

# 基于热扩芯光纤的光纤准直器特性研究

李 榴<sup>1</sup> 李 毅<sup>1,2</sup> 郑秋心<sup>1</sup> 沈雨剪<sup>1</sup> 黄毅泽<sup>1</sup> 朱慧群<sup>1,3</sup> 佟国香<sup>1</sup> 方宝英<sup>1</sup>  
周 晟<sup>1</sup> 张宇明<sup>1</sup> 孙若曦<sup>1</sup> 梁 倩<sup>1</sup> 严 梦<sup>1</sup> 丁 杰<sup>1</sup> 王 锋<sup>1</sup> 覃 源<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093  
<sup>2</sup>上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093  
<sup>3</sup>五邑大学薄膜与纳米材料研究所, 广东 江门 529020

**摘要** 为了提高光纤和光器件之间的耦合效率, 设计了由热扩芯光纤和自聚焦透镜构成的新型热扩芯光纤准直器。理论上分析了热扩芯光纤准直器的基本结构参数与光学特性的关系以及由 3 种失配导致的耦合插入损耗。研究发现, 热扩芯光纤准直器的耦合特性与自聚焦透镜的参数有关, 热扩芯光纤准直器在轴向间距和角度偏差上的耦合失配容限明显优于普通光纤准直器, 横向位移损耗则高于普通光纤准直器。采用模场半径为  $15.4 \mu\text{m}$  的热扩芯光纤与自聚焦常数为  $0.295 \text{ mm}^{-1}$  的自聚焦透镜制备了热扩芯光纤准直器, 并对热扩芯光纤准直器因 3 种失配导致的耦合插入损耗进行了理论和实验比较, 结果表明实验数据与理论吻合较好, 说明所设计的热扩芯光纤准直器可用于长距离光耦合和旋转连接器件。

**关键词** 光纤光学; 热扩芯光纤; 自聚焦透镜; 光纤准直器; 耦合插入损耗

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060602

## Characteristics of Fiber Collimator Based on Thermally Expanded Core Fiber

Li Liu<sup>1</sup> Li Yi<sup>1,2</sup> Zheng Qiuxin<sup>1</sup> Shen Yujian<sup>1</sup> Huang Yize<sup>1</sup> Zhu Huiqun<sup>1,3</sup>  
Tong Guoxiang<sup>1</sup> Fang Baoying<sup>1</sup> Zhou Sheng<sup>1</sup> Zhang Yuming<sup>1</sup> Sun Ruoxi<sup>1</sup>  
Liang Qian<sup>1</sup> Yan Meng<sup>1</sup> Ding Jie<sup>1</sup> Wang Feng<sup>1</sup> Qin Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

<sup>3</sup>Institute of Thin Films and Nano-Materials, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China

**Abstract** In order to improve the coupling efficiency between fibers and optical devices, a new thermally expanded core fiber collimator is designed. It consists of thermally expanded core (TEC) fiber and gradient index (GRIN) lens. The relation between TEC fiber collimator and its optical characteristics is analyzed. The coupling insertion losses caused by three kinds of misalignments are calculated. The results show that the coupling characteristics of TEC fiber collimator is related to the GRIN lens parameters, the lateral and angular coupling tolerances have been greatly improved compared with single-mode fiber collimators and the loss of axial offset is higher than that of single-mode fiber collimators. We fabricate the TEC fiber collimator by using the TEC fiber with  $15.4 \mu\text{m}$  mode-field radius and the GRIN lens with  $0.295 \text{ mm}^{-1}$  gradient constant. The coupling insertion losses measured are consistent well with the theoretical results. The TEC fiber collimator can be used for long working-distance optical coupling and rotary connection devices.

**Key words** fiber optics; thermally expanded core fiber; gradient index lens; fiber collimator; coupling insertion loss

**收稿日期**: 2012-02-27; **收到修改稿日期**: 2012-03-05; **网络出版日期**: 2012-04-28

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA03Z348)、教育部科学技术研究重点项目(207033)、上海市科学技术委员会科技攻关计划(06DZ11415)、上海市教育委员会科研创新重点项目(10ZZ94)和上海领军人才培养计划资助课题。

**作者简介**: 李 榴(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电器件和光通信等方面的研究。E-mail: usstliu@163.com

**导师简介**: 李 毅(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电器件和光电材料等方面的研究。E-mail: optolyclp@263.net

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 120.4640; 200.4650

## 1 引言

光通信网络的高速发展对光器件提出了更新更高的要求,光纤之间、光纤与波导以及其他芯片之间的耦合问题因此得到了更广泛的关注<sup>[1]</sup>。光纤准直器是光无源耦合器件中一个重要的组件,在光通信系统中有着非常普遍的应用,其主要作用是将出射的光束变成平行光束,或者将平行光束会聚到光纤中。

随着光通信产业的发展,准直器的应用领域不断扩大,同时对准直器的要求也不断提高,在有些场合下,比如要求器件小型化的场合,普通光纤准直器由于出射光斑孔径角太大已经难以满足要求。对于纤芯直径比单模光纤更小的特殊光纤和宽度为几个微米且厚度甚至不到  $1\ \mu\text{m}$  的波导,它们与光纤耦合时存在较大的耦合插入损耗。为解决这些问题,1988年 McLandrich<sup>[2]</sup>提出了热扩芯(TEC)光纤。TEC 光纤是高温( $1300\ \text{°C}\sim 2000\ \text{°C}$ )加热以  $\text{GeO}_2$  为掺杂物质的单模光纤时,纤芯中掺杂的  $\text{Ge}^{4+}$  沿径向扩散导致纤芯扩大<sup>[3]</sup>,从而增大了出射光斑的模场直径。目前,许多国外研究者将 TEC 光纤用于组装集成光电子器件,如光纤集成光隔离器<sup>[4]</sup>、光纤集成可调谐滤波器<sup>[5]</sup>和可变光衰减器<sup>[6]</sup>等。但是将 TEC 光纤用于光纤准直器的研究很少。

本文设计了新型 TEC 光纤准直器,由 TEC 光纤和自聚焦透镜[即梯度折射率(GRIN)透镜]构成。分析了 TEC 光纤准直器特性与自聚焦透镜参数的关系,并采用高斯光学方法来讨论 TEC 光纤准直器用于准直系统的插入损耗问题,给出了具体的理论分析和数值计算结果。进一步讨论了如何根据装配工艺和实际的使用要求来选择合适的自聚焦透镜组装 TEC 光纤准直器。

## 2 理论与分析

### 2.1 TEC 光纤理论分析

对于 TEC 光纤,在加热区和非加热区之间的芯径区域记为锥形区域,沿光纤轴的芯径大小不同。如图 1 所示,TEC 光纤是由最初的芯径为  $2a'$  的梯度折射率分布光纤经加热后芯径扩大到  $2A'$  形成的。

设  $n_{\text{cl}}$  和  $n_{\text{co}}$  分别代表原普通单模光纤包层折射率和纤芯折射率,加热导致纤芯掺杂物质向包层扩散,假设折射率变化与掺杂变化成正比,则新的折射率分布可以表示为<sup>[7]</sup>

$$n^2(r) = n_{\text{cl}}^2 + (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)u(r, t), \quad (1)$$

掺杂剂的浓度  $u(r, t)$  为扩散后新的掺杂分布函数,它与径向距离  $r$  和加热时间  $t$  有关。普通单模光纤中常用的掺杂物是  $\text{GeO}_2$ ,其归一化频率的表达式为

$$v^2 = k_0^2 \int_0^{+\infty} [n^2(r) - n_{\text{cl}}^2] 2r dr, \quad (2)$$

式中  $k_0$  为自由空间传播常数。把(1)式代入(2)式可得

$$v^2 = k_0^2 (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2) \int_0^{+\infty} u(r, t) 2r dr. \quad (3)$$

已有研究证明,经过一定时间的加热后,纤芯掺杂可以成功地近似为沿径向呈高斯分布<sup>[8,9]</sup>。此外,函数  $u(r, t)$  的积分对应光纤截面内掺杂的总量为常数,这就意味着光纤的归一化频率在加热过程中不变,TEC 过程不会产生高阶模式,通过梯度折射率光纤的高斯模场分布只有 LP01 模,于是可以得到

$$\omega_0 = \frac{A'}{\sqrt{\ln v}}. \quad (4)$$

(4)式用于计算 TEC 光纤的模场半径。

最终,TEC 光纤的折射率分布可写为

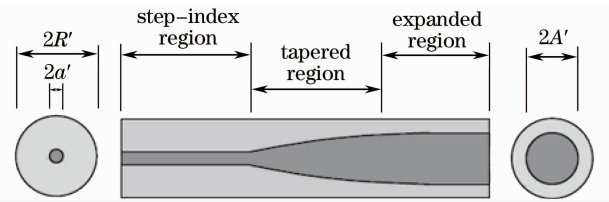


图 1 TEC 光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of a TEC fiber

$$n^2(r) = n_{cl}^2 + \frac{a'^2}{A'^2}(n_{co}^2 - n_{cl}^2)\exp(-r^2/A'^2), \quad (5)$$

式中  $A' = \sqrt{Dt}$  是加热后的纤芯半径。因此,随着加热时间增加,根据各向同性热扩散条件,考虑 TEC 光纤的折射率分布沿径向的变化情况(图 2)。在温度为  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  时,掺杂物  $\text{GeO}_2$  的扩散系数是  $3.9 \times 10^{-16}\text{ m}^2/\text{s}$ 。在加热处理前,标准梯度折射率分布的普通单模光纤的参数为:相对折射率差  $0.3\%$ ,包层折射率  $1.46$ ,纤芯半径  $4\text{ }\mu\text{m}$ 。

根据图 2,在加热时间分别为  $4、6、10\text{ h}$  的条件下,制备得到的 TEC 光纤的纤芯半径和模场直径如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 不同加热时间对应的 TEC 光纤-纤芯半径和模场半径  
Table 1 Fiber core radius and mode-field radius (MFR)  
under different heating time

Heating time /h	Core radius / $\mu\text{m}$	MFR / $\mu\text{m}$
4	4	12.3
6	5	15.4
10	6.5	20

从表 1 可以看出,在 TEC 光纤的制备过程中,在相同加热温度下,加热时间越长获得的 TEC 光纤的出射光束模场半径越大。

## 2.2 准直器设计分析

对于由 TEC 光纤和自聚焦透镜构成的 TEC 光纤准直器,基于如图 3 所示的基本光路图,分析 TEC 光纤准直器出射光束模场半径大小与自聚焦透镜参数的关系。

自聚焦透镜的折射率为<sup>[10]</sup>

$$n^2(r) = n_0^2(1 - g^2r^2), \quad (6)$$

式中  $n_0$  为自聚焦透镜中心轴上的折射率, $r$  为距自聚焦透镜中心轴的径向距离, $g$  为聚焦常数。光线在自聚焦透镜中按正弦曲线轨迹前进,其周期为自聚焦透镜的节距,即

$$P = \frac{2\pi}{g}. \quad (7)$$

长度为  $l$  的自聚焦透镜对高斯光束的传输矩阵<sup>[11,12]</sup>为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gl) & \frac{1}{g}\sin(gl) \\ -n_0g\sin(gl) & n_0\cos(gl) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$A、B、C、D$  分别对应等式右边的 4 个矩阵元。设从 TEC 光纤出射光束的模场半径是  $w_0$ ,则经过自聚焦透镜后出射光束模场半径  $w_1$  和曲率半径  $R_1$  分别为

$$w_1 = w_0 \left( n_0 \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AD - BC} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AC + \alpha^2 BD}, \quad (10)$$

式中  $\alpha = \frac{\lambda}{\pi w_0^2 n_0}$ ,  $\lambda$  是入射光波长。当自聚焦透镜长度为

$$l = \frac{1}{4}P = \frac{\pi}{2g}, \quad (11)$$

时, $w_0$  经过  $1/4$  节距自聚焦透镜后的  $w_1$  为

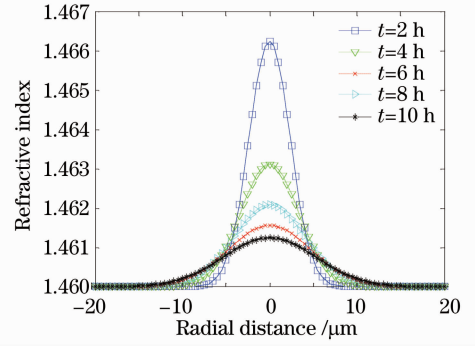


图 2 不同加热时间的 TEC 光纤的折射率分布  
Fig. 2 Refractive-index profiles of a TEC fiber for different heating time

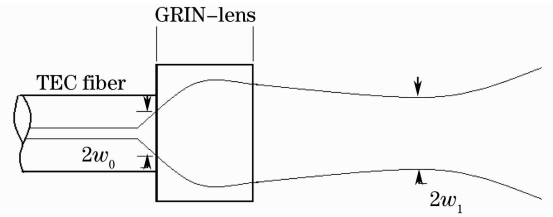


图 3 TEC 光纤准直器光路图  
Fig. 3 Optical path of TEC fiber collimator

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{g\pi\omega_0 n_0}, \quad (12)$$

即  $\omega_1$  的大小与  $\omega_0$  和  $g$  有关。当出射光斑的模场半径为  $15.4 \mu\text{m}$ 、入射光波长为  $1550 \text{ nm}$  时,根据(12)式计算 TEC 光纤与三种不同参数<sup>[13]</sup>的自聚焦透镜耦合后的出射光斑模场半径,结果如表 2 所示。

表 2 不同自聚焦透镜参数和输出的模场半径大小

Table 2 MFR of GRIN lenses with different parameters

Gradient constant / $\text{mm}^{-1}$	Refractive index	MFR / $\mu\text{m}$
0.238	1.552	86.7
0.295	1.592	68.2
0.43	1.619	46

从(12)式可以看出,在入射光斑大小一定的情况下,出射光斑模场半径大小与自聚焦透镜的参数乘积成反比。由表 2 得知,相同的 TEC 光纤耦合不同参数的自聚焦透镜后,出射光斑的模场半径不同,自聚焦透镜的自聚焦常数越小,出射光斑的模场半径越大。

### 3 连接损耗分析

两个光纤准直器耦合时,准直器间的失配会使光纤之间产生附加损耗。光纤准直器间的失配主要来源于如图 4 所示的三个方面<sup>[14]</sup>:1) 间隔,即两光纤准直器的轴向间距  $Z_0$ ;2) 错位,即两光纤准直器的横向位移  $X_0$ ;3) 倾斜,即两光纤准直器的光轴偏角  $\theta$ 。

从 TEC 光纤出射的光束近似为束腰半径等于其扩大后的模场半径、束腰位置在光纤端面的高斯光束<sup>[15]</sup>。高斯光束经过自聚焦透镜,由三种失配分别导致的耦合插入损耗计算式如下<sup>[14]</sup>。

由轴向间距导致的损耗

$$L_{Z_0} = 4.434 \ln \left[ 1 + \left( \frac{\lambda Z_0}{2n\pi\omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (13)$$

由横向位移导致的损耗

$$L_{X_0} = 4.434 \left( \frac{\pi n_0 g \omega_0}{\lambda} \right)^2 X_0^2, \quad (14)$$

由角度偏差导致的损耗

$$L_{\theta} = 4.343 \left( \frac{\tan \theta}{n_0 g \omega_0} \right)^2. \quad (15)$$

在  $1550 \text{ nm}$  波长下,普通单模光纤的模场半径为  $5.05 \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.12$ 。将该单模光纤加热,得到模场半径为  $15.4 \mu\text{m}$  的 TEC 光纤,再与自聚焦常数为  $0.295 \text{ mm}^{-1}$  的  $1/4$  节距的自聚焦透镜耦合得到新型 TEC 光纤准直器,并测量在不同失配条件下的耦合插入损耗值。同时理论计算该 TEC 光纤与文中提到的三种参数的自聚焦透镜耦合得到 TEC 光纤准直器的耦合插入损耗,以及普通单模光纤与自聚焦常数为  $0.295 \text{ mm}^{-1}$  的  $1/4$  节距的自聚焦透镜耦合得到的普通光纤准直器的耦合插入损耗。

采用  $1550 \text{ nm}$  波长光源和 THORLAB 公司的 PM20 光功率计组合成连接测量装置,测量新型 TEC 光纤准直器的耦合插入损耗。测量装置图如图 5 所示。

图 6 为普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由轴向间距引起的插入损耗。从图中可以看出,光纤准

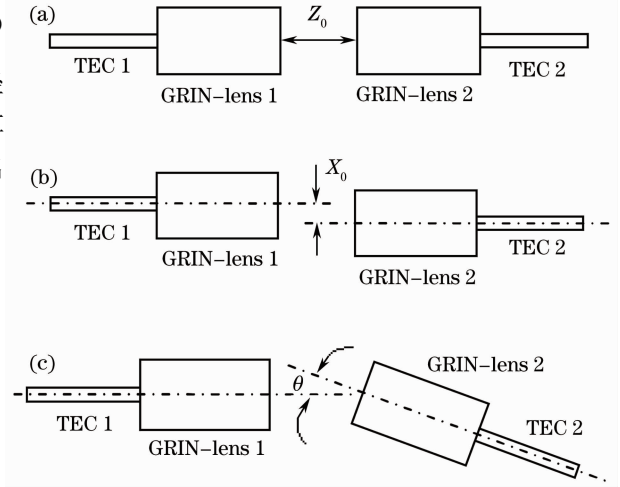


图 4 三种失配误差示意图。(a)轴向间距  $Z_0$ ; (b)横向位移  $X_0$ ; (c)偏角  $\theta$

Fig. 4 Schematic of three kinds of misalignments. (a) Axial separation  $Z_0$ ; (b) lateral offset  $X_0$ ; (c) angular tilting  $\theta$

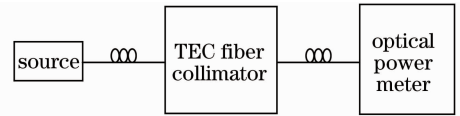


图 5 耦合插入损耗测量装置结构

Fig. 5 Structure of coupling-insertion loss measuring equipment

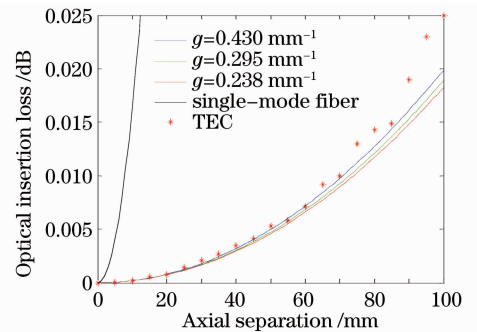


图 6 普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由轴向间距引起的插入损耗

Fig. 6 Insertion losses of single-mode fiber and TEC fiber collimator introduced by axial separation misalignment

直器的耦合插入损耗随轴向间距的增大变化很小,对其间距在一定范围内的改变并不敏感。当间距为100 mm时,TEC 光纤准直器的插入损耗为 0.024 dB,在这一范围内,轴向拉开两光纤准直器,其耦合损耗值变化很小,此后才逐渐变大。同时也可以看出,TEC 光纤准直器的轴向损耗容限远优于普通单模光纤准直器。在3 dB插入损耗时,TEC 光纤准直器的最大轴向间距为 1532 mm。同时,与理论计算值相比,实验室制备得到的 TEC 光纤准直器的轴向间距损耗值略大于理论计算值而损耗值变化趋势不变。因此,TEC 光纤准直器可用于对光耦合距离要求较长的光器件连接上。

图 7 为普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由横向位移引起的插入损耗。从该图可以看出,相对于普通单模光纤准直器而言,TEC 光纤准直器对横向位移较敏感。当横向位移大于 0.03 mm 时,插入损耗基本随横向位移成线性增加,当横向位移为 0.1 mm 时,插入损耗平均为 10 dB。实验测量值与理论计算值吻合,横向位移在 0.1 mm 范围内变化时,损耗值低于 10 dB。而且,随着 TEC 光纤准直器中自聚焦透镜的自聚焦常数的增大,损耗值逐渐增大。

图 8 为普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由偏角引起的插入损耗。从图中可知,普通单模光纤准直器比 TEC 光纤准直器的耦合插入损耗对偏角影响更敏感,两个准直器之间产生一个很小的偏角,耦合的插入损耗就发生较大变化,当两个普通单模光纤准直器的偏角为  $0.1^\circ$  时,耦合损耗就达到了 3.802 dB。而 TEC 光纤准直器在偏角耦合上有很大的改善,偏角为  $0.3^\circ$  时,随着自聚焦常数的增大,耦合损耗分别为 3.381、2.276、3.68 dB。用自聚焦常数为  $0.295 \text{ mm}^{-1}$  的自聚焦透镜制备的 TEC 光纤准直器在偏角为  $0.3^\circ$  时的耦合插入损耗为 2.58 dB。因此,在进行光纤准直器耦合时,应特别注意两个光纤准直器角度是否匹配。

## 4 结 论

1) 在 TEC 光纤的制备过程中,在相同加热温度下,加热时间越长获得的 TEC 光纤的出射光束的模场半径越大。

2) 对于 TEC 光纤准直器的结构为 TEC 光纤耦合  $1/4$  节距的自聚焦透镜,理论分析表明:TEC 光纤准直器在轴向间距和角度偏差上的耦合失配容限明显优于普通单模光纤准直器,横向位移损耗则高于普通单模光纤准直器。在 3 dB 插入损耗时,理论计算 TEC 光纤准直器的最大轴向间距为 1532 mm,最大角度偏差可达到  $0.345^\circ$ ,而实验室制备的 TEC 光纤准直器的最大轴向间距为 1517 mm,最大角度偏差为  $0.31^\circ$ 。因此,TEC 光纤准直器可用于长距离光耦合或旋转连接器件。

3) TEC 光纤准直器中自聚焦透镜的参数对准直器性能影响较大。在实际应用中可根据不同的使用条件选择合适的自聚焦透镜束组装 TEC 光纤准直器。

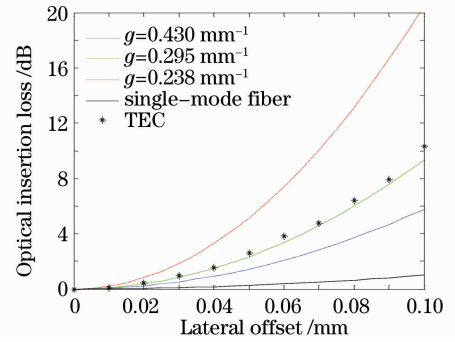


图 7 普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由横向位移引起的插入损耗

Fig. 7 Insertion losses of single-mode fiber and TEC fiber collimator introduced by lateral offset misalignment

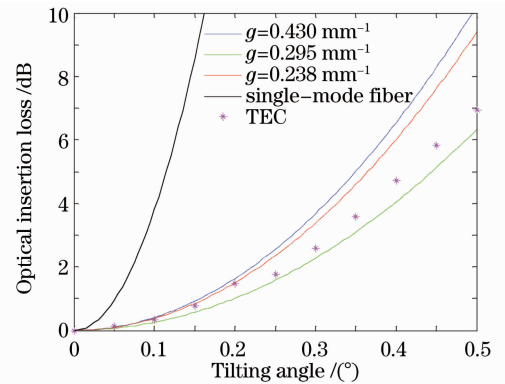


图 8 普通单模光纤准直器和 TEC 光纤准直器由偏角引起的插入损耗

Fig. 8 Insertion losses of single-mode fiber and TEC fiber collimators introduced by angular tilting misalignment

## 参 考 文 献

- 1 Wang Fujuan, Cai Zhigang, Liu Yazhao *et al.*. Expanded core fiber principle and its application in optical device coupling

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 737~742
- 王福娟, 蔡志岗, 刘娅钊 等. 扩芯光纤原理及其在光器件耦合中的应用[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 737~742
- 2 M. N. McLandrich. Core dopant profiles in weakly fused single mode fibers[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(1): 8~10
- 3 G. S. Kliros, P. C. Divari. Coupling characteristics of laser diodes to high numerical aperture thermally expanded core fibers[J]. *Mater. Sci., Mater. Electron.*, 2009, **20**(suppl. 1): 59~62
- 4 T. Sato, R. Kasahara, J. Sun *et al.*. In-line optical isolators integrated into a fiber array without alignment[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 943~945
- 5 Linh Viet Nguyen, Du-sun Hwang, Dae Seung Moon *et al.*. Tunable comb-filter using thermally expanded core fiber and ytterbium doped fiber and its application to multi-wavelength fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5793~5796
- 6 H. W. Kwon, J. W. Song, K. T. Kim. Bending effects of thermally-expanded-core fiber and its application as variable optical attenuator[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011, **50**(2): 806~807
- 7 Shiraishi K., Yanagi T., Kawakami S.. Light-propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(10): 1584~1591
- 8 Kliros G. S.. Propagation characteristics of thermally diffused expanded core fibers with complex refractive index profiles [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(11): 324~329
- 9 Savovic S., Djordjevich A.. Influence of initial dopant distribution in fiber core on refractive index distribution of thermally expanded core fibers[J]. *Opt. Mater.*, 2008, **30**(9): 1427~1431
- 10 Liu Desen, Gao Yingjun. The Physical Basis of Variable Refractive Index[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991. 36~37
- 刘德森, 高应俊. 变折射率介质的物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 36~37
- 11 Qi Xiaoling, Cai Zhigang, Xu Yuke *et al.*. A theoretical study of optical coupling in optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 521~526
- 齐晓玲, 蔡志岗, 徐宇科 等. 光耦合理论及其在通信元器件中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 521~526
- 12 Liao Tingdi. Study of laser beam collimating system with conical gradient-index rods by matrix optics method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(4): 351~355
- 廖廷递. 锥形梯度折射率激光准直系统的矩阵光学研究[J]. *光学学报*, 1993, **13**(4): 351~355
- 13 Hu Weisheng, Zeng Qingji. Misalignment-induced excess loss in gradient-index-rod lens collimating systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(3): 221~224
- 胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. *中国激光*, 1999, **26**(3): 221~224
- 14 Lei Mi, Shengli Yao, Chuandong Sun *et al.*. A single-channel fiber optic rotary joint on the basis of TEC fiber collimators [C]. The 9th International Conference on Optical Communications and Networks, 2010. 437~440
- 15 Zhang Ruifeng, Ge Chunfeng, Li Shichen. Analysis of the graded-index fiber-lens using thin lens equivalent[J]. *J. Optoelectron. • Laser*, 2005, **16**(12): 1441~1444
- 张瑞峰, 葛春风, 李世忱. 梯度折射率光纤透镜的薄透镜等效分析[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(12): 1441~1444