

文章编号: 0253-2239(2004)04-442-6

光波导—光纤自动调芯系统研究*

龙彩华¹ 陈抱雪^{1*} 沙慧军¹ 赵德欣¹ 郭 荧¹ 袁一方¹ 矶 守²

(¹ 上海理工大学光电学院, 上海 200093
² 日本东京农工大学工学部应用化学系, 日本 东京 184-8588)

摘要: 设计了两种适用于光波导高精度自动对接耦合的调芯方案, 从原理上克服了常规调芯过程中微变信号精确测试的困难。完成了调芯系统的光机电一体化、控制程序和接口界面。单模光纤作为标准波导的端面耦合自动调芯试验显示, 平均耦合损耗分别为 0.075 dB (1310 nm 波长) 和 0.062 dB (1550 nm 波长), 相应的标准误差分别为 0.0099 dB 和 0.0066 dB, 调芯过程在 2 min 内完成。单模光纤—单模波导—单模光纤的对接耦合实验结果表明, 端面耦合损耗平均值分别为 0.140 dB (1310 nm 波长) 和 0.109 dB (1550 nm 波长), 标准误差分别为 0.0082 dB 和 0.0107 dB, 调芯时间累计不超过 8 min。

关键词: 光波导; 光纤; 端面耦合; 耦合损耗; 自动调芯

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Study on Fiber-Waveguide Automatic Alignment System

Long Caihua¹ Chen Baoxue¹ Sha Huijun¹ Zhao Dexin¹ Guo Ying¹
Yuan Yifang¹ Iso Mamoru²

¹ College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093
² Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture
and Technology, Tokyo, Japan 184-8588

(Received 13 November 2002; revised 30 May 2003)

Abstract: Based on analysis of the coupling theory, the two auto-aligning methods and programs are designed. Experiment results using single mode fiber as standard waveguide show that the average end-coupling loss is 0.075 dB, the standard deviation is 0.0099 dB at the wavelength 1310 nm, and is 0.062 dB and 0.0066 dB at 1550 nm, respectively. A process only needs 2 min. When it comes to fiber-SiO₂ waveguide-fiber system, the average end-coupling losses are 0.140 dB and 0.109 dB, and the standard deviations are 0.0082 dB and 0.0107 dB, at 1310 nm and 1550 nm, respectively. The whole process is accomplished within 8 min.

Key words: waveguide; fiber; end-coupling; coupling-loss; auto-aligning

1 引 言

近年来在光通信干线网的高速传输实验和接入网的光纤到户技术中, 越来越多地采用了光波导器件^[1~5]。在光纤网络中导入光波导器件, 必须解决

的问题是光纤和光波导的连接封装。考虑到器件插入损耗对网络经济性的直接影响, 其中要解决的一个关键技术是光波导器件与光纤的低损耗对接。目前国际上的指标是每端损耗低于 0.15 dB。要达到这一指标, 一方面要求光波导的模场分布尽可能与光纤的一致, 另一方面必须要求光波导与光纤的光轴对准精度控制在 0.1 μm 以下。采用常规手动操作, 技术要求很高, 特别是在耦合进入 0.3 dB 后, 作为操作判据的微变信号精确测试是技术关键, 相应的微

* 教育部科学技术研究重点项目(2000ZD11)、上海市科学技术发展基金(022261044)资助课题。

** E-mail: bxchen@online.sh.cn

收稿日期: 2002-11-13; 收到修改稿日期: 2003-05-30

操作十分困难,因此效率很低、重复性很差。为了解决这些问题,我们对具有对称模场分布和非对称模场分布的单模波导与单模光纤的端面耦合做了理论分析,开发设计了两套与常规过程不同的调芯程序,依据波导间的端面耦合原理^[6~8],研制了自动调芯系统。通过计算机对精密步进导轨的控制以及伺服过程,实现了这两种调芯方案的自动化过程。使用该系统,用单模光纤作为标准光波导做了端面耦合自动调芯试验。结果显示,使用第一套程序,平均耦合损耗分别为0.074 dB(1310 nm波长)和0.064 dB(1550 nm波长);对于第二套程序,平均耦合损耗分别为0.075 dB(1310 nm波长)和0.062 dB(1550 nm波长)。调芯过程在 2 min 内完成。本文还报告了光纤-波导-光纤的对接耦合自动调芯实验结果。

2 波导-光纤端面耦合及其耦合效率

对接过程中,波导与光纤之间填满了折射率匹配的待固化粘结剂,端面反射可忽略。因此端面耦合效率在理论上表现为导模场分布间的重叠积分。图 1 给出了单模光纤和单模条波导的端面耦合的解析模型。

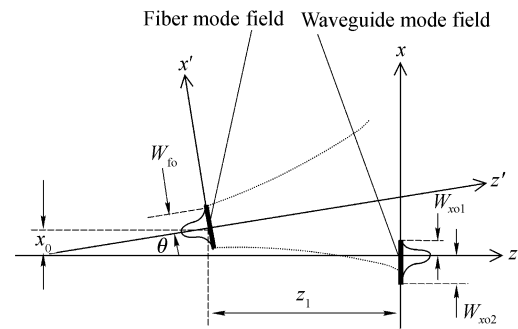


Fig. 1 The analytic model of the end-coupling between the single mode fiber and single mode waveguide

光纤和条波导在 $x-z$ 面内有一个光轴间的角度偏差 θ 以及模场峰值在垂直于 z 轴方向上的偏差 x_0 , 光纤和波导的端面沿 z 轴的间距为 z_1 。考虑到光波导制造工艺中一些不可预测的因素导致波导模场分布的非对称性,用两个不同的束腰 W_{x01} 和 W_{x02} 表征波导基模的非对称场分布。出于解析上的方便,设 y 方向上波导模的场分布对称,束腰为 W_{y0} 。单模光纤和单模条波导的出射光波用高斯光波描述^[9], 以图 1 中条波导端面 ($z=0$) 作为参考面,在该面上单模光纤出射光的场分布为

$$E_f(x', y, z') = u_x(x', z')u_y(y, z') \exp[j\phi_f(z')] \exp(-jkz'), \quad (1a)$$

$$u_x(x', z') = \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W_f(z')} \right]^{1/2} \exp\left[-\frac{x'^2}{W_f^2(z')}\right] \exp\left[-j \frac{kx'^2}{2R_f(z')}\right], \quad (1b)$$

$$u_y(y, z') = \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W_f(z')} \right]^{1/2} \exp\left[-\frac{y^2}{W_f^2(z')}\right] \exp\left[-j \frac{ky^2}{2R_f(z')}\right], \quad (1c)$$

式中

$$\phi_f(z') = \arctan\left(\frac{2z'}{kW_{fo}^2}\right), \quad W_f(z') = W_{fo} \sqrt{1 + \left(\frac{2z'}{kW_{fo}^2}\right)^2}, \quad R_f(z') = z' \left[1 + \left(\frac{kW_{fo}^2}{2z'}\right)^2\right], \quad (2)$$

这里 W_{fo} 为光纤模的束腰, k 为光波在波导与光纤之间的介质中的波数,与介质的折射率有关,反映了匹配液的作用。单模波导模在参考面上的归一化场分布可写成

$$E_g(x, y) = v_x(x)v_y(y), \quad (3a)$$

$$v_x(x) = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2}{W_{x01} + W_{x02}} \right)^{1/2} \exp\left[-\frac{x^2}{W_x^2(x)}\right], \quad (3b)$$

$$v_y(y) = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W_{y0}} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{y^2}{W_{y0}^2}\right), \quad (3c)$$

式中

$$W_x(x) = \begin{cases} W_{x01}, & x \geq 0 \\ W_{x02}, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

通常对准操作时,两光轴间的夹角 θ 很小,可作近轴处理,两个坐标系在参考面上有如下关系

$$\begin{cases} z' = z_1 + x\theta - x_0\theta, \\ x' = x - x_0 - z_1\theta. \end{cases} \quad (5)$$

于是波导与光纤的端面耦合效率 η 可表示为

$$\eta = \left| \iint E_f^*[x'(x), y, z'(x)] E_g(x, y) dx dy \right|^2. \quad (6)$$

把(1)式、(3)式代入上式,得

$$\eta = \eta_x \eta_y, \quad (7a)$$

$$\eta_x = \frac{4 \exp[-2(z_1 \theta + x_0)^2 / W_f^2(z_1)]}{\pi W_f(z_1)(W_{x01} + W_{x02})} \{ [S_2 - S_1 + \sqrt{\pi} A_1 \exp(Q_i^2)]^2 + [T_2 - T_1 + \sqrt{\pi} B_1 \exp(Q_i^2)]^2 \}, \quad (7b)$$

$$\eta_y = 2 \left/ \left[\left(\frac{W_{f0}}{W_{y0}} + \frac{W_{y0}}{W_{f0}} \right)^2 + \left(\frac{2z_1}{kW_{f0}W_{y0}} \right)^2 \right]^{1/2} \right., \quad (7c)$$

式中

$$\begin{cases} S_i = A_i \exp(Q_i^2) \operatorname{erfc}(Q_i) - \int_0^{R_i} \exp(t^2) [A_i \sin(2Q_i t) + B_i \cos(2Q_i t)] dt, \\ T_i = B_i \exp(Q_i^2) \operatorname{erfc}(Q_i) - \int_0^{R_i} \exp(t^2) [B_i \sin(2Q_i t) - A_i \cos(2Q_i t)] dt, \end{cases} \quad (8a)$$

$$\begin{cases} A_i = \exp(-R_i^2) [M_i \cos(2Q_i R_i) + N_i \sin(2Q_i R_i)], \\ B_i = \exp(-R_i^2) [N_i \cos(2Q_i R_i) - M_i \sin(2Q_i R_i)], \end{cases} \quad (8b)$$

$$\begin{cases} Q_i = \frac{k}{2} \left[\frac{z_1 \theta + x_0}{R_f(z_1)} - \theta \right] N_i + \frac{z_1 \theta + x_0}{W_f^2(z_1)} M_i, \\ R_i = \frac{k}{2} \left[\frac{z_1 \theta + x_0}{R_f(z_1)} - \theta \right] M_i - \frac{z_1 \theta + x_0}{W_f^2(z_1)} N_i, \end{cases} \quad (8c)$$

$$\begin{cases} M_i = \left\{ \left[\sqrt{\left(\frac{1}{W_f^2(z_1)} + \frac{1}{W_{x0i}^2} \right)^2 + \frac{k^2}{4R_f(z_1)}} + \frac{1}{W_f^2(z_1)} + \frac{1}{W_{x0i}^2} \right] / 2 \left[\left(\frac{1}{W_f^2(z_1)} + \frac{1}{W_{x0i}^2} \right)^2 + \frac{k^2}{4R_f(z_1)} \right] \right\}^{1/2}, \\ N_i = \left\{ \left[\sqrt{\left(\frac{1}{W_f^2(z_1)} + \frac{1}{W_{x0i}^2} \right)^2 + \frac{k^2}{4R_f(z_1)}} - \frac{1}{W_f^2(z_1)} - \frac{1}{W_{x0i}^2} \right] / 2 \left[\left(\frac{1}{W_f^2(z_1)} + \frac{1}{W_{x0i}^2} \right)^2 + \frac{k^2}{4R_f(z_1)} \right] \right\}^{1/2}, \end{cases} \quad (8d)$$

式中 $i = 1, 2$ 。耦合效率 η 随 θ 、 z_1 和 x_0 的增大而减小。当 θ 、 z_1 和 x_0 为零时, 式(7)变为

$$\eta = \frac{2}{W_{f0}(W_{x01} + W_{x02})(W_{f0}/W_{y0} + W_{y0}/W_{f0})} \left(\frac{1}{\sqrt{1/W_{f0}^2 + 1/W_{x01}^2}} + \frac{1}{\sqrt{1/W_{f0}^2 + 1/W_{x02}^2}} \right)^2, \quad (9)$$

若波导的模场分布为对称时 ($W_{x01} = W_{x02} = W_{x0}$), 有最大耦合效率。此时, 当波导与光纤的模场分布相等时, 耦合效率 $\eta = 100\%$ 。可见, 对于给定的波导和光纤, 要获得高的端面耦合效率, 必须尽可能使两者的光轴对准且保持平行、两者的端面间隔应尽量小且填充适当的折射率匹配介质。

3 调芯方案设计

3.1 对称模场分布波导-光纤的调芯

大多数 SiO_2 单模波导有很高的品质, 显示对称的模场分布。常规调芯是通过微调波导与光纤的相对光轴位置来获得尽可能大的耦合效率, 当端面间非常靠近时, 必须要求光轴间近乎平行, 否则由于边缘碰撞导致 x - y 面内的微调不能进行。此时可以近似认为 $z_1 = 0$ 、 $\theta = 0$, 代入式(7)得到耦合效率

$$\eta = \frac{4}{(W_{f0}/W_{x0} + W_{x0}/W_{f0})(W_{f0}/W_{y0} + W_{y0}/W_{f0})} \times \exp \left[-\frac{2x_0^2(1/W_{f0}^2 + 1/W_{x0}^2)}{(W_{f0}/W_{x0} + W_{x0}/W_{f0})^2} \right], \quad (10)$$

(10)式显示, 以扫描位置 x_0 为变量, 耦合效率分布曲线具有对称的高斯函数特征。围绕最大耦合效率点 ($x_0 = 0$) 的顶部较平坦, 功率变化很小, 对仪器的微小值判别要求很高, 是常规调芯过程的技术难点。在曲线的两侧半值附近, 变化率最大, 可有效利用系统的判别率。为了避开微小值判别的困难, 我们提出的第一种调芯方案是: 先以 $0.25 \mu\text{m}$ 的步长扫描获得输出功率分布曲线, 判断对称性并大致确定曲线的半值区域; 然后, 以 $0.05 \mu\text{m}$ 的步长精走扫描两侧半值区域, 利用该区域的高变化率找出两侧的两个等值点坐标, 由此算出峰值点的坐标, 并指定探测光纤进入该坐标位置。此过程在 x 轴和 y 轴上交替进行, 每个轴的累计扫描次数可以设定。若发现曲线稍有非对称性时, 精走扫描将被指定在两侧半值点以内的适当区域进行, 因为曲线的非对称性愈靠近峰值处愈得到缓解。

3.2 非对称模场分布波导-光纤的调芯

与光纤不同, 由于波导制备工艺的复杂性, 有时会出现波导芯几何形状的变形或折射率分布的不均

匀等情况,在这种结构中导模的场分布不对称。与上述讨论一样,在完成了角度调整并使两端面足够

靠近时,可以近似认为 $z_1=0, \theta=0$,代入式(7)得到耦合效率

$$\eta = \eta_x \eta_y, \quad (11a)$$

$$\eta_x = \frac{4 \exp(-2x_0^2/W_{f0}^2)}{\pi W_{f0}(W_{x01} + W_{x02})} \left\{ A_1 \exp(Q_1^2) \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} + \operatorname{erf}(Q_1) \right] + A_2 \exp(Q_2^2) \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \operatorname{erf}(Q_2) \right] \right\}^2, \quad (11b)$$

$$\eta_y = \frac{2}{W_{f0}/W_{y0} + W_{y0}/W_{f0}}, \quad (11c)$$

式中

$$Q_i = \frac{x_0}{W_{f0}} \frac{1}{\sqrt{1/W_{f0}^2 + 1/W_{x0i}^2}}, \quad A_i = \frac{1}{\sqrt{1/W_{f0}^2 + 1/W_{x0i}^2}}, \quad (i = 1 \text{ or } 2) \quad (12)$$

以扫描位置 x_0 为横坐标,耦合效率曲线示于图 2。定义非对称因子 $\alpha = 1 - (W_{x01}/W_{x02})$,图 2 显示,随着 α 的增大,耦合效率分布曲线呈现愈亦明显的非对称性,峰值位置与光轴位置不重叠。耦合效率的峰值位置 x_{\max} 可由 $\partial\eta/\partial x_0 = 0$ 算出。

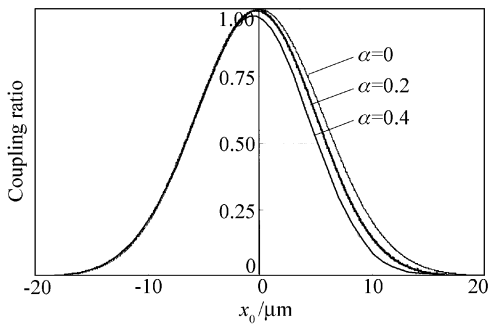


Fig. 2 Several different end-coupling efficiency curves between single mode fiber and asymmetrical waveguide. Define $\alpha = 1 - (W_{x02}/W_{x01})$ as asymmetrical factor

另一方面,尽管曲线的非对称性在靠近峰值附近有明显缓解,然而峰值附近的曲线变化缓慢,调芯时仍然存在微小变值判别的困难。为了减小微小变值测试误差带来的影响,充分利用计算机在自动调芯过程中的数值处理特长,我们提出了第二种调芯方案。该方案避开直接寻找峰值位置,采用测量计算峰值附近的耦合效率分布的质心来确定峰值位置。设 x_{01} 和 x_{02} 为峰值点两侧具有等值耦合效率的位置坐标,在该区间内耦合效率分布的质心位置 x_A 由下式给出:

$$x_A = \frac{\int_{x_{01}}^{x_{02}} x_0 [\eta - \eta(x_{01})] dx_0}{\int_{x_{01}}^{x_{02}} [\eta - \eta(x_{01})] dx_0}, \quad \eta(x_{01}) = \eta(x_{02}), \quad (13)$$

由于耦合效率分布曲线的非对称性在峰值附近变得很小,因此,质心位置 x_A 与峰值位置 x_{\max} 的偏差 $\Delta x = x_A - x_{\max}$ 与比值 $\eta(x_{01})/\eta(x_{\max})$ 有关。图 3 给出了 Δx 与 $\eta(x_{01})/\eta(x_{\max})$ 的关系曲线,当取 $\eta(x_{01})/\eta(x_{\max})$ 大于 90% 时,偏差 Δx 在 $0.015 \mu\text{m}$ 以内,相当于仪器的最小步长 $0.05 \mu\text{m}$ 的 $1/3$,已不构成实际影响。采用质心法的优点在于所有的随机测试误差在计算质心位置的过程中被做了代数平均,而随机误差的平均值是非常小的。这个方法相当程度地缓解了对微变信号精确测试的要求。调芯方案的实施过程为:由粗走扫描大致确定输出曲线的形状和峰值点的大致位置后,以峰值点大致位置为中心,在其两边以 $\eta(x_{01})/\eta(x_{\max}) = \eta(x_{02})/\eta(x_{\max}) = 90\%$ 确定积分区间 $[x_{01}, x_{02}]$ 。在该区间上精走扫描,并完成对输出功率的数值坐标积分,坐标积分得到的面积代表了扫描过程中输出功率的累积值。该面积的质心位置反映了经过平均处理后得到的、可获得最大耦合效率的坐标位置。此过程在 x 和 y 轴上交替进行,并可设定各轴的扫描次数。

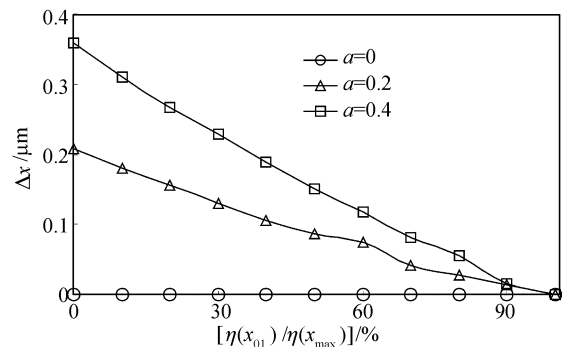


Fig. 3 The relation between Δx and $\eta(x_{01})/\eta(x_{\max})$. x_A and x_{\max} are the barycenter position and the top value position, respectively

4 系统结构、实验和结果

试制的自动调芯系统由高稳定光源、两套精密六维调整装置、波导调整座、步进电机控制器、高分辨率光功率计和计算机等组成。光波导被固定于三维手动调整座上,左右两侧的精密六维调整台分别置有输入和输出光纤。精密六维调整台的 x 轴、 y 轴、 z 轴和 θ_z 转轴由步进电机驱动,另外两维手动操作。步进移动量的最小值由脉冲的分割数决定,最小分割数为 $1/20$,对应的移动量理论上为 $0.05 \mu\text{m}$ 。 θ_z 的灵敏度为 0.0045° ,其它两转轴的最小读数为 $34'$ 。系统选用的高稳定度光源可达到 $\pm 0.005 \text{ dB}/15 \text{ min}$ 的短期稳定性和 $\pm 0.05 \text{ dB}/12 \text{ h}$ 的长期稳定性。光功率计的相对测量分辨力为 0.001 dB ,带有 GP-IB 接口。指令系统由计算机担当,根据编制的程序控制调芯操作,实时接受探测器的光功率信号,实时完成判别、记忆和反馈操作。

光轴的角度调整采用手动操作,在自动调芯前完成。端面间置有折射率匹配液珠,由于表面张力作用,匹配液珠的位置与两端面间的夹角有关,通过直交的显微监测下的调角操作可以获得很好的端面间平行。端面间隔是通过显微监测、步进驱动来控制,通过观察匹配液的挤展状态可控制间隔在 $1 \mu\text{m}$ 前后。另外,步进驱动导轨的空程的实测值约为 $0.3 \mu\text{m}$,在调芯时,程序中加入了反向走行时的校准。

4.1 光纤-光纤的自动调芯

实验采用单模光纤作为标准波导。由于光纤的模场分布非常规范,耦合试验可排除波导自身质量带来的问题,便于客观地反映调芯系统在硬件和软件两方面的性能。清洁干燥的光纤端面间,置有微量的折射率匹配液,与光纤芯的折射率差小于 0.01 ,反射损耗小于 -50 dB ;透过率约为 $99\%/ \text{mm}$,对于 $1 \mu\text{m}$ 左右的端面间隙可忽略匹配液的吸收。通过前述的显微监测操作方法完成光轴的角度调整和端面间隙粗调。在功率计监测下,由自动搜索程序控制光纤的微调操作,直至两光纤间通光。此时计算机与功率计间的反馈通道进入可运行状态。进一步用步进控制调节 z 轴走行,使端面间隙达 $1 \mu\text{m}$ 左右。之后进入自动调芯过程。按前述两种程序方案完成的自动调芯结果列于表 1。实验次数均为 9 次,每次调芯过程的累计扫描次数为 2 次/轴,完成一次自动调芯过程的时间在 2 min 以内。在 1310 nm 和 1550 nm 波长上,第一种程序的耦合损耗

平均值分别为 0.074 dB 和 0.064 dB ,标准误差分别为 0.0115 dB 和 0.0078 dB ;对于第二种程序,平均耦合损耗分别为 0.075 dB 和 0.062 dB ,标准误差分别为 0.0099 dB 和 0.0066 dB 。单次耦合的损耗均小于 0.1 dB ,反映了系统软、硬件良好的自动调芯性能和效率。

Table 1 The experiment results of the fiber to fiber system in the two methods at 1310 nm and 1550 nm wavelegnths, respectively

No.	1310 nm	1310 nm	1550 nm	1550 nm
	program 1	program 2	program 1	program 2
1	0.078	0.082	0.072	0.068
2	0.082	0.082	0.072	0.072
3	0.082	0.078	0.068	0.058
4	0.082	0.078	0.058	0.058
5	0.078	0.078	0.056	0.058
6	0.074	0.082	0.058	0.064
7	0.082	0.078	0.064	0.064
8	0.057	0.061	0.052	0.051
9	0.052	0.055	0.072	0.068
Average	0.074	0.075	0.064	0.062
Standard deviation σ_{n-1}	0.0115	0.0099	0.0078	0.0066

4.2 光纤-波导-光纤的自动调芯

采用日本 NHK 公司的石英基 SiO_2 掩埋型单模条波导,芯截面尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,相对折射率差 $\Delta = 0.3\%$,两端面经平面研磨。输入和输出端接单模光纤,端面间置有折射率匹配液。粗调过程与上述光纤-光纤的基本相同,由于在波导的两端各有一对耦合,最初的通光调整采用 He-Ne 激光易于判断,通光后将输入光改为近红外光。自动调芯采用质心法,1 次调芯过程包括 x 轴和 y 轴。每端各调芯两次,两端交叉进行,调芯时间累计不超过 8 min。调芯完毕后,输出端单模光纤改为多模光纤,重复上述调芯过程。由于多模光纤的芯径达 $50 \mu\text{m}$,可以近似认为多模光纤全部接收了单模条波导的输出功率。多模光纤与单模光纤的测量值的分贝差即为单模条波导与单模光纤的端面耦合损耗。表 2 列出了实验结果, 1310 nm 和 1550 nm 波长的自动调芯实验次数各为 7 次,耦合损耗平均值分别为 0.140 dB 和 0.109 dB ,标准误差分别为 0.0082 dB 和 0.0107 dB ,单次耦合损耗的最大值分别为 0.15 dB 和 0.12 dB 。表明该系统在实现高效率、

低损耗的光纤-波导自动对接方面是十分有效的。

Table 2 The experiment results of the fiber-SiO₂ waveguide-fiber system in the barycenter method at 1310 nm and 1550 nm wavelengths, respectively

No.	$\lambda=1310$ nm	$\lambda=1550$ nm
1	0.15	0.11
2	0.14	0.11
3	0.13	0.12
4	0.13	0.09
5	0.14	0.11
6	0.15	0.12
7	0.14	0.10
Average	0.140	0.109
Standard deviation σ_{n-1}	0.0082	0.0107

结论 对光波导端面耦合做了详细的理论分析,提出了两种适用于光波导高精度对接耦合的自动调芯方案,克服了常规调芯过程依赖于对微变信号精确测试的困难。在试制的自动调芯系统上,采用单模光纤作为标准波导做了自动调芯的验证实验。结果显示,在1310 nm和1550 nm波长上,采用第一种方案,耦合损耗平均值分别为0.074 dB和0.064 dB,标准误差分别为0.0115 dB和0.0078 dB;对于第二种方案,平均耦合损耗分别为0.075 dB和0.062 dB,标准误差分别为0.0099 dB和0.0066 dB。单次耦合的损耗均小于0.1 dB,自动调芯所需时间不超过2 min。进一步的实验在单模光纤-单模波导-单模光纤的对接耦合系统上进行,在1310 nm和1550 nm波长上,端面耦合损耗平均值分别为0.140 dB和0.109 dB,标准误差分别为0.0082 dB和0.0107 dB。

调芯时间累计不超过8 min,反映了自动调芯系统具有高效率低损耗对接的良好性能。

参 考 文 献

- 1 Takiguchi K, Kawanishi S, Takara H *et al.*. Dispersion slope equalizer for dispersion shifted fiber using a lattice-form programmable optical filter on a planar lightwave circuit. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9):1647~1655
- 2 Doerr C R, Joyner C H, Stulz L W *et al.*. Wavelength-division multiplexing cross connect in InP. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):117~119
- 3 Sun Z J, McGreer K A, Broughton J N. Demultiplexer with 120 channels and 0.29-nm channel spacing. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):90~92
- 4 Offrein B J, Bona G L, Horst F *et al.*. Wavelength tunable optical add-after-drop filter with flat passband for WDM networks. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2):239~241
- 5 Albert J, Bilodeau F, Johnson D C *et al.*. Low-loss planar lightwave circuit OADM with high isolation and no polarization dependence. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3):346~348
- 6 Kawano K. *Base and Application of Optical Coupling System*. Tokyo: Genndai Kougaku Co. Ltd., Chapter 3, 1991
- 7 Wu Baojian, Liu Gongqiang. Theory for magneto-optical couplings of magnetostatic waves and guided optical waves. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5):633~639 (in Chinese)
- 8 Yang Zhi'an, Yao Pei. Practice of optimization end-fire coupling in optical waveguide loss measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5):718~720 (in Chinese)
- 9 Okamoto K. *Theory of Optical Waveguides*. Tokyo: Corona Publishing Co. Ltd., 1992. 39~45