

文章编号: 0253-2239(2005)06-737-6

扩芯光纤原理及其在光器件耦合中的应用*

王福娟 蔡志岗** 刘娅钊 李宝军

(中山大学光电材料与技術国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 介绍了两种可以增大单模光纤模场直径并出射准直平行光束的扩芯光纤(ECF)的原理和制作方法。分析了单模光纤熔接渐变折射率多模光纤法通过改变渐变折射率多模光纤的长度和自聚焦参量实现模场扩大缩小的原理,制作的扩芯光纤模场直径扩大到 $16.6\ \mu\text{m}$,出射光束平行效果较好,轴向耦合容限比单模光纤扩大了近6倍。加热扩芯光纤则是通过控制加热温度和加热时间直接使单模光纤掺杂物质发生扩散,从而实现扩束和光束准直,模场直径达到 $15.4\ \mu\text{m}$,横向、轴向耦合容限都比单模光纤有很大提高。因此扩芯光纤可以简化单模光纤的耦合对准过程,用来制作新型的单模光纤或掺铒光纤连接器,也可以用于其它光器件中与单模光纤的准直。

关键词: 光纤光学; 扩芯光纤; 光耦合; 模式匹配

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Expanded Core Fiber Principle and Its Application in Optical Device Coupling

Wang Fujuan Cai Zhigang Liu Yazhao Li Baojun

(The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology,
Zhongshan (Sun Yat-Sen) University, Guangzhou 510275)

Abstract: Two kinds of expanded core fibers (ECF) are fabricated, one is single-mode fiber cascaded gradual index (GI) fiber and the other is thermally diffused expanded core fiber (TEC). The testing shows that ECF can reduce loss in fiber-to-fiber coupling and increase the misalignment tolerance greatly, so that it make the alignment and adjustment easier than normal single mode fiber(SMF). The transmission characteristics of the two kinds of ECF are studied and the probable use in optical devices such as connector, isolator and optical filter working as collimator are analyzed.

Key words: fiber optics; expanded core fiber; optical device coupling; mode field matching

1 引 言

光通信网络的发展对光器件提出了更新更高的要求,光纤之间、光纤和波导以及其它芯片之间的耦合问题因此得到了更广泛的关注。

由于单模光纤(SMF)的芯径只有多模光纤的十分之一,即 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 左右,单模光纤之间的耦合,单模光纤和其它波导器件的耦合一直都是光耦合中的难题。有些特殊光纤如掺铒光纤的模场直径

$4\sim 5\ \mu\text{m}$,色散位移光纤 $7\ \mu\text{m}$ 左右,都比单模光纤还小一些,一般波导尺寸比单模光纤更小,宽度几个微米,厚度甚至不到一微米,它们在和单模光纤耦合时存在模场尺寸的不匹配,这种不匹配导致耦合连接时会产生较大损耗。尤其在大规模光纤波导阵列(几十甚至几百通道)耦合中,要实现阵列中所有通道的快速精确耦合对准是很困难的。如果能够改变光纤芯径,从而控制输出光斑的模场直径以适合不

* 教育部科学技术研究重点项目(104144)、广东省科技计划项目(重大专项)(2003A1060201)和教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2003]406)资助课题。

作者简介: 王福娟(1979~),女,中山大学教师,硕士,主要从事无源光纤器件和组件的制作、测量及耦合封装等方面的研究。E-mail: wangfjlasers@163.com

** 通信联系人。E-mail: lasers@netease.com

收稿日期: 2004-04-29; 收到修改稿日期: 2004-11-09

同尺寸的耦合对象就可以使耦合对准过程大大简化。

为此可以对光纤端面进行加工处理,可以改变出射模场的 DOWN-TAPER 法、UP-TAPER 法^[1,2]等已有文献报道,但由于前者不能很好地将光束束缚在纤芯中,两者制作时都要求有一个特殊的模具,且在耦合对准时需要特殊的连接器而未被广泛采用。本文采用的单模光纤熔接渐变折射率多模光纤法制作的扩芯光纤(ECF),可以增大单模光纤和激光二极管(LD)等其它光器件耦合的工作距离^[3],显著提高单模光纤轴向耦合的容限,使耦合连接变得简单易行;而加热掺杂扩散法制作扩芯光纤,使普通单模光纤模场直径最大可以扩大到 $40 \mu\text{m}$ ^[4],可以有效简化单模光纤耦合对准过程^[5],也能用于解决特殊光纤和单模光纤耦合的模场失配问题,还可以用于隔离器、滤波器中代替传统自聚焦透镜作为准直器,从而使器件更小型化,稳定化^[6]。

2 单模光纤熔接渐变折射率多模光纤(GIF)法

2.1 渐变折射率光纤传输性质分析

渐变折射率光纤有类似于自聚焦透镜的性质,设 g 为聚焦参量,弱导近似下,光线在渐变折射率光纤中按正余弦曲线轨迹前进,其周期也就是自聚焦光纤节距为

$$P = 2\pi/g. \quad (1)$$

单模光纤熔接自聚焦光纤可以起到扩大或缩小光斑的目的,运用变换矩阵原理可以得到单模光纤熔接一段长度为 l 的自聚焦光纤的传输矩阵为^[7]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gl) & \frac{1}{g}\sin(gl) \\ -n_0 g \sin(gl) & n_0 \cos(gl) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

A, B, C, D 分别对应等式右边的四个矩阵元。 n_0 是渐变折射率光纤纤芯折射率。设单模光纤模场半径是 ω_0 , 经过渐变折射率光纤后出射光束模场半径 ω_1 和曲率半径 R_1 分别为

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_0 \left(n_0 \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AD - BC} \right)^{1/2}, \\ R_1 = \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AC + \alpha^2 BD}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\alpha = \lambda/(\pi\omega_0^2 n_0)$, λ 是入射光束波长。

1) 当渐变折射率光纤长度为

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

ω_0 经过 $1/4$ 节自聚焦光纤后 ω_1 为

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{g\pi n_0 \omega_0}, \quad (5)$$

ω_1 的大小与 ω_0 和 g 有关,图 1 是 $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 波长 λ 为 1310 nm 时根据(4)式计算的 ω_1 与 g 的关系曲线。

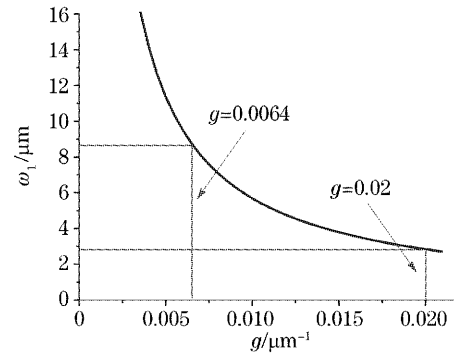


图 1 模场半径 ω_1 和聚焦参量 g 的关系

Fig. 1 Mode radius ω_1 vs focusing parameter g

选用 $g = 0.0064 (\mu\text{m}^{-1})$ 的渐变折射率光纤, $2\omega_0 = 10 \mu\text{m}$, 则 $2\omega_1 = 17.5 \mu\text{m}$, 构成了扩芯光纤(ECF); 选用 $g = 0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 的渐变折射率光纤, $2\omega_0 = 10 \mu\text{m}$, 则 $2\omega_1 = 5.7 \mu\text{m}$, 构成了聚焦光纤。只需根据具体情况选择适当自聚焦参量的渐变折射率光纤, 就可以方便的得到扩芯光纤或聚焦光纤。

2) 对于同一聚焦参量 g 的渐变折射率光纤, 由(2)式、(3)式知, 通过改变自聚焦光纤的长度 l , 也可以得到不同的出射模场半径和曲率半径, 而且函数变化具有周期性。图 2 是对于聚焦参量为 $0.0064 \mu\text{m}^{-1}$ 的渐变折射率光纤, 波长 1310 nm , 计算的模场半径 ω_1 和曲率半径 R_1 与 l 的关系曲线。当 l 在一个周期内变化, 可以得到 $5.0 \sim 8.73 \mu\text{m}$ 之间的不同出射模场半径, 曲率半径的变化反映光束

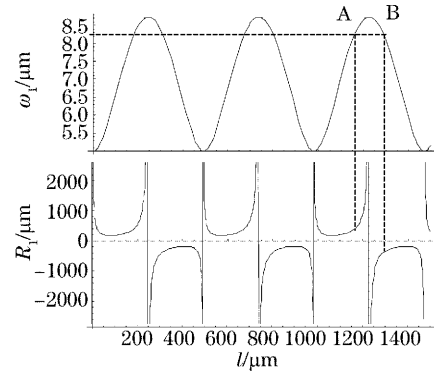


图 2 出射光束模场半径、波前面曲率半径随渐变折射率光纤长度 l 的变化

Fig. 2 Relation of mode radius, curvature radius and the length of GIF

的发散和收敛性质。当渐变折射率光纤长度位于 $l=1174\ \mu\text{m}$ 的 A 点和 $l=1280\ \mu\text{m}$ 的 B 点时,对应的 ω_1 都是约 $8.3\ \mu\text{m}$,然而它们的曲率半径大小相等符号相反,也就是说光束的发散收敛性相反。A 点出射光束向外发散,进入空气后由于折射率变小会发散的更严重,B 点出射光束收敛,然而光斑最小值不可能小于单模光纤的模场半径 $5\ \mu\text{m}$,这是由 g 值决定的。一般情况下希望出射光束不要发散,否则随着间隙变大不利于另一端对光的接收。限于实验条件,用标准通信用渐变折射率光纤做出扩芯光纤,如果能找到另一种 g 值更大的光纤,就可以实现单模光纤出射光斑变小而起到光纤透镜的作用,可以用于光纤波导耦合。

2.2 扩束光纤的制备和光耦合实验

实验中,选用通信用单模光纤,芯径为 $8.3\ \mu\text{m}$,测得其出射高斯光束的模场直径 $2\omega_0=9.6\ \mu\text{m}$ 。渐变折射率多模光纤的芯径为 $62.5\ \mu\text{m}$,聚焦参量 $g=0.0064\ \mu\text{m}^{-1}$, $P/4=245.4\ \mu\text{m}$ 。扩芯光纤是由单模光纤熔接 $5/4$ 节的渐变折射率多模光纤构成,实验所用波长为 $1310\ \text{nm}$ 。

用横向位移法测量扩芯光纤模场直径如图 3 所示,测得扩芯光纤模场直径由单模光纤的 $9.6\ \mu\text{m}$ 扩大到 $16.6\ \mu\text{m}$,与理论计算的 $17.3\ \mu\text{m}$ 稍有差距,可能是由于切割渐变折射率光纤长度 l 的误差所致,由图 2 可以看出, l 长度位于 $1227\ \mu\text{m}$ 时 ω_1 达到最大值 8.73 , l 稍有偏移都会导致 ω_1 偏小。光纤熔接时会缩短 $50\sim 80\ \mu\text{m}$ 的长度,对于 $1/4$ 节的自聚焦光纤的影响不可忽略,实验中为了确保切割出准确的 l 长度值,使用精度为 $10\ \mu\text{m}$ 的精细调节架来调整控制,并在显微镜下操作,可以有效地减小切割误差。

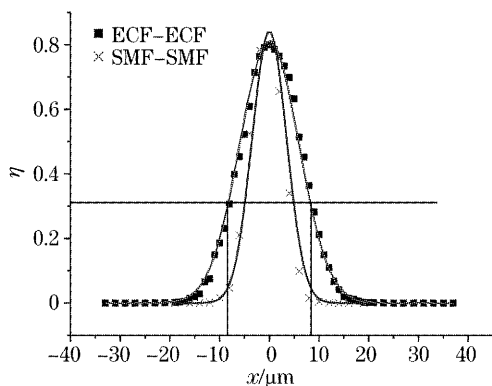


图 3 单模光纤和扩芯光纤横向偏移耦合效率比较
Fig. 3 A comparison of the transverse offset coupling efficiency of SMF and ECF

模场直径的扩大有利于横向的耦合对准,由图 4 可见单模光纤横向位错 $1\ \mu\text{m}$ 损耗已接近 $0.5\ \text{dB}$,而扩芯光纤的 $0.5\ \text{dB}$ 横向偏移可以达到 $2.7\ \mu\text{m}$,横向耦合容限得到增大。

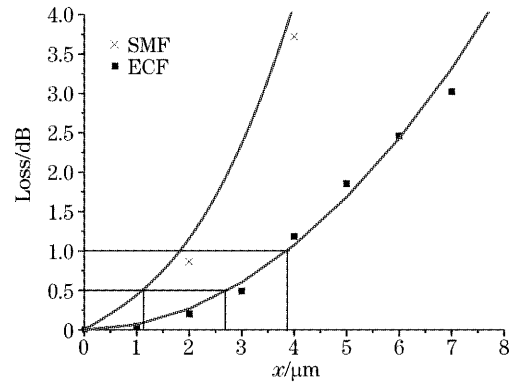


图 4 单模光纤和扩芯光纤横向偏移损耗比较
Fig. 4 A comparison of the transverse offset loss of SMF and ECF

两光纤存在轴向间隙的耦合损耗曲线如图 5 所示,可见随着两光纤间隙增大,单模光纤耦合效率下降很快,损耗迅速增大,两光纤间距 $18\ \mu\text{m}$,损耗已达到 $0.5\ \text{dB}$ (图中实验数值的耦合效率均按实际接收功率的最大值归一化,即已扣除菲涅耳反射、光纤熔接等导致的损耗);而扩芯光纤损耗变化则相对平缓很多,有效地减少了单模光纤的衍射损耗,两光纤间距 $107\ \mu\text{m}$ 损耗才达到 $0.5\ \text{dB}$,纵向耦合容限显著增大。可见扩芯光纤相当于一个光纤准直器,使单模光纤的准直连接变得简单易行。

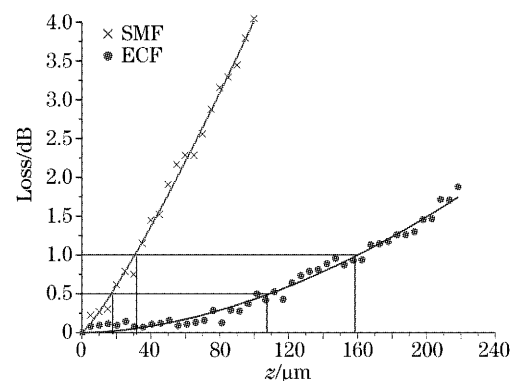


图 5 单模光纤和扩芯光纤轴向间隙损耗比较
Fig. 5 A comparison of the axial offset loss of SMF and ECF

2.3 耦合效率理论计算及与实验比较

设两光学元件出射模场的波函数分别为 $\varphi_1(x, y, z)$ 和 $\varphi_2(x, y, z)$ 则它们之间的耦合效率可以表示为

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x, y, z) \varphi_2^*(x, y, z) dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x, y, z) \varphi_1^*(x, y, z) dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_2(x, y, z) \varphi_2^*(x, y, z) dx dy} \quad (6)$$

下面将从理论上计算扩芯光纤之间的耦合效率, 设单模光纤模场半径为 $5 \mu\text{m}$ (1310 nm), 计算得扩芯光纤出射模场半径 ω_e 为 $8.73 \mu\text{m}$, 经过长度为 z 的空气隙后, 左端光纤出射波函数为

$$\varphi_1(z) = E_1(z) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_1(z)^2}\right] \times \exp\left[-i \frac{k(x^2 + y^2)}{2R_1(z)}\right], \quad (7)$$

其中, 模场半径:

$$\omega_1(z) = \omega_e \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{n\pi\omega_e}\right)^2} = 8.7338 \sqrt{1 + 1.25 \times 10^{-4} z^2}, \quad (8)$$

曲率半径:

$$R_1(z) = z \left[1 + \left(\frac{n\pi\omega_e}{z\lambda}\right)^2 \right] = z + \frac{80016}{z}, \quad (9)$$

$E_1(z)$ 是左端出射模场在 z 处振幅的最大值, k 是波数. 右端接收光纤在 z 处的模场半径 $\omega_2 = \omega_e, R \rightarrow \infty$.

波函数为

$$\varphi_2 = E_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{8.73^2}\right), \quad (10)$$

其中 E_2 是模场振幅最大值. 将(7)式~(10)式代入(6)式计算出轴向偏移的耦合效率, 与实验数据的比较见图6(图中实验数值的耦合效率均按实际接收功率的最大值归一化). 理论曲线和实验数据基本吻合, 验证了理论公式的正确性.

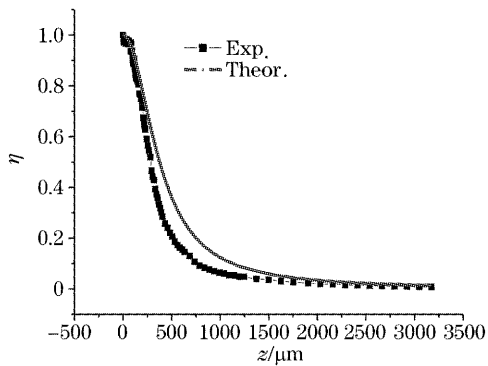


图6 扩芯光纤轴向间隙耦合效率

Fig. 6 Coupling efficiency of axial offset of two ECFs

两光纤存在横向位错 x 时, 也可根据重叠积分原理计算出耦合效率与横向位错 x 的关系为

$$\eta = \exp(-x^2/\omega_e^2), \quad (11)$$

由图7看出理论与实验数据吻合较好, 可见扩芯光纤横向模场仍可用高斯分布来近似, 只是指数衰减系数比单模光纤小, 衰减曲线也变得更平缓.

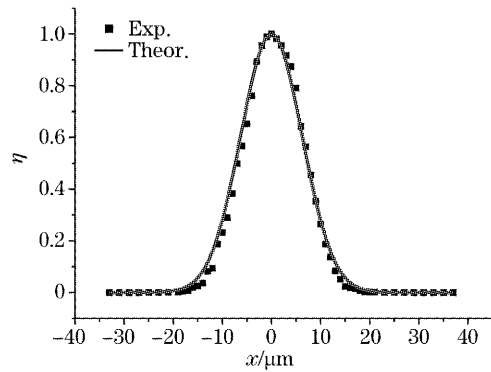


图7 扩芯光纤横向偏移耦合效率

Fig. 7 Coupling efficiency of transverse offset of two ECFsJP

3 加热掺杂扩散法

3.1 加热扩芯光纤的设计分析

不同于前面的单模光纤接续渐变折射率光纤形成的扩束光纤, 这种扩芯光纤工艺是直接对单模光纤进行加热处理, 通过纤芯中的掺杂物质的扩散实现扩芯. 早在1988年 Mclandrich 就报导过在熔融拉锥制作耦合器过程中, 高达上千度的高温会导致熔锥区纤芯内掺杂的锗发生扩散^[8]. 掺杂物质的扩散必然引起折射率变化, 纤芯因为锗含量降低使折射率下降, 包层折射率会相应提高, 光纤有效芯径变大. 因此人们有意识地对单模光纤或其它特殊光纤如掺铒光纤、色散位移光纤进行类似的加热处理, 以达到扩大纤芯, 减小模场失配和连接损耗, 方便耦合的目的.

加热可以采用 CO_2 激光器或微电炉, 通过控制加热时间和热源温度等参量, 可以得到不同模场直径的扩芯光纤^[9]. 设 n_1 和 n_0 分别代表原单模光纤纤芯折射率和包层折射率, 加热导致纤芯掺杂物质向包层扩散, 假设折射率变化和掺杂变化成正比, 则新的折射率分布可以表示为^[10]

$$n^2(r, t) = n_0^2 + (n_1^2 - n_0^2)U(r, t), \quad (12)$$

其中 $U(r,t)$ 为扩散后新的掺杂分布函数,它跟径向距离 r 和加热时间 t 有关。充分扩散后,新的掺杂分布应为高斯函数,即

$$U(r,t) = \frac{a^2}{b^2} \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right), \quad (13)$$

其中 a 是原单模光纤纤芯半径, b 是加热扩散后得到的扩芯光纤纤芯半径,与加热温度和加热时间有关。将(13)式代入(12)式得到

$$n^2(r,t) = n_0^2 + \frac{a^2}{b^2} (n_1^2 - n_0^2) \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right). \quad (14)$$

在加热扩散区长度足够大的情况下,掺杂不发生纵向扩散,每一无限小横截面掺杂量近似守恒,因而光纤归一化截止频率不变,仍能保持单模传输,其 LP_{01} 模的模场分布仍可用高斯光束来近似,只是衰减因子相对单模光纤变小。

3.2 实验测试与分析

用 CCD 拍摄光纤端面的近场光强分布,如图 8 所示。按灰度值求和后得到的光强分布如图 9,实线为用高斯曲线拟合结果,可见出射光束近似高斯分布。

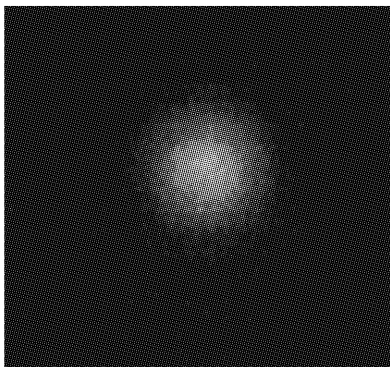


图 8 光强分布图

Fig. 8 Photo of intensity distribution

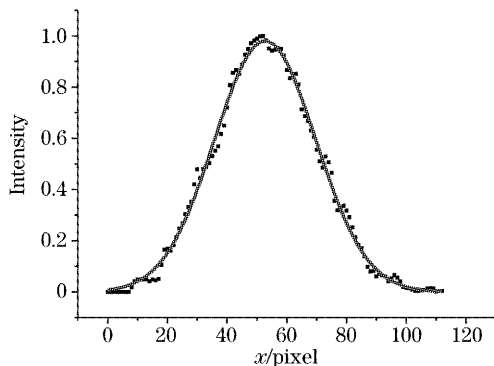


图 9 量化后的光强分布曲线

Fig. 9 Intensity distribution curve for Fig. 8

用横向移位法测量加热扩芯光纤模场直径,发

现模场直径扩大到 $15.4 \mu\text{m}$,图 10 显示的是随横向偏移增大耦合损耗的变化,0.5 dB 损耗所允许的横向偏移由单模光纤的 $1.2 \mu\text{m}$ 增大到 $2.6 \mu\text{m}$ 。

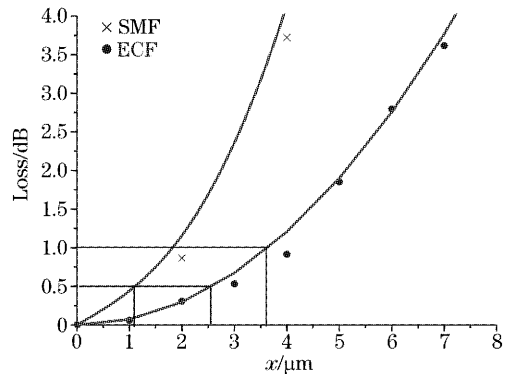


图 10 单模光纤和扩芯光纤横向偏移损耗比较

Fig. 10 A comparison of the transverse offset loss of SMF and ECF

图 11 是测量的耦合损耗随轴向间隙增大的变化情况,可见同样间隙距离扩芯光纤耦合效率比单模光纤也有很大提高,即 0.5 dB 损耗所允许的间隙距离由单模光纤的 $18 \mu\text{m}$ 增大到 $92 \mu\text{m}$ 。

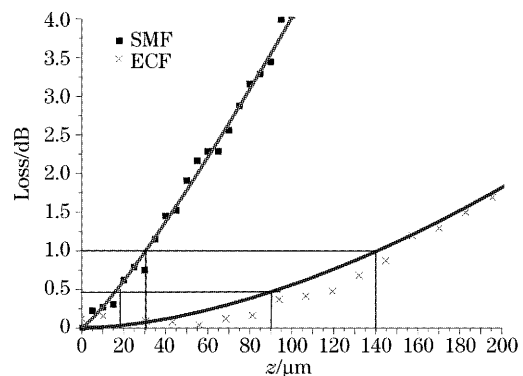


图 11 单模光纤和扩芯光纤轴向间隙损耗比较

Fig. 11 A comparison of the axial offset loss of SMF and ECF

需要说明的是,用加热扩散法制作的扩芯光纤模场直径扩大到 $15.4 \mu\text{m}$,相比第一种熔接法得到的模场直径 $16.6 \mu\text{m}$ 的扩芯光纤,扩束和准直效果相对差一些,但是通过合理控制加热温度、加热时间和其它工艺上的改进,得到更大的模场直径是可行的。假设模场直径扩大到 $30 \mu\text{m}$,0.5 dB 损耗所允许的横向偏移和轴向偏移分别可达到 $5.1 \mu\text{m}$ 和 $358 \mu\text{m}$,有文献报导的最大模场直径可以扩大到 $40 \mu\text{m}$ ^[3]。

4 结 论

两种扩芯方法都可以实现模场直径的扩大和出

射光束的准直,单模光纤熔接自聚焦光纤法可以通过改变聚焦参量和渐变折射率光纤长度实现模场的大小变化,而加热扩芯法可以控制加热时间和加热温度以达到不同的模场直径。

扩芯光纤不但可以简化单模光纤之间的耦合对准过程,还可以解决不同芯径光纤连接时的模式失配,减小某些特殊光纤如掺铒光纤、色散位移光纤和单模光纤之间的耦合损耗。

扩芯光纤还可以代替自聚焦透镜作为光纤准直器,中间插入微小芯片,制作小型化、集成化的全光纤器件,隔离度达到30 dB、插入损耗小于1 dB的隔离器已经能够实现,用扩芯光纤阵列制作集成阵列隔离器已成为可能。

参 考 文 献

- 1 N. Amitay, H. M. Presby, F. V. Dimarcello *et al.*. Optical fiber tapers — a novel approach to self-aligned beam expansion and single-mode hardware[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(1): 70~76
- 2 Liu Xuefeng, Sun Junqiang, Wang Honge *et al.*. Study on low loss connecting between small core diameter Er^{3+} doped fiber and single mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 854~857 (in Chinese)
- 3 Kazuo Shiraiishi, Shin-Ichi Kuroo. A new lensed-fiber configuration employing cascaded GI-fiber chips [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 787~794
- 4 Osamu Hanaizumi, Yoshizo Aizawa, Hiroaki Minamide *et al.*. Fabrication of an expanded core fiber having MFD of 40 μm preserving outer diameter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7): 842~844
- 5 Kyung-Rok Kim, Kyunghwan Oh. All-fiber spot-size transformer for efficient free-space optical interconnecting devices [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6261~6266
- 6 Takashi Sato, Ryoichi Kasahara, Jun Sun *et al.*. In-line optical isolators integrated into a fiber array without alignment [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 943~945
- 7 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 (in Chinese)
- 8 M. N. McLandrich. Core dopant profiles in weakly fused single-mode fibers[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(1): 8~10
- 9 Mitsuru Kihara, Michito Matsumoto, Taodashi Haibara *et al.*. Characteristics of thermally expanded core fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2209~2214
- 10 Yasuo Ohtera, Osamu Hanaizumi, Shojiro Kawakami. Numerical analysis of eigenmodes and splice losses of thermally diffused expanded core fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(12): 2675~2681