

保偏光子晶体光纤模场测量与放电调整技术

李红颖¹ 杨远洪^{1,2} 杨巍¹

¹北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

²北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

摘要 给出了保偏光子晶体光纤(PM-PCF)模场的计算模型,搭建了基于近场光斑成像法的PM-PCF非圆模场在线测量装置,采用红外成像系统实现了模场参数的绝对测量。在此基础上,研究了放电对PM-PCF模场的微调作用,结合仿真计算,获得模场参数变化规律。建立了PM-PCF与传统保偏光纤的耦合损耗计算模型,确定了低损耗耦合条件,并进行了熔接实验验证,实现了PM-PCF与传统保偏光纤的低损耗熔接。

关键词 光纤光学;保偏光子晶体光纤;模场;近场光斑成像法;电弧放电

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0206001

Mode Field Measurement and Discharge-Redress Techniques for Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fibers

Li Hongying¹ Yang Yuanhong^{1,2} Yang Wei¹

¹Key Laboratory on Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China

²National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The model for characterizing the mode field of polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) is proposed. The on-line mode field testing setup for PM-PCF is established based on the near field spot imaging method and the absolute measurement of mode field parameters is achieved with an infrared camera system. The effect of discharge on the PM-PCF mode field redress is investigated and the evolutions of mode field parameters are also obtained by numerical simulations. The calculation model of the splicing loss between PM-PCF and conventional polarization maintaining fiber is derived, and the low loss splicing condition is also determined and experimentally verified. The result demonstrates that the loss splicing between PM-PCF and conventional polarization maintaining fibers is successfully realized.

Key words fiber optics; polarization-maintaining photonic crystal fiber; mode field; near field spot imaging; arc discharge

OCIS codes 060.5295; 060.2420; 060.2300; 350.2660

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)为一种微结构光纤,按照导光机制的不同,可分为两种:一种是包层有效折射率低于纤芯折射率、基于全反射原理的折射率导引型光纤,另一种是纤芯折射率低于包层有效折射率、基于光子带隙效应的光子带隙光纤。保偏光子晶体光纤(PM-PCF)属于第一种,通过在实心纤芯两边对称设置大孔结构可获得形状双折射。这种光纤因具有弯曲损耗低、抗电磁辐射能力强、易于制作而具备重要的应用潜力。依据PM-PCF双模传输特性可实现电压传感^[1]、利用其模场的变化可实现压力检测^[2],基于PM-PCF的光

收稿日期: 2014-07-11;收到修改稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT 1203)

作者简介: 李红颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 275731001@qq.com

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040420656S)

纤陀螺已具备实用条件^[3]。但是,由于PM-PCF为形状双折射型保偏光纤,其模场为非圆形状,在实际应用中需要准确测量其模场变化特性,并确定与其他光纤(或波导)的耦合条件。已有的模场测量方法,如远场扫描法、可变孔径法、刀口扫描法、近场扫描法、远场掩膜法、横向错移法以及背向散射法等^[4],可以实现圆形模场的准确测量。但对于PM-PCF所形成的非圆模场,测量值不能反映其实际特征。

在PCF的应用过程中,PCF与传统光纤或其他波导之间的耦合问题一直是一个研究焦点。Chong等^[5]对电弧多次放电熔接法进行了研究,Yablon等^[6]研究了梯度折射率光纤透镜熔接的方法,香港理工大学的Xiao等^[7]研究了基于多次放电的熔接技术,北京交通大学李宏雷等^[8]指出模场失配是造成熔接损耗的重要因素并对熔接参数进行了一定的优化,燕山大学付广伟等^[9]对熔接过程中PCF的结构变化进行了理论分析和实验研究,清华大学张巍等^[10]提出熔接过程中采用过渡光纤的方案,上海大学的杨清等^[11-12]分别研究了基于熔融拉锥的PCF低损耗熔接技术。但是,对PM-PCF与传统光纤熔接耦合的研究鲜见报道。

本文给出了PM-PCF模场的计算模型,以红外摄像机为核心,搭建了基于近场光斑成像法的PM-PCF非圆模场在线测量装置,实现了PM-PCF模场参数的绝对测量。实验研究了放电对PM-PCF模场的微调作用,并结合仿真计算获得模场参数变化规律。建立了PM-PCF与传统保偏光纤(PMF)的耦合损耗计算模型,确定了低损耗耦合条件并进行了熔接实验验证。

2 PM-PCF非圆模场测量方法

2.1 PM-PCF模场参数定义

模场直径是用来描述光纤中光能量集中程度的参数。当基模模式可以近似用高斯线型拟合时,模场半径 w 为高斯强度分布最大值的 $1/e^2$ 所对应宽度的一半^[13]。传统光纤(包括PMF)基模模斑较圆,一般采用经典的模场测量技术^[4]进行测量。PM-PCF为形状双折射型PMF,椭圆率较大,用传统的方法不能准确描述其特征。

典型的PM-PCF端面图和模斑图分别如图1(a)和(b)所示,其基模模斑为椭圆形。 D , d 和 Λ 分别表示端面图1(a)中的大孔直径、小孔直径和相邻小孔之间的间距。当 $d/\Lambda > 0.45$ 时模场分布可很好地采用高斯线型拟合,而当 $d/\Lambda < 0.45$ 时采用 sech 函数可取得更好的估计值^[14]。实用的PM-PCF的 d/Λ 的值大于0.45,因此可采用高斯线型拟合来描述PM-PCF中的基模分布。

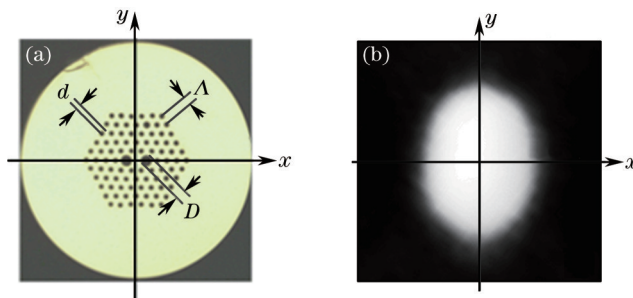


图1 典型的PM-PCF的(a)端面图和(b)模斑图

Fig.1 (a) End image and (b) mode spot image of a typical PM-PCF

对于PM-PCF形成的非圆模场,设 w_x 和 w_y 分别表示模斑沿 x 和 y 偏振方向的模场半径,通过测量 w_x 和 w_y 就可获得PM-PCF的模场特征。等效模场直径 M_{eff} 可由(1)式计算^[15]:

$$M_{\text{eff}} = 2 \sqrt{(w_x^2 + w_y^2)/2}. \quad (1)$$

为了描述PM-PCF模场的形状特征,还需确定模斑的椭圆率,椭圆率 γ 可表示为

$$\gamma = w_y/w_x. \quad (2)$$

这样,通过测量计算 M_{eff} 和 γ , 就可以完整描述PM-PCF的非圆模场特征,本文中将模场参数定义为 M_{eff} 和 γ 。

2.2 基于近场光斑成像法的PM-PCF模场测量方法

为了获得PM-PCF的模场特征,基于近场光斑成像技术设计了PM-PCF的模场测量装置,其原理图和实

物图分别如图 2(a)和(b)所示。测量装置由宽带光源(BBS)、导引光纤、三维位移台和红外摄像机组成。采用的宽带光源平均波长为 PM-PCF 样品的工作波长,由于宽带光源相干长度较短,因而采用它作为照明光源可有效地避免在光纤包层形成散斑。导引光纤的一端与 BBS 输出端口连接,另一端固定在一个三维位移台上,它们构成了测量装置的照明光源。将一小段待测的 PM-PCF 样品固定在另一个三维位移台上,照明光源输出的光照亮 PM-PCF 端面并耦合进入 PM-PCF 传输,其输出光被红外摄像仪的物镜接收。在测量过程中,精确调节两个三维位移台,以获得高质量的透射照明光纤端面图像,同时获得光纤轮廓和模斑图[见图 2(a)中 T]。在该装置中还集成了共轴反射照明装置,关闭透射照明光源,利用共轴照明光源可获得 PM-PCF 端面结构的清晰图像[见图 2(a)中 R]。对反射和透射照明成像系统采集的图像进行处理,可以分别获得光纤端面的结构尺寸和模场参数。去涂覆层后的被测 PM-PCF 样品的直径可精确测得,以其为基准并从测得的图像中读取直径所对应的像素值,将基准与像素值相比较即可获得成像系统的校准系数。此处的基准值与待测值在同一成像过程中获得,因而具有相同的校准系数,所以可直接计算出 PM-PCF 端面结构和模斑的绝对尺寸,实现关键结构和模场参数的测量。

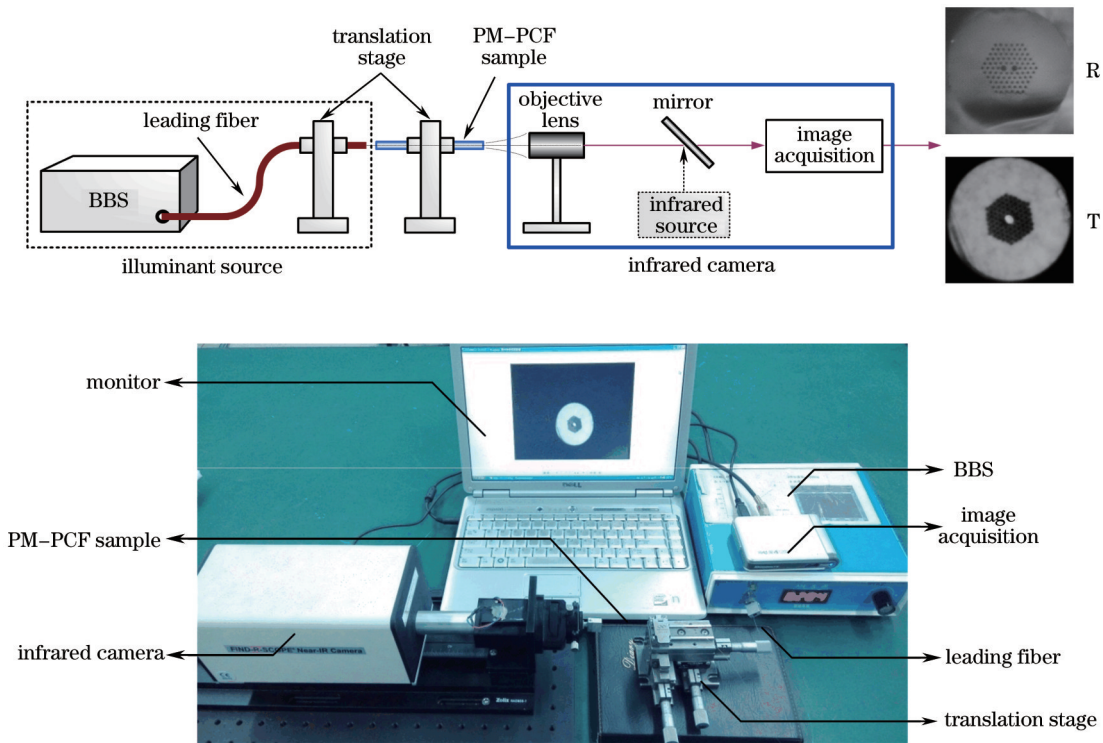


图 2 模场测试装置。(a)原理图;(b)实物图

Fig.2 (a) Schematic diagram and (b) photo of the mode field measurement setup

利用该装置,对一种 PM-PCF 光纤样品进行了测量,其工作波长为 1550 nm,包层直径为 124.6 μm ,透射和反射照明成像结果如图 2(a)所示。采用图像处理技术,提取模斑图上的光强分布并进行高斯拟合,读取模场半径及端面各部分所对应的像素值,结合校准系数就可以确定端面结构主要尺寸和模场半径,如表 1 所示。根据(1)式和(2)式,可得到被测的 PM-PCF 的模场参数 M_{en} 和 γ 分别为 5.44 μm 和 1.89。

表 1 PM-PCF 样品的端面结构和模场半径

Table 1 Cross section and mode field radius of the PM-PCF sample

$D / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	$\Lambda / \mu\text{m}$	$w_x / \mu\text{m}$	$w_y / \mu\text{m}$
5.00	2.50	4.30	1.80	3.40

图 3(a)和(b)分别为 PM-PCF 的 x 和 y 偏振轴的光强度分布和高斯拟合结果,拟合度分别为 0.998 和 0.996,表明采用高斯线型来描述 PM-PCF 模场分布是可行的。在端面成像过程中采用了 63 倍物镜,并在保证成像质量的同时使端面像最大,实测的尺寸校正系数为 0.52 $\mu\text{m}/\text{pixel}$,计算误差主要来源于图像边缘像素点的确

定,通过多次测量和统计分析,结构尺寸测量精度约为6.67%,由于高斯拟合可减小因像素读取时引入的随机误差,模场半径的测量误差约为4.04%。

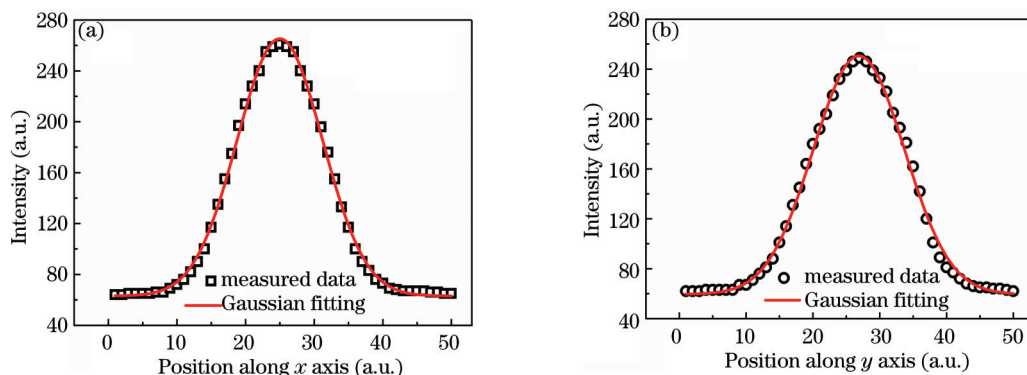


图3 强度分布曲线。(a) x偏振;(b) y偏振

Fig.3 Intensity profiles along (a) x polarization and (b) y polarization

3 电弧放电对PM-PCF模场微调模型研究

3.1 电弧放电对PM-PCF模场的影响

电弧放电熔接法是一种常用的光纤熔接方法。在放电过程中,当温度超过光纤熔点时,表面张力大于粘滞力,使得PM-PCF的圆形空气孔发生塌缩,导致PM-PCF端面结构变化,进而引起PM-PCF模场的变化,因此通过控制电弧放电参数可实现模场调整。

通过对PM-PCF端面放电,研究了电弧放电对光纤结构参数和模场的影响。受控放电过程由光纤熔接机(ERICSSON FSU-975)实现,采用上述测量装置实测端面参数和模场参数,样品光纤为国产的PM-PCF(102AD0)。文献[16]中用同样的熔接机研究了熔接电流、熔接时间等参量的影响。为了简化研究模型,只研究熔接电流的影响,综合考虑熔接机的实际熔接过程,确定了实验条件为:放电时间0.6 s,放电次数1次。放

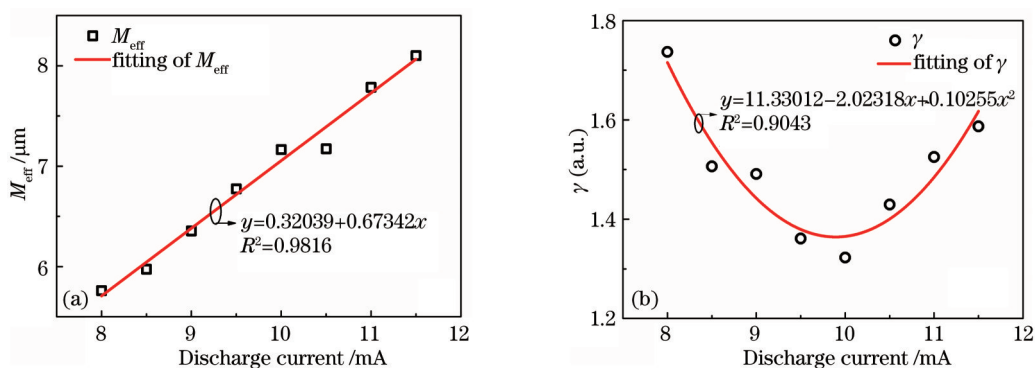


图4 实验获得的不同放电电流下PM-PCF模场参数的变化。(a) M_{eff} ; (b) γ

Fig. 4 Mode field parameter evolutions of PM-PCF under different discharge currents in experiment. (a) M_{eff} ; (b) γ

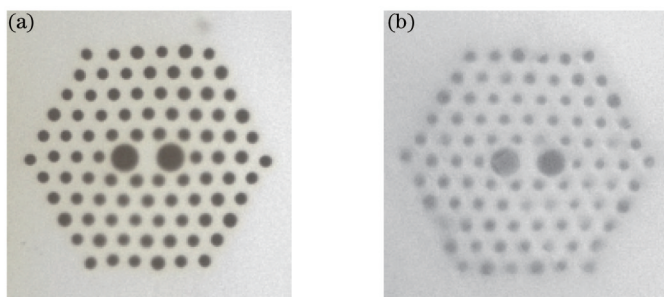


图5 放电电流不同时PM-PCF样品的典型端面图像。(a) 8 mA; (b) 11.5 mA

Fig.5 Typical end image of PM-PCF sample under different discharge currents. (a) 8 mA; (b) 11.5mA

电后测量 PM-PCF 端面结构和模场参数,每放电一次重新制备新的 PM-PCF 样品,实测的 M_{eff} 和 γ 随放电电流的变化如图 4 所示。随着放电电流的增加, M_{eff} 单调增加,而 γ 存在极小值。图 5 为放电电流为 8 mA 和 11.5 mA 时的典型端面图像,可以看出小孔尺寸 d 发生了很大的变化,但大孔尺寸 D 变化较小,而且由于存在热膨胀,孔间距 Λ 也变大,实测结果如表 2 所示,其中 d 值为径向多个小孔直径的平均值。

表 2 不同放电电流下 PM-PCF 样品端面结构参数的变化

Table 2 Cross section parameter evolutions of PM-PCF sample under different discharge currents

Current /mA	$D / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	$\Lambda / \mu\text{m}$	d/Λ
8.00	4.96	2.48	4.32	0.57
8.50	4.93	2.48	4.34	0.57
9.00	4.89	2.46	4.35	0.57
9.50	4.85	2.43	4.35	0.56
10.0	4.80	2.39	4.37	0.55
10.5	4.80	2.25	4.38	0.51
11.0	4.80	2.14	4.39	0.49
11.5	4.80	2.00	4.40	0.45

3.2 模场变化规律仿真

放电情况下,PM-PCF 端面结构变化复杂,为了进一步确定 PM-PCF 的 M_{eff} 及 γ 随放电电流的变化规律,在 COMSOL 4.3a[®] 软件环境下仿真了不同放电电流下 PM-PCF 的模斑图,不同放电情况下 PM-PCF 的结构尺寸采用实测值(见表 2),仿真结果如图 6 所示。从模斑图上分别提取不同放电条件下的 w_x 和 w_y ,计算出 M_{eff} 和 γ ,结果如图 7 所示。与图 4 所示的实验结果相比,仿真计算值与实测值随放电电流具有相同的变化趋势。由上述仿真结果亦可知,通过改变放电电流可以调整模场,并且随着放电电流的增加, M_{eff} 呈线性增加,而 γ 则先减小后增加,在 10.0~10.5 mA 之间存在极小值。对原始数据进行拟合, M_{eff} 和 γ 随放电电流的变化规律分别如(3)式和(4)式所示:

$$M_{\text{eff}} = 3.20996 + 0.32534I, \quad (3)$$

$$\gamma = 30.2552 - 5.53879I + 0.27195I^2. \quad (4)$$

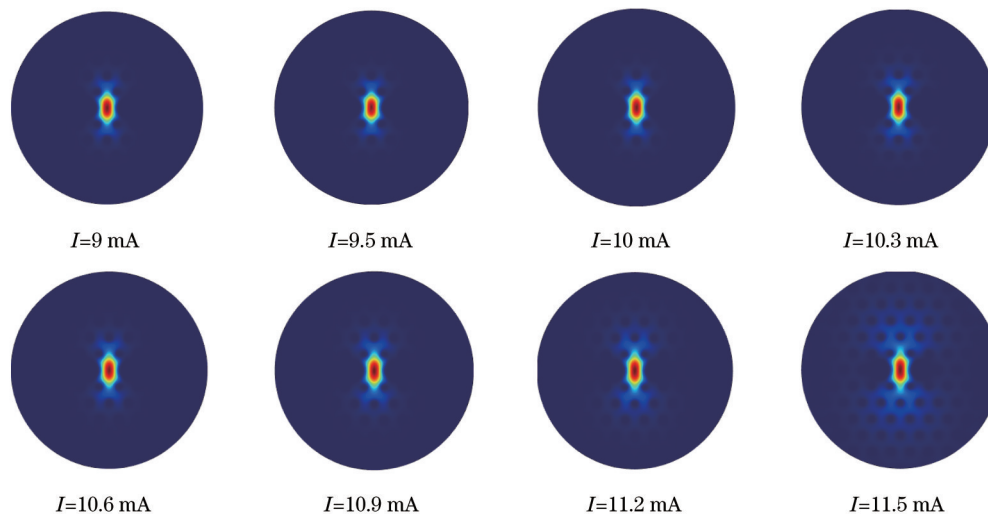


图 6 不同放电电流下的模斑仿真图

Fig.6 Numerical simulation results of mode field under different discharge currents

4 基于模斑参数及放电参数的耦合损耗计算模型

模场的不匹配是 PM-PCF 与其他光纤(或波导)之间产生耦合损耗的主要因素。当 PM-PCF 与圆形模场的光纤(或波导)进行耦合时,不需要考虑对轴的情况,而 PM-PCF 与保偏的光纤(或波导)进行耦合时需先进

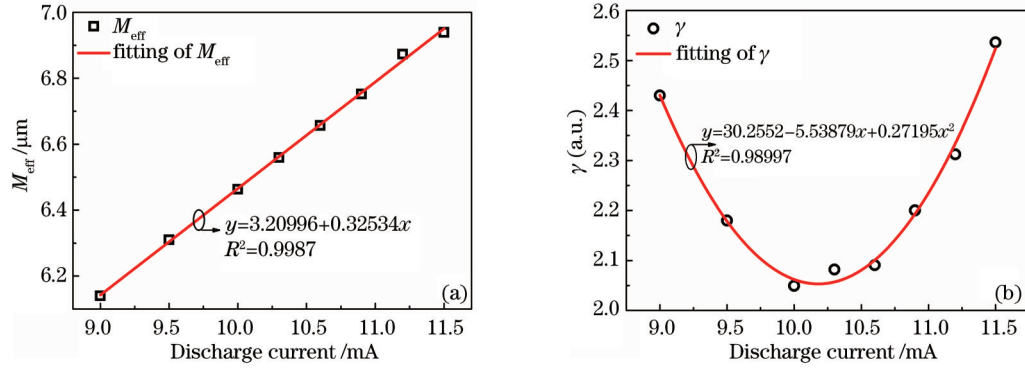


图 7 仿真的 (a) M_{eff} 和(b) γ 随放电电流的变化

Fig.7 Evolutions of simulation results (a) M_{eff} and (b) γ under different discharge currents

行偏振轴对轴,经对轴后由模场不匹配引起的损耗为^[15]

$$L = -10 \lg \left[\frac{2w_{1x}w_{2x}}{w_{1x}^2 + w_{2x}^2} \cdot \frac{2w_{1y}w_{2y}}{w_{1y}^2 + w_{2y}^2} \right], \quad (5)$$

式中 w_{1x} 和 w_{1y} 分别为其他光纤(或波导)在沿 x 和 y 偏振方向的模场半径,对于一般光纤(或波导)所形成的圆形模场有 $w_{1x} = w_{1y}$,代入(1)式和(2)式,(5)式可表示为

$$L = -10 \lg \left[\frac{4\gamma_1\gamma_2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \left(\gamma_2 \cdot \frac{M_{\text{eff}2}}{M_{\text{eff}1}} \right)^2 \left(\frac{1 + \gamma_1^2}{1 + \gamma_2^2} \right) + \left(\gamma_1 \cdot \frac{M_{\text{eff}1}}{M_{\text{eff}2}} \right)^2 \left(\frac{1 + \gamma_2^2}{1 + \gamma_1^2} \right)} \right], \quad (6)$$

式中 $M_{\text{eff}1}$ 和 $M_{\text{eff}2}$ 分别为相耦合的两模场的有效直径, γ_1 和 γ_2 分别为两模场的椭圆率。两光纤(或波导)间熔接(耦合)时由于模场的不匹配而引起的损耗由模场的形状和尺寸两方面因素决定。

5 实验验证研究

为了验证第 4 节中建立的模型,搭建了如图 8 所示的基于电弧放电的 PM-PCF 和普通 PMF 的熔接实验系统。其中 BSS 为实验室自行研制的高稳定掺铒光纤光源,平均波长为 1550 nm,谱宽约为 40 nm,输出功率为 10 mW。熔接机和光功率计(OPM)分别采用 ERICSSON FSU-975 和 ILXLightwave FPM-8210。



图 8 实验系统

Fig.8 Experimental setup

普通 PMF 为熊猫型 PMF,其在 x 和 y 偏振方向上的模场半径近似相等,约为 $3.15 \mu\text{m}$, γ 近似为 1,因此不必考虑对轴问题,并且可以用(6)式进行相关的计算。实验中首先将熊猫 PMF 与 BBS 连接,测量其尾端的输出光功率,再将放电电流以 0.5 mA 的步长由 8 mA 增加到 11 mA,在每个放电参数下进行熔接,测量 PM-PCF 尾端输出光功率并计算熔接损耗,结果如图 9(a)所示。熔接过程中光纤结构的变化会导致模场发生变化,因此测量结果可用来反映实际放电条件下的模场不匹配所引起的熔接损耗。根据 (3)、(4)、(6)式,获得理论上在该实验条件下熔接损耗和放电电流的关系,如图 9(b)所示。

从图 9 可以看出,实验结果与理论结果的变化趋势相同,且在放电电流为 10.0~10.5 mA 时损耗最低,分别为 0.63 dB 和 0.577 dB,两者基本吻合,表明将放电电流近似设置为 10 mA 时可以使实验中所用的普通 PMF 和

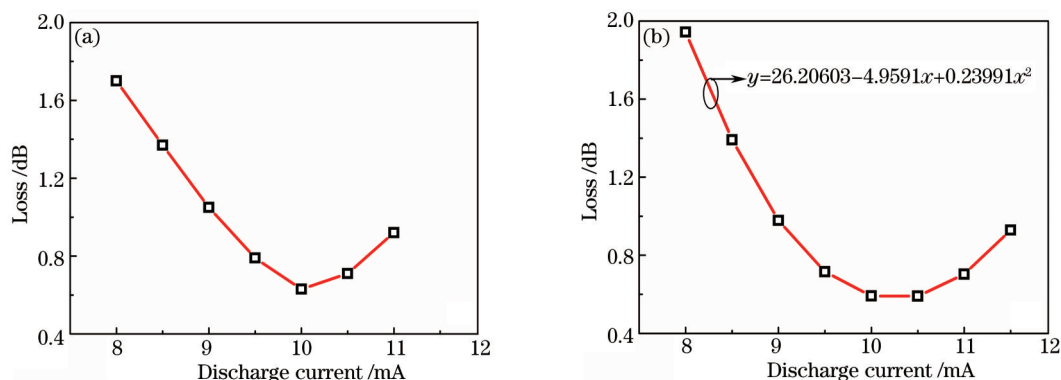


图9 熔接损耗随放电电流的变化。(a)测量结果; (b)仿真结果

Fig.9 Dependence of splicing loss on discharge current. (a) Experimental result; (b) simulation result

PM-PCF的模场实现最佳匹配。实验结果验证了所提出的熔接损耗计算方法和放电参数优化方法的有效性。

6 结 论

设计了基于近场光斑成像法的光纤非圆模场的测量方法,给出了PM-PCF与其他光纤(或波导)的模场定量描述的理论 and 实验基础。研究了电弧放电对PM-PCF结构和模场参数的影响,通过实验和仿真获得了模场的变化规律,即随放电电流的增加, M_{eff} 线性增大,而 γ 存在极小值。推导出了通用的熔接损耗计算模型,熔接实验表明,通过实验测试,可确定最佳的熔接电流,采用获取的电弧放电参数可有效降低PM-PCF与其他光纤(或波导)之间的耦合损耗。

参 考 文 献

- 1 Lu Xin, Bi Weihong, Ma Shuo, *et al.*. Optical voltage transducer based on two-hole photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105003.
芦 鑫, 毕卫红, 麻 硕, 等. 双孔光子晶体光纤光学电压传感方案研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1105003
- 2 Y S Shinde, H Kaur Gahir. Dynamic pressure sensing study using photonic crystal fiber: Application to Tsunami sensing [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(4): 279-281.
- 3 Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao, *et al.*. Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1143-1147.
杨远洪, 段玮倩, 叶 森, 等. 光子晶体光纤陀螺技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1143-1147.
- 4 Zheng Guangjin, Bi Wenxia, Fei Feng. The mode field distribution's measurement of polarization-maintaining fiber [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2009, 29(1): 76-78.
郑光金, 毕文侠, 费 丰. 保偏光纤模场分布的测量[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(1): 76-78.
- 5 J H Chong, M K Rao, Y Zhu, *et al.*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO₂ laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(7): 942-944.
- 6 Andrew D Yablon, Ryan T Bise. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splices using GRIN fiber lenses [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(1): 118-120.
- 7 L Xiao, W Jin, M S Demokan. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges [J]. Opt Lett, 2007, 32(2): 115-117.
- 8 Li Honglei, Lou Shuqin, Guo Tieying, *et al.*. Low loss fusion splicing of germanium doped core photonic crystal fiber and standard single mode fiber [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1589-1593.
李宏雷, 娄淑琴, 郭铁英, 等. 掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1589-1593.
- 9 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Mechanics characteristic of air-hole in fusion splicing process for photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2966-2971.
付广伟, 毕卫红, 金 娃. 光子晶体光纤熔接过程中的空气孔力学特性[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2966-2971.
- 10 Zhang Wei, Zhang Lei, Chen Shi, *et al.*. Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1389-1392.

- 张 巍, 张 磊, 陈 实, 等. 高非线性光子晶体光纤与单模光纤低损耗熔接实验[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1389-1392.
- 11 Yang Qing, Shi Jielong, Sun Weisheng, *et al.*. Low-loss splicing based on the technique of mode-field matching by fusion taper rig [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006001.
- 杨 清, 施解龙, 孙伟胜, 等. 基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006001.
- 12 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *et al.*. Fusion Splicing of small solid core photonic crystal fibers with conventional fibers based on controlled hole collapse [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0106004.
- 奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0106004.
- 13 R Hui, M O'Sullivan. Fiber Optic Measurement Techniques [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2009. 375-376.
- 14 T Hirooka, Y Hori, M Nakazawa. Gaussian and sech approximations of mode field profiles in photonic crystal fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(4): 1071-1073.
- 15 H C Lefèvre. The Fiber Optic Gyroscopes [M]. Zhang Guicai, Wang Wei, Trans. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 240-241.
- H C Lefèvre. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王 巍, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002. 240-241.
- 16 Guo Tieying, Lou Shuqin, Li Honglei, *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 511-516.
- 郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 511-516.

栏目编辑: 王晓琰