,模式的传输损耗越大。结合式(10)和上述分析,纤芯直径的减小直接导致了光纤 V 值的减小,从而导致弯曲条件下模式的传输损耗系数变大,纤芯功率因子 η 变小,进而使模式区分度变大,基模的优先放大阈值增大。

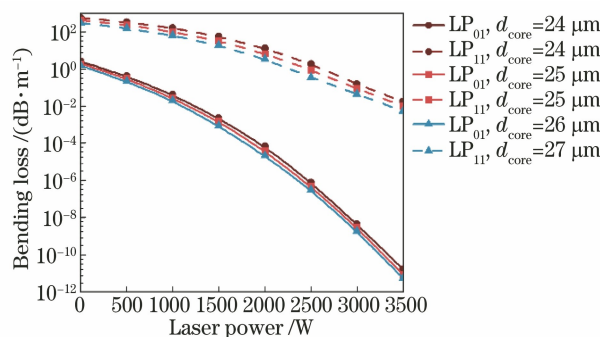


图 8 不同纤芯直径下基模与高阶模的传输损耗随激光运转功率的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of transmission loss of fundamental mode and higher-order mode with laser operating power under different core diameters

### 3.3 数值孔径对光束质量的影响

为了抑制光纤的非线性效应,除了增大光纤的模场面积,还可以增加纤芯区域中增益离子的掺杂浓度,缩短光纤的使用长度。但纤芯区域中增益离子浓度的增加会使该区域的折射率同步上升,最终数值孔径也随之上升。同时,热光效应也会导致 NA 的变化,并使纤芯区域中模式数量发生变化,从而影响模式传输损耗和模式区分度<sup>[24]</sup>。

如图 10 所示,纤芯区域的折射率有整体升高和

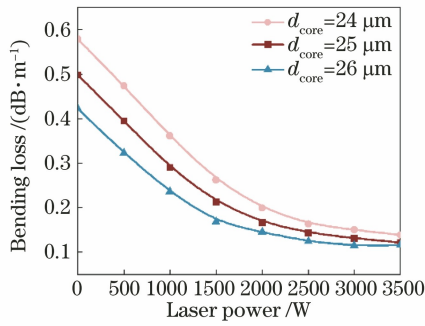


图 9 不同纤芯直径下模式区分度随运转功率的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of mode differentiation with operating power under different core diameters

下降的改变,其变化幅度为原平均相对折射率的 10%(原始平均相对折射率  $n_r = 6.53 \times 10^{-4}$ )。

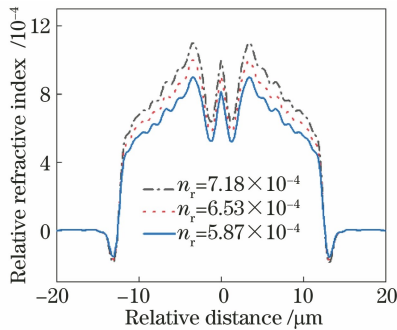


图 10 不同  $n_r$  下的纤芯折射率

Fig. 10 Refractive index of fiber core under different  $n_r$

当光纤的弯曲半径为 90 mm 时,不同  $n_r$  下基模与高阶模的传输损耗随激光运转功率的变化曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,纤芯折射率的升高会导致光纤的 NA 和 V 值同时增大,相同激光运转功率下两种模式的传输损耗都比原始状态低,反之纤芯折射率下降之后损耗都比原始状态高。

三种纤芯折射率下的模式区分度曲线如图 12

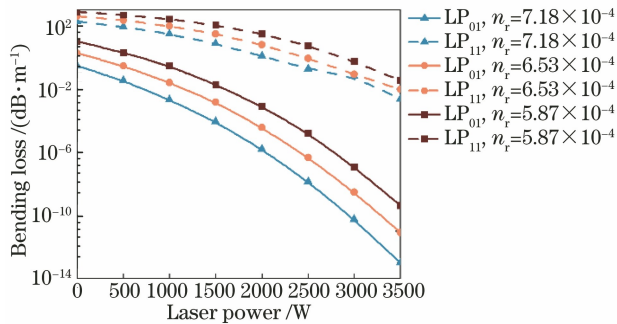


图 11 不同  $n_r$  下基模与高阶模损耗随激光运转功率的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of fundamental mode and higher-order mode loss with laser operating power under different  $n_r$

所示。从图 12 可以看出:纤芯的折射率整体升高后,芯包之间的折射率差值更大,这会导致高阶模在纤芯区域的功率因子增大,此时模式区分度减小;相反,纤芯的折射率整体降低后,芯包之间的折射率差值减小,低 NA 和 V 值下,高阶模在纤芯区域的功率因子更小,此时模式区分度更大。

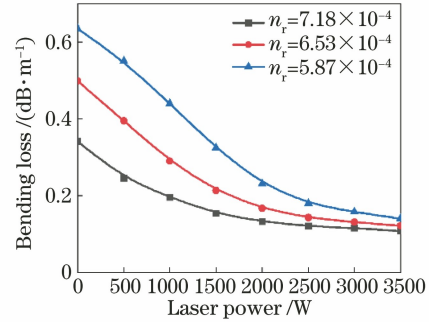


图 12 不同  $n_r$  下模式区分度随激光运转功率的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of mode differentiation with laser operating power under different  $n_r$

### 3.4 材料热光系数对光束质量的影响

$P_2O_5$  因具有极小的热光系数 ( $-13.3 \times 10^{-6} \pm 0.08 K^{-1}$ ), 所以是石英光纤中的一种重要掺杂材料, 已被广泛应用于光纤传感器<sup>[25]</sup> 和光纤激光器领域<sup>[26]</sup>。向纤芯区域掺杂摩尔分数为 4% 的  $P_2O_5$  后, 可使纤芯区域的整体热光系数变为  $9 \times 10^{-6} K^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 从而有效降低光纤材料的热光系数。一般地, 磷掺杂石英玻璃的折射率随着掺杂浓度的增加而增大, 此时可以采用同时掺氟的方法来保持总折射率的恒定。仿真中, 忽略由掺杂  $P_2O_5$  引发折射率的改变。

在光纤的弯曲半径为 90 mm 时, 普通掺铒光纤与掺杂摩尔分数为 4% 的  $P_2O_5$  后, 基模和高阶模的传输损耗如图 13 所示。从图 13 可以看到, 掺杂摩尔分数为 4% 的  $P_2O_5$  后, 两种模式的传输损耗相比不掺杂均变得更大, 随着功率的升高, 损耗降低得更慢。这是因为在相同的温差下, 小热光系数的材料的温升会导致芯包之间的折射率差值更小, 此时 V 值相比高热光系数更小, 因此传输损耗更大。即使激光运转功率达到 3500 W, 高阶模的传输损耗仍然有  $10^2$  dB/m, 而基模的传输损耗却达到  $10^{-5}$  dB/m, 显然经过弯曲长度为 8~10 m 的光纤传输后, 高阶模的强度相对基模可以忽略不计, 这说明使用较小热光系数的材料更能维持弯曲光纤单模传输的稳定性。

减小热光系数后, 不同弯曲半径下光纤模式区

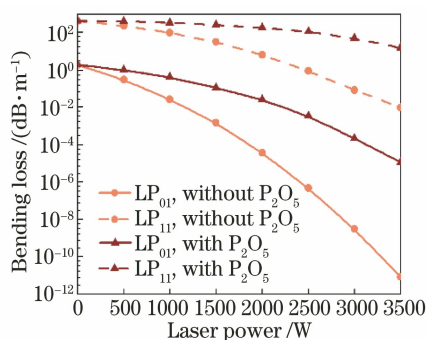


图 13 改变热光系数前后基模与高阶模损耗随运转功率的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of fundamental mode and higher-order mode loss with operating power before and after changing thermo-optic coefficient

分度的变化曲线如图 14 所示。从图 14 可以看到：纤芯掺杂摩尔分数为 4% 的  $P_2O_5$  后，在激光运转功率较低的情况下，量子亏损和材料吸收所导致的纤芯与包层之间的温度差较小，温升后芯包之间的折射率差值反而比初始时刻更小， $V$  值更小，所以在弱泵浦时，模式区分度存在一段微小的上升趋势；随着激光运转功率的升高，芯包之间的温差变得更大，折射率差值也增大，最终导致光纤的  $V$  值和模式功率因子变大，此时包层对纤芯模式的约束作用更强。因此从整体来看，掺杂  $P_2O_5$  后热光系数小的光纤模式区分度表现出低功率运转下的短暂上升和高功率运转下的缓慢下降。与无掺杂  $P_2O_5$  的模式区分度相比，同一输入功率下，掺杂  $P_2O_5$  后高阶模的纤芯功率因子更小，基模的优先放大阈值更大。

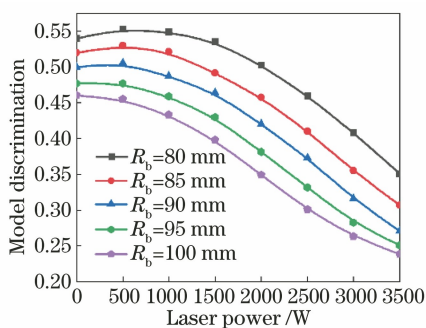


图 14 不同弯曲半径下模式区分度随运转功率的变化曲线  
Fig. 14 Variation curves of mode differentiation with operating power under different bending radii

## 4 结 论

本文在光纤放大器的高功率泵浦过程中，结合稀土离子量子亏损和材料本征吸收以及热光效应，基于有限元法对掺铋石英光纤的模式传输损耗、模

式区分度进行了系列仿真研究，借助迭代算法仿真研究并分析激光运转功率、光纤的弯曲半径、纤芯直径、数值孔径和材料热光系数对模式传输损耗和模式区分度的影响规律。结果显示，随着激光运转功率的增加，纤芯和包层之间的温差会变大，从而导致光纤的归一化常数  $V$  增大，最终使模式的传输损耗系数减小，模式在纤芯区域的功率因子增大。通过优化掺铋石英光纤的结构和材料参数，均可以使光纤放大器输出光束的质量实现进一步提升。

## 参 考 文 献

- [1] Sidharthan R, Lin D, Lim K J, et al. Ultra-low NA step-index large mode area Yb-doped fiber with a germanium doped cladding for high power pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (14): 3828-3831.
- [2] Eznaveh Z S, Antonio-Lopez J E, Anderson J, et al. Reduced-symmetry LMA rod-type fiber for enhanced higher-order mode delocalization [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1974-1977.
- [3] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势 [J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2000001.  
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (20): 2000001.
- [4] 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.
- [5] Lin H H, Xu L X, Li C Y, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.
- [6] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [7] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (3): 2642-2656.
- [8] Otto H J, Jauregui C, Eidam T, et al. Dynamics and origin of mode instabilities in high power fiber laser amplifiers [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, May 6-11, 2012, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2012: CF2N.7.
- [9] Tao R M, Su R T, Ma P F, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods

- [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(2): 025101.
- [10] Tao R M, Wang X L, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 17677400.
- [11] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [12] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. Novel constant-cladding tapered-core ytterbium-doped fiber for high-power fiber laser oscillator[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e21.
- [13] Coscelli E, Dauliat R, Poli F, et al. Analysis of the modal content into large-mode-area photonic crystal fibers under heat load[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 323-330.
- [14] Kong L C, Leng J Y, Zhou P, et al. Thermally induced mode loss evolution in the coiled ytterbium doped large mode area fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 23437-23450.
- [15] Brugger K. Effect of thermal stress on refractive index in clad fibers [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(2): 437-438.
- [16] Chang W J, Lee H L, Yang Y C. Hydrostatic pressure and thermal loading induced optical effects in double-coated optical fibers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(2): 616-620.
- [17] Jund P, Jullien R. Molecular-dynamics calculation of the thermal conductivity of vitreous silica [J]. *Physical Review B*, 1999, 59(21): 13707-13711.
- [18] Baldi G, Giordano V M, Monaco G, et al. Thermal conductivity and terahertz vibrational dynamics of vitreous silica[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(21): 214309.
- [19] Smyth H T, Skogen H S, Harsell W B. Thermal capacity of vitreous silica[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1953, 36(10): 327-328.
- [20] 李学文, 于春雷, 胡丽丽, 等. 国产 25/400  $\mu\text{m}$  掺镱双包层光纤实现 2.2 kW 窄线宽单模激光输出[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0636001.
- Li X W, Yu C L, Hu L L, et al. 2.2 kW narrow-linewidth single-mode laser output using homemade 25/400  $\mu\text{m}$  Yb-doped double cladding fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0636001.
- [21] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 216-220.
- [22] Dauliat R, Gaponov D, Benoit A, et al. Inner cladding microstructuration based on symmetry reduction for improvement of singlemode robustness in VLMA fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18927-18936.
- [23] Snyder A W, Love J D. *Optical waveguide theory* [M]. Boston: Springer, 1986.
- [24] 李学文, 于春雷, 沈辉, 等. 高功率光纤激光热光效应及模式不稳定阈值特性研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1001001.
- Li X W, Yu C L, Shen H, et al. Thermo-optic effect and mode instability threshold characteristics of high-power fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1001001.
- [25] Canning J, Sommer K, Englund M. Fibre gratings for high temperature sensor applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 824-828.
- [26] Ballato J, Dragic P. Materials development for next generation optical fiber [J]. *Materials*, 2014, 7(6): 4411-4430.
- [27] Dragic P, Cavillon M, Ballato J. On the thermo-optic coefficient of  $\text{P}_2\text{O}_5$  in  $\text{SiO}_2$  [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(10): 3654-3661.