

双包层光纤光学放电现象的建模仿真分析

张汉伟 周 朴 王小林 肖 虎 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 建立了双包层光纤光学放电现象的理论模型, 并对其进行了数值模拟。结果表明双包层光纤放电传输速度随功率密度增加而非线性增加。当功率密度较大时, 速度增加较为缓慢。光学放电的功率密度阈值与初始加热温度有关, 当加热温度一定时, 功率密度阈值随芯径增大而减小。从实验上比较了不同芯径双包层光纤的光学放电阈值, 实验结果与模型结论符合较好。比较了芯径相同、内包层直径不同的光纤的放电传输速度与功率密度的关系。结果表明内包层直径较大的光纤放电传输阈值略高, 但传输速度与功率密度的关系基本一致, 说明芯径是影响放电传输速度的主要因素。

关键词 光纤光学; 光学放电; 双包层光纤; 放电阈值

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0706015

Simulation of Fiber Optical Discharge Effect of Double Cladding Fiber

Zhang Hanwei Zhou Pu Wang Xiaolin Xiao Hu Xu Xiaojun

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

Abstract A model of describing optical discharge effect of double cladding fiber is proposed. The simulation results show that the velocity of optical discharge of double cladding fiber nonlinearly increases with the increase of power density in the fiber core and the velocity slowly increases at a higher power density. The threshold of optical discharge depends on the initial heated temperature. When the initial temperature is fixed, the threshold decreases with the increase of the diameter of fiber core. The thresholds of double cladding fiber with different core diameters are compared experimentally, which are consistent with the model. Moreover, the comparison of different inner cladding diameters with the same core diameter shows that the threshold of larger inner cladding fiber is relatively high while the relationship between propagation velocity and power density is the same, which indicates that the core diameter is the main factor affecting optical discharge velocity.

Key words fiber optics; optical discharge; double cladding fiber; discharge threshold

OCIS codes 060.2290; 140.3330; 140.3440

1 引 言

光纤激光器由于具备许多优良的性质, 在众多领域都得到了广泛应用^[1-3]。但是由于受到非线性效应、热透镜效应以及热致熔融、破裂等破坏效应的限制, 其输出功率不可能无限地提升^[4]。光纤熔融或者光学放电现象, 就是高功率光纤系统中常见的破坏现象。当光纤中激光功率密度超过某一阈值时, 若光纤有较大的弯曲或者光纤局部过热, 会触发

光学放电现象。此时, 可以观察到白色的亮光以每秒几米的速度向光源方向传输, 切断光源则白光传输停止。在白光经过的光纤纤芯处会产生一系列类似于子弹头形状的周期性小孔, 将对光纤产生永久性破坏, 因此研究有效抑制光学放电现象对提升光纤承受功率具有重要的意义。

光学放电现象于 1987 年首次被观察并研究^[5], 随后许多科研工作者对其进行了详细报道^[5-12], 普

收稿日期: 2013-01-22; **收到修改稿日期:** 2013-03-23

作者简介: 张汉伟(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高能光纤激光技术方面的研究。

E-mail: zhanghanwei100@163.com

导师简介: 许晓军(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

(通信联系人)

普遍认为当光学放电发生时,纤芯的温度超过了硅的汽化点(约 3300K),甚至可以到达上万开尔文^[13]。目前对光学放电的研究主要集中在高温下光纤对激光的吸收过程、光学放电传输的机制以及形成周期性结构的原因。从现有的报道来看,对光学放电传输的模拟主要采用含时的热传导方程,其中热源项是由于温度升高导致的对激光的吸收增强项,另外还存在一些损耗项,同时加上一个与时间无关的光功率沿光纤轴向分布的常微分方程。通过求解以上模型可以对光学放电的阈值和传输速度等问题进行研究^[9,12]。目前对光学放电的研究主要针对通信的单模光纤,但是更高功率的激光输出只有通过包层抽运双包层光纤实现^[14]。文献调研表明,目前还没有和高功率实验中常用的双包层光纤光学放电传输速度和阈值有关的理论和实验研究,而且由于其结构与普通单模光纤不同,其物理过程有可能存在差异。通过数值模拟对双包层光纤的光学放电现象的

本质规律进行探究,从而为实验提供指导。

建立了双包层光纤的光学放电现象的理论模型,对其阈值(能维持放电传输的临界功率密度)、传输速度等关键因素与光纤参数和光功率密度的关系进行了研究。结果表明双包层光纤的放电传输速度随功率密度增加而增加,但不是线性关系,当功率密度较大时,传输速度增加趋势变慢。光学放电的功率密度阈值与初始加热温度有关,当加热温度一定时,功率密度阈值随芯径增大而减小。最后比较了芯径不同的光纤的放电传输速度与功率密度的关系,结果表明内包层直径大的光纤的放电传输阈值略高,但传输速度与功率密度的关系基本一致,说明芯径是影响放电传输速度的主要因素。

2 理论模型

为不失一般性,用一维热传导方程和激光轴向传输方程描述来光学放电现象^[12,15]:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial}{\partial t}T(t,z) = \frac{\partial}{\partial z}\left[k_1(T)\frac{\partial}{\partial z}T(t,z)\right] + \alpha_{th}(T)\frac{P(z)}{\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^2} - \frac{4(T-T_r)k_1}{1+2\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)+2\frac{k_1}{k_2}\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}\frac{1}{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2} - \frac{4\epsilon}{d_1}\sigma(T^4 - T_r^4), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz}P(z) = -\alpha_{th}(T)P(z), \quad (2)$$

式中 $P(z)$ 表示信号光沿光纤的分布, $T(t,z)$ 表示温度随时间和位置的分布, $c(T)$ 、 $\rho(T)$ 分别表示光纤热容和密度, $k_1(T)$ 、 $k_2(T)$ 分别为硅和涂覆材料的导热系数, $\alpha_{th}(T)$ 表示随温度变化的吸收系数, d_1 、 d_2 、 d_3 分别表示激光模式的有效直径、内包层直径和涂覆层直径, T_r 为光纤外的环境温度, ϵ 表示灰体的发射系数, σ 为斯特潘-玻尔兹曼常数。

(1)式中右边第二项为热源项,表示由于温度升高引起吸收的热量;第三项是光纤在截面上达到热平衡所需的热量,假设边界温度与环境温度相同,且纤芯与内包层导热系数相同;第四项是光纤发光辐射损耗的热量。(2)式表示信号光沿光纤轴向的功率分布。

光纤中由于吸热导致的吸收系数与温度的关系可以近似用指数函数描述^[12]:

$$\alpha_{th}(T) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{T_c}{T}\right), \quad (3)$$

式中 α_0 为吸收常数与波长有关, T_c 表示材料的特征温度,对于掺锗的硅光纤 $T_c \approx 29000$ K。

在已有文献中为了计算简便常忽略(1)式中的第三项,甚至第四项^[9,12],有的模型考虑了第三项的影响,但也只是假设光纤是单层结构^[17],忽略了涂覆层的影响,因此无法用于研究双包层光纤。为了使计算结果与实验吻合,文献中的吸收常数 α_0 都是人为设定的,但设定的数值与最新报道的吸收系数与温度的关系存在差异^[11]。文献^[9,11]对光纤中热导致的非线性吸收进行了定量分析,当纤芯温度在 3100 K 左右时,其吸收系数在 $1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 范围之内^[9],当温度接近 6000 K 时吸收系数可以达到 $10^6 \sim 10^7 \text{ m}^{-1}$ ^[10]。为计算简便,仍假设吸收系数与温度的关系可以用指数函数描述,如图 1 所示,当 $\alpha_0 = 4 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ 时, α_{th} 与 T 的关系与文献^[9,11]描述的结果比较接近,若按文献^[12]中取 $\alpha_0 = 4.8 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$,则吸收系数与理论分析和实验结果都不符(少两个量级)。因此本文取 α_0 为 $4 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ 。

计算的边界条件和初始条件如下:

假设光纤两端没有热传导,则边界条件为

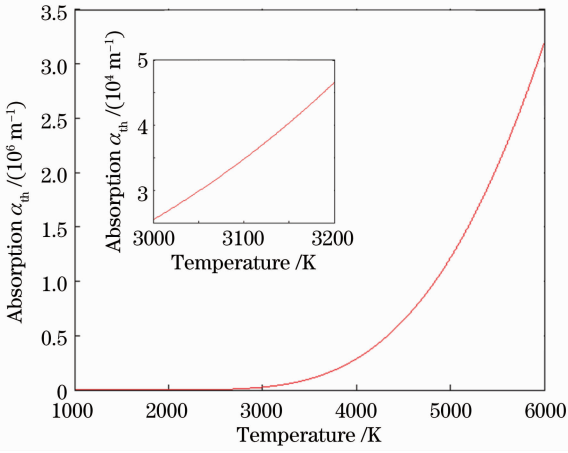


图1 吸收系数与温度关系

Fig. 1 Relationship between absorption coefficient and temperature

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=l} = 0. \quad (4)$$

初始条件:

$$T(t, z) \Big|_{t=0} = \begin{cases} T_r, & z < z_c, \\ T_c, & z \geq z_c. \end{cases} \quad (5)$$

式中 T_c 表示产生放电的初始加热温度, z_c 为诱发放电现象的加热长度。假设初始时光纤没有损耗, 即初始功率分布 $P(z) \Big|_{t=0} = P_0$, P_0 为激光功率。

3 数值计算

采用显式的有限差分法进行计算^[15]。假设光纤热容、密度和导热系数不随温度变化, 忽略相变吸热。计算光纤长度为 3 cm, 时间长度为 4 μ s。取空间步长为 $dz = 0.5 \mu\text{m}$, 时间步长为 $\rho c dz^2 / 4k_1$, 当空间步长减半时计算结果变化小于 2%。其他参数选取如表 1 所示。

表1 计算中的部分参数

Table 1 Other parameters used in the calculation

Parameter	Value
Thermal capacity c / [J/(kg·K)]	1430
Density ρ / (kg/m ³)	2200
Thermal conductivity of silica glass k_1 / [W/(cm·K)]	1.38
Thermal conductivity of outer cladding k_2 / [W/(m·K)]	0.2
Surface emissivity ϵ	0.9
Diameter of inner cladding d_2 / μm	250
Diameter of outer cladding d_3 / μm	500
Room temperature T_r / K	300
Initial temperature T_c / K	2900
Initial hot zone z_c / mm	0.2

4 结果分析

首先计算不考虑(1)式中右边第三项的情况, 即如(6)式所示。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t}(t, z) = k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(t, z) + \alpha_{\text{th}}(T) \frac{P(z)}{\pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} - \frac{4\epsilon}{d_1} \sigma (T^4 - T_r^4). \quad (6)$$

图 2 是光纤初始功率为 3 W、初始加热温度 $T_c = 2900$ K、模场有效直径 $d_1 = 10 \mu\text{m}$ 时, 温度沿光纤轴向的传输分布, 其中相邻两线之间间隔为 1 μ s。

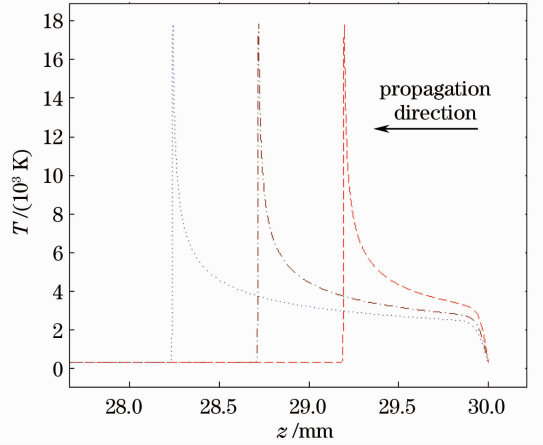

 图2 不同时刻光纤轴向温度分布, 相邻两线之间间隔为 1 μ s

 Fig. 2 Optical fiber axial temperature distribution at different moments with the space of 1 μ s

从图 2 可知, 光学放电产生时最高温度可以达到近 18000 K, 此时对应的吸收系数约为 10^6 m^{-1} , 但这一温度比实验结果偏高^[13], 这可能是由于忽略了径向的热损耗, 即忽略了(1)式中的第三项以及相变吸热。

图 3 是光学放电传输速度 v 与功率密度 I 的关系 ($d_1 = 10 \mu\text{m}$), 实验数据 1 来自文献[12], 实验数据 2 来自文献[9]。可以看出计算结果与实验结果符合得较好, 此时 $\alpha_0 = 4.56 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ 。采用(1)式和前文分析的吸收系数进行计算, 结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出随着光功率密度的增大, 传输速度也增大, 但不是线性关系。图 4(b)是有效模式直径为 10 μm , 初始功率为 3 W 时采用(1)式计算的不同时刻光纤轴向温度分布, 由图 4(b)可知, 最高温度约为 7000 K, 对应的吸收系数为 $6 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$, 理论和实验结果符合较好^[9]。

为了研究放电传输发生的阈值与光纤模场直径 (MFD) 的关系, 计算不同 MFD 下的放电传输阈值

(计算中取传输速度小于 0.1 m/s 时对应的功率密度为阈值)。需要说明的是,计算中发现初始加热温度对传输速度大小几乎没有影响,只对阈值有影响,初始加热温度越大,阈值越低。由于对吸收系数进行了修改,因此初始加热温度也要进行适当调整使其与文献[9,15]中初始加热温度对应的吸收系数相近,且温度达到硅的熔点时非线性吸收才比较明显^[15],综合考虑取 $T_c = 2273$ K。

如图 5 所示,MFD 增大时放电传输的阈值功率密度 I_{th} 不断减小,这与普通单模光纤的结果类似^[15]。大芯径(MFD 大于 20 μm)双包层光纤的放电传输功率密度阈值甚至小于 1 MW/cm^2 。这个功率密度在通常使用的高功率激光系统中是常见的,因此在高功率实验中特别要防止光纤弯曲过大或者局部受热,处理好熔接点和光纤输出端面,否则很容易触发光学放电现象,对激光器系统造成灾难性破坏。计算中还发现,由于阈值与初始加热温度有关,

如果初始加热温度改变,阈值大小会有一些的变化,但其随模场直径的变化规律不变。

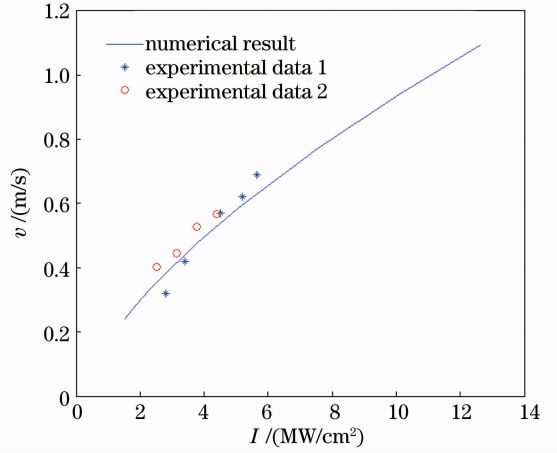


图 3 放电传输速度与光功率密度的关系
Fig. 3 Relationship between discharge transfer velocity and optical power density

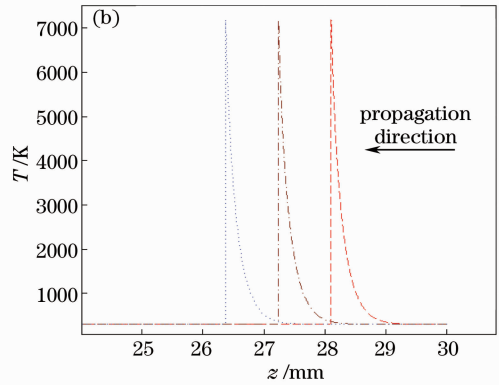
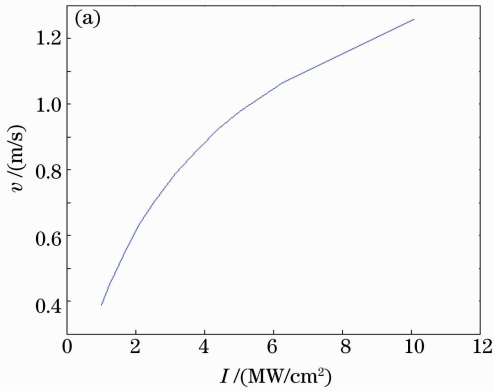


图 4 $\alpha_0 = 4 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ 时采用(1)式计算(a)光学放电传输速度与光功率密度关系; (b)不同时刻光纤轴向温度分布, 相邻两线之间间隔 1 μs

Fig. 4 Calculation of (a) relationship between discharge transfer velocity and optical power density; (b) optical fiber axial temperature distribution at different moments with the space of 1 μs , with equation (1) when $\alpha_0 = 4 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$

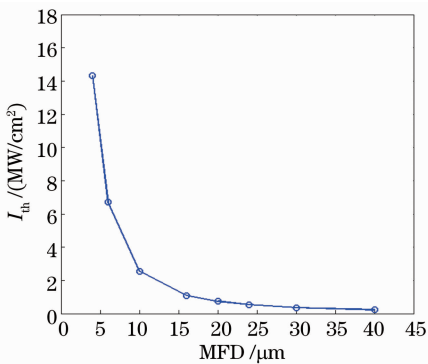


图 5 放电传输阈值与模场直径关系

Fig. 5 Relationship between discharge transmission threshold and mode field diameter

为了验证图 5 的计算结果,对纤芯/内包层直径分别为 10/125, 15/130, 20/125 μm 的三种双包层光纤的光学放电阈值进行了实验研究,使用的激光波长为 1080 nm,具体结果如表 2 所示。模场直径 d 近似用公式 $d \approx d_c (0.65 + 1.619/V^{1.5} + 2.879/V^6)$ 计算,其中 d_c 为纤芯直径, V 为光纤归一化频率^[16]。

从表 2 中可以看出,随着模场直径的增大,产生放电的功率密度阈值减小,这与图 5 的计算结果趋势吻合。值得注意的是,实验中测得的放电阈值比计算的结果偏高,这是由于实验中采取的触发放电的方式是把光纤输出头与金属板接触,这种方式对应的初始加热温度比计算中的要低,因此阈值有一定的升高,这也符合模型计算的结论。

表 2 不同光纤光学放电阈值实验结果

Table 2 Experimental results with different fiber optical discharge thresholds

Diameter of core/inner cladding / μm	Normalized frequency	Mode field diameter / μm	Threshold /(MW/cm^2)
10/125	2.04	12.47	8.27
15/130	3.05	14.9	7.4
20/130	4.07	17.74	6.2

在大功率情况下,还常常选用 $20/400\ \mu\text{m}$ 的光纤,对应的涂覆层直径为 $500\ \mu\text{m}$,计算了该种双包层光纤放电传输速度与光功率密度关系,并与 $20/250\ \mu\text{m}$ 光纤(涂覆层 $400\ \mu\text{m}$)的结果进行了对比,如图 6 所示。结果发现两种光纤光学放电传输速度与功率密度的关系完全相同,而放电传输阈值略有差异,说明影响放电传输速度的主要因素是纤芯直径。

层直径为 $250\ \mu\text{m}$ 光纤的结果几乎一致,说明影响光学放电传输速度的主要因素是纤芯直径。通过对光学放电现象建模,可以定量地对这一现象进行数值模拟,分析其变化规律,这对高功率光纤激光的研究具有指导意义。

参 考 文 献

- Liu Zejin, Xiao Hu, Zhou Pu, *et al.*. 113 W MOPA structure all-fiberized laser on 1018 nm [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305009.
- 刘泽金,肖虎,周朴,等. 113 W 主振荡功率放大结构 1018 nm 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305009.
- Yan ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW all-fiberized Yb-doped 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.
- Wang Xiaolin, Gong Zhiqun, Zhou Pu, *et al.*. A homemade all-fiberized fiber laser with output power of 525 W [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408007.
- 王小林,龚智群,周朴,等. 国产全光纤激光器实现 525 W 高功率输出[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408007.
- Zhang Hanwei, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Numerical study on power limit of hundred-nanosecond single-frequency pulsed fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1214001.
- 张汉伟,周朴,王小林,等. 百纳秒级单频脉冲光纤激光极限功率的数值分析[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1214001.
- I A Bufetov, E M Dianov. Optical discharge in optical fibers [J]. Physics-Uspekhi, 2005, 48(1): 91-94.
- R Kashyap, K J Blow. Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers [J]. Electron Lett, 1988, 24(1): 47-49.
- R M Atkins, P G Simpkins, A D Yablon. Track of a fiber fuse: a Rayleigh instability in optical waveguides [J]. Opt Lett, 2003, 28(12): 974-976.
- E M Dianov, I A Bufetov, A A Frolov. Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect [J]. Opt Lett, 2004, 29(16): 1852-1854.
- Y Shuto, S Yanagi, S Asakawa, *et al.*. Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(8): 1113-1121.
- S I Yakovlenko. Physical processes upon the optical discharge propagation in optical fiber [J]. Laser Physics, 2006, 16(9): 1273-1290.
- Y Shuto. Evaluation of high-temperature absorption coefficients of ionized gas plasmas in optical fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(3): 134-136.
- M Facao, A M Rocha, P S de Brito André. Traveling solutions of the fuse effect in optical fibers [J]. J Lightwave Technol, 2011, 20(1): 109-114.

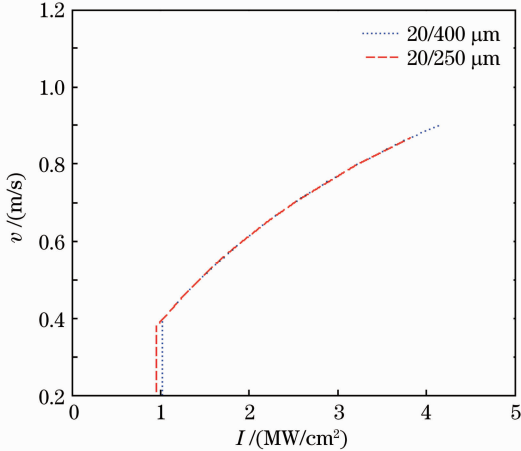


图 6 $20/400\ \mu\text{m}$ 光纤和 $20/250\ \mu\text{m}$ 光纤光学放电传输速度与光功率密度关系

Fig. 6 Relationship between discharge transfer velocity and optical power density when using fiber of $20/400\ \mu\text{m}$ and $20/250\ \mu\text{m}$

5 结 论

建立了双包层光纤的光学放电传输模型,分析了光学放电传输速度、阈值与光功率密度、光纤参数的关系。结果表明,双包层光纤光学放电传输速度随光功率密度增加而增加,但不是线性关系;光学放电的阈值功率密度随模场直径的增加而减小,模场直径大于 $20\ \mu\text{m}$ 时功率密度阈值小于 $1\ \text{MW}/\text{cm}^2$,这对高功率光纤系统较为不利。在此基础上还进行了实验研究,结果与模型结论基本吻合。最后计算了芯径为 $20\ \mu\text{m}$ 、内包层直径为 $400\ \mu\text{m}$ 光纤的放电传输速度与光功率密度关系,发现与芯径相同、内包

- 13 E M Dianov, V E Fortov, I A Bufetov, *et al.*. High-speed photography, spectra, and temperature of optical discharge in silica-based fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(6): 752—754.
- 14 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(11): B63—B92.
- 15 A N Tkachev, S I Yakovlenko. Calculation of the velocity and threshold of a thermal absorption wave of laser radiation in an optical fibre [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(8): 761—764.
- 16 D Marcuse. Loss analysis of single-mode fiber splices [J]. *Bell System Technical Journal*, 1977, 56(5): 703—718.

栏目编辑: 王晓球