

# 光波导-光纤耦合对接自动化系统的研究\*

沙慧军<sup>1</sup> 陈抱雪<sup>1,\*\*</sup> 陈 林<sup>1</sup> 袁一方<sup>1</sup> 矾 守<sup>2</sup>

(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** 开发设计了三种适用于光波导自动对接耦合的调芯方案:半值法、质心法、遗传法. 完成了自动对接系统样机. 通过了两类波导-光纤自动端面对接的实测. 结果表明,该自动对接系统具有高效率低损耗对接的良好性能.

**关键词** 光波导;自动调芯;光纤;端面耦合;耦合损耗;遗传算法

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来,在光通信干线网和接入网中采用了很多光波导器件<sup>[1~6]</sup>. 光纤和波导器件连结封装的一个关键技术是波导与光纤的低损耗对接,要求低于 0.15 dB/端. 要达到这一指标,要求波导的模场分布尽可能与光纤的一致,同时要求波导与光纤的光轴对准准确度控制在 0.1 μm 以下. 采用手动操作十分困难,效率低、重复性差. 为了解决这个问题,本文依据波导端面耦合原理<sup>[7~11]</sup>,开发设计了三种调芯方法,研制了自动对接系统. 通过计算机对精密步进导轨的指令控制以及伺服过程,实现了调芯自动化. 实验测试表明,该自动对接系统具有高效率低损耗对接的良好性能.

## 1 波导-光纤端面耦合及其耦合效率

光通信系统中多为单模光纤和单模波导的对接,波导与光纤之间通常填满了折射率匹配的待固化粘结剂或匹配液,端面反射很小,可以忽略. 端面耦合效率理论上表现为模场分布的重叠积分,基模的出射光波可以用高斯光波描述<sup>[12]</sup>,经展开,波导与光纤的端面耦合效率  $\eta$  可表示为<sup>[8,9]</sup>

$$\eta = \eta_x \cdot \eta_y \quad (1a)$$

$$\eta_x = \frac{4 \exp \left[ -\frac{2(z_1 \theta + x_0)^2}{W_f^2(z_1)} \right]}{\pi W_f(z_1) (W_{w1} + W_{w2})} \{ [S_2 - S_1 + \sqrt{\pi} A_1 \cdot \exp(Q_1^2)]^2 + [T_2 - T_1 + \sqrt{\pi} B_1 \exp(Q_1^2)]^2 \} \quad (1b)$$

$$\eta_y = \frac{2}{\left[ \left( \frac{W_{fo}}{W_{wo}} + \frac{W_{wo}}{W_{fo}} \right)^2 + \left( \frac{2z_1}{k W_{fo} W_{wo}} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (1c)$$

$$W_f(z) = W_{fo} \sqrt{1 + \left( \frac{2z}{k W_{fo}^2} \right)^2} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  是光纤光轴和波导光轴的角度偏差,  $x_0$  是光纤和波导的模场峰值的位置偏差,  $z_1$  是光纤和波导的端面间距. 考虑到工艺因素导致波导模场分布的非对称性,用束腰  $W_{w1}$  和  $W_{w2}$  表征波导基模的非对称场分布. 出于解析方便,设 Y 方向上波导模的场分布对称,束腰为  $W_{wo}$ .  $W_{fo}$  是光纤模的束腰,  $k$  是光波在波导与光纤之间的介质中的波数,反映了匹配液的作用.  $S_1, S_2, T_1, T_2, Q_1$  是与参数  $W_{fo}, \theta, Z_1, x_0, W_{w1}$  和  $W_{w2}$  有关的复杂的多项式<sup>[7,8]</sup>. 耦合效率  $\eta$  随  $\theta, z_1$  和  $x_0$  的增大而减小,当  $\theta, Z_1$  和  $x_0$  为零,且波导的模场分布对称时,有最大耦合效率

$$\eta = \frac{4}{\left( \frac{W_{fo}}{W_{wo}} + \frac{W_{wo}}{W_{fo}} \right) \left( \frac{W_{fo}}{W_{wo}} + \frac{W_{wo}}{W_{fo}} \right)} \quad (3)$$

当波导与光纤的模场分布完全相等时,式(3)给出  $\eta = 100\%$ . 可见,对于给定的波导和光纤,要获得高的耦合效率,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. 这是设计研制自动调芯系统的基本理论依据.

## 2 系统结构

图 1 是自动调芯系统的结构框图,波导片被固定于中间的三维手动调整座上,左右两侧的六维调整台分别固定输入和输出光纤. 六维调整台的 X、Y、Z 轴和  $\theta_z$  转轴由步进电机驱动,另外两维手动操作. 驱动控制器通过 RS232 串行接口与计算机相连. 步进移动的最小移动量为 0.05 μm.  $\theta_z$  的灵敏度为 0.0045°,其它两轴的最小读数为 34". 显微观测系统包括两套直交布置的 CCD 显微镜及其微调架、监视器和照明冷光源. 光源可达到 ±0.005 dB/15 min 的短期稳定性和 ±0.05 dB/12 Hr 的长期稳定性. 光功率计的相对测量分辨率为 0.001 dB. 计算机指

\*教育部科技重点项目(2000ZD11)、上海市科技发展基金(041111040)和上海市教委重点学科建设基金资助

\*\* Tel:021-65682752 Email:bxchen@online.sh.cn

收稿日期:2004-09-30

令系统根据程序控制调芯操作,实时接受光功率信号,实时完成判别、记忆和反馈操作。

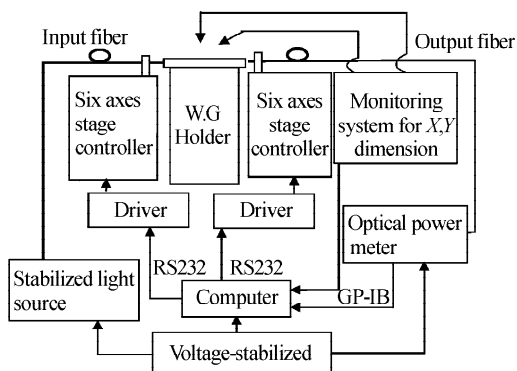


图1 系统结构

Fig. 1 Block diagram of auto-aligning system framework

### 3 调芯方案设计及流程

#### 3.1 对称模场分布波导-光纤的半值法调芯

大多数  $\text{SiO}_2$  单模波导有很高的品质,显示对称的模场分布.常规的调芯过程是通过扫描微波导光轴与光纤光轴的相对位置来获得尽可能大的耦合效率,其间还包括对轴平行度和端面间隔的微调.耦合效率分布曲线在理论上具有对称的高斯函数特征<sup>[8]</sup>,曲线的顶部范围比较平坦,功率变化很小,对系统的微小值判别要求很高,是技术难点.在分布曲线的左右两侧半值附近,曲线变化率最大,可有效利用系统的辨别率.为了避开微小值判别的困难,本文提出了半值法调芯方案,过程示于图2.此过程在 X 轴和 Y 轴上连续地交替进行,每个轴的累计扫描次数可以事先设定.

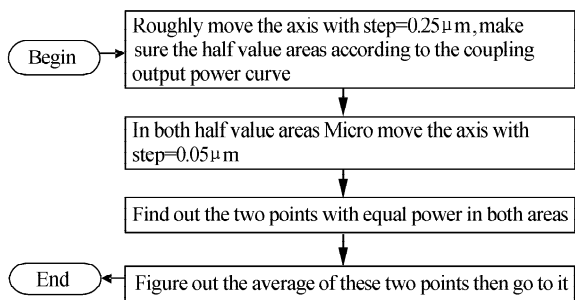


图2 半值法方案流程图

Fig. 2 The block diagram of the half value method

#### 3.2 非对称模场分布波导-光纤的质心法调芯

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不均匀等情况,在这种结构中导模的场分布不对称,与单模光纤耦合时的耦合效率分布曲线具有比较明显的非对称性.非对称性在靠近峰值附近有明显缓解,但峰值附近的调芯存在微小变值判别的困难.为此,本文提出了质心法调芯方案<sup>[8]</sup>.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.该方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,相当程度地缓解了了对微变信号精确测试的要求.方案的流程示于图3,同半值法一样,此过程在 X 轴和 Y 轴上连续地交替进行,并可事先设定各轴的扫描次数.

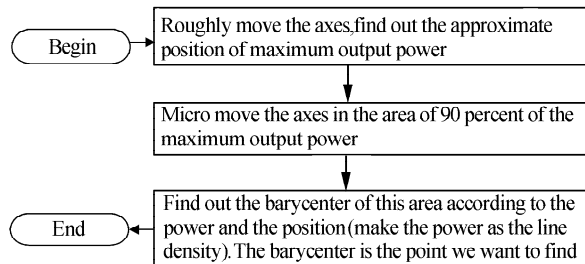


图3 质心法方案流程图

Fig. 3 The block diagram of the barycenter method

#### 3.3 基于遗传算法的波导-光纤的快速调芯法

3.1、3.2 两种方案是建立在光信号的反馈伺服基础上的,表现出很强的逻辑性.必须通过初调使得光纤-波导-光纤间实现通光,计算机与功率计间的反馈通道进入可运行状态时,自动调芯程序方能生效.初调通光仍然需要人工来完成,对操作人员的技术要求仍然很高,初调费时达数十分钟甚至更长.为了解决这个问题,近一步提高自动化程度,开发了新的自动调芯方法.该方法建立在遗传算法的理论上<sup>[13,14]</sup>,调芯要求的自动寻优过程不再是逻辑性很强的连续操作,代之以模仿自然界的遗传筛选的离散过程,每一代遗传都伴随着实现优化的更高概率,最后收敛于预期的目标.由于该方法对操作过程的局部逻辑性要求不高,空间各维的操作可并行进行,在光纤-波导-光纤间不通光的初始条件下就可启动自动过程,具有智能化的特征,大幅降低了对人工操作的依赖.

遗传法基因模型与实际调芯过程的映射关系表现为,遗传法中的个体概念描述实际调芯时波导与光纤光轴之间某个空间相对位置;种群概念反映了可考虑的所有空间相对位置的集合;染色体相当于空间坐标,该坐标经编码得到相应的基因串;每个码位相当于基因;耦合过程中测得的光功率值构成适应度函数.经过如此概念映射,自动调芯对耦合效率的寻优过程转化为遗传算法对个体适应度优化的过程.

根据操作实践,在显微监测下通过判断端面间匹配液珠的形状,完成轴平行和端面间距的调整是比较容易的.这样自动调芯涉及的空间维数通常是四维,分别是处于波导芯片两端的、用于调整光纤芯位置的 X 和 Y 轴.一般地,在显微操作下,波导与光纤光轴

间的初始偏差容易控制在  $200 \mu\text{m}$  之内, 由此确定每个轴参量的变化范围为  $[-200 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m}]$ . 轴参量  $a$  相当于染色体, 可以用  $m$  位二进制编码  $b$  表示

$$a = a_{\min} + \frac{b}{2^m - 1} (a_{\max} - a_{\min}) \quad (4)$$

式中  $a_{\max} = 200 \mu\text{m}$ 、 $a_{\min} = -200 \mu\text{m}$  分别为轴参量变化范围的上限和下限, 编码位数  $m$  与最小步长有关, 由于系统的 X、Y 轴的最小驱动步长为  $0.05 \mu\text{m}$ , 由  $(2^m - 1) \times 0.05 \mu\text{m} \geq (a_{\max} - a_{\min})$  确定  $m = 13$ . 四

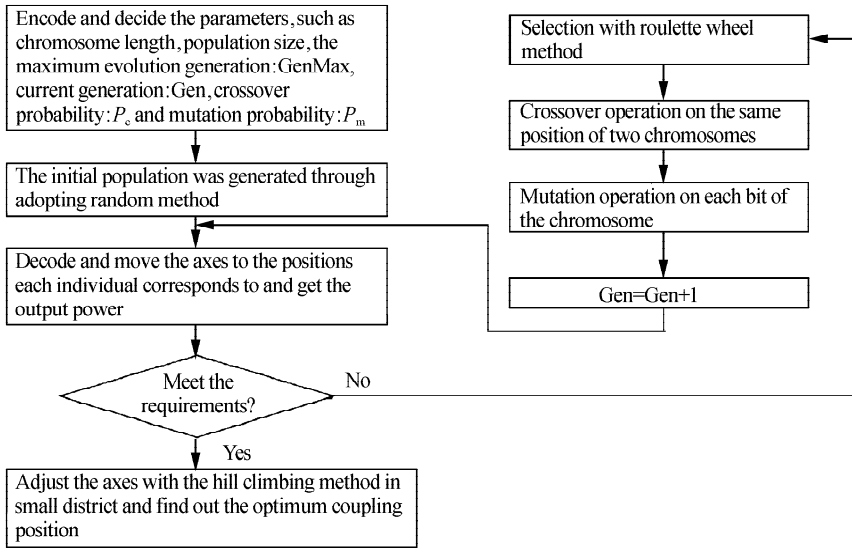


图 4 遗传法方案流程

Fig. 4 The block diagram of the method based on GA

## 4 实测和结果

在自动调芯前采用手动操作完成光轴的角度调整, 两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, 最小步长为  $0.05 \mu\text{m}$ , 通过监测匹配液的挤展状态可控制间隔在  $1 \mu\text{m}$  前后.

单模光纤的模场分布非常规范, 采用单模光纤间的耦合试验可排除波导自身质量带来的问题, 客观反映系统在硬件和软件两方面的性能. 按前述三种方案完成的自动调芯结果列于表 1. 每一种方案的实测次数均为 9 次, 完成一次自动调芯过程的时间在 2 min 以内. 1310 nm 和 1550 nm 波长上的单次耦合的损耗均小于 0.1 dB, 标准误差均小于 0.012 dB, 反映了系统软、硬件良好的自动调芯性能和效率.

维并行调芯的二进制串的总长  $4 \times 13 = 52$  构成个体长度, 可以覆盖整个寻优空间.

方案的对接流程示于图 4. 方案中采用根据父代适应度值自动调整的自适应交叉率和变异率方法. 到达最佳点附近时收敛速度变慢, 为了缩短调芯时间, 在插入损耗低于 2 dB 后, 采用基于邻域搜索技术的、沿着有可能改进解的质量的方向搜索的爬山法技术提高收敛效率.

表 1 光纤-光纤端面耦合调芯实测结果

No.	端面耦合损耗/dB					
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$			$\lambda = 1550 \text{ nm}$		
	遗传法	半值法	质心法	遗传法	半值法	质心法
1	0.089	0.078	0.082	0.079	0.072	0.068
2	0.085	0.082	0.082	0.085	0.072	0.072
3	0.088	0.082	0.078	0.071	0.068	0.058
4	0.079	0.082	0.078	0.076	0.058	0.058
5	0.085	0.078	0.078	0.081	0.056	0.058
6	0.088	0.074	0.082	0.069	0.058	0.064
7	0.089	0.082	0.078	0.073	0.064	0.064
8	0.091	0.057	0.061	0.065	0.052	0.051
9	0.095	0.052	0.055	0.067	0.072	0.068
平均耦合损耗	0.088	0.074	0.075	0.074	0.064	0.062
标准误差 $\sigma_{n-1}$	0.0042	0.0115	0.0099	0.0064	0.0078	0.0066

光纤-波导-光纤的自动调芯选用了日本 NHK 公司的  $\text{SiO}_2$  掩埋型单模条波导, 波导芯截面尺寸为  $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ , 相对折射率差  $\Delta = 0.3\%$ , 两端面经平面研磨, 光纤为平面研磨单模跳线. 此对接涉及波导芯片两端面的调芯, 调芯完毕后, 输出端单模光纤改

为多模光纤,重复调芯过程. 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端面耦合损耗. 遗传法和质心法的调芯结果列于表 2. 1310 nm 和 1550 nm 波长的自动调芯实测次数各为 7 次,调芯时间累计不超过 8 min. 1310 nm 和 1550 nm 波长的单次耦合损耗的最大值均不超过 0.15 dB,标准误差均小于 0.025 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. 两种方案相比,遗传法效率高,而质心法的对接准确度精确.

表 2 光波导-光纤端面耦合调芯实测结果

No.	端面耦合损耗/dB			
	$\lambda=1310\ \text{nm}$		$\lambda=1550\ \text{nm}$	
	遗传法	质心法	遗传法	质心法
1	0.15	0.14	0.14	0.13
2	0.12	0.12	0.10	0.11
3	0.15	0.13	0.12	0.06
4	0.13	0.10	0.13	0.07
5	0.13	0.10	0.14	0.11
6	0.15	0.13	0.14	0.12
7	0.14	0.09	0.10	0.10
平均耦合损耗	0.139	0.116	0.124	0.100
标准误差 $\sigma_{n-1}$	0.011	0.018	0.017	0.024

## 5 结论

提出了三种适用于光波导对接耦合的自动调芯方案,试制了自动对接系统. 波导-光纤自动端面对接实测结果表明,自动对接系统具有高效率低损耗对接的良好性能. 其中半值法和质心法克服了常规调芯过程依赖于对微变信号精确测试的困难,对接准确度高. 遗传法的显著特点是可实现并行操作以及在波导与光纤之间尚未通光的条件下即可启动自动过程,降低了对人工操作的依赖,提高了调芯效率.

## 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. *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. *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 赵发英, 张全, 唐海青. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合. 光子学报, 2003, **32**(2): 218~221  
Zhao F Y, Zhang Q, Tang H Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 218~221
- 7 龙彩华, 陈抱雪, 赵德欣, 等. 光波导端面耦合自动调芯仪研究. 半导体光电, 2002, **23** (5): 333~337  
Long C H, Chen B X, Zhao D X, *et al.* *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(5): 333~337
- 8 龙彩华, 陈抱雪, 沙慧军, 等. 光波导-光纤自动调芯系统研究. 光学学报, 2004, **24**(4): 442~447  
Long C H, Chen B X, Sha H J, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 442~447
- 9 陈抱雪, 龙彩华, 沙慧军. 波导-光纤自动对接的质心调芯法. 中国专利公报, 2003, **19**(52): 申请号: 03129249.6  
Chen B X, Long C H, Sha H J. *China Patent Communique*, 2003, **19** (52): Applying number: 03129249.6
- 10 刘洪举, 刘大伟. 集成光学条波导阵列与单模光纤阵列的联接. 光子学报, 1997, **26**(7): 1313~1317  
Liu H J, Liu D W. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(7): 1313~1317
- 11 戴道锌, 殷源. 弯曲波导之间的耦合分析. 光子学报, 2002, **31**(11): 631~634  
Dai D X, Yin Y. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 631~634
- 12 Okamoto K. Theory of Optical Waveguides. Tokyo: Corona Publishing Co., Ltd., 1992. 39~45
- 13 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 1~86  
Wang X P, Chao L M. Genetic Algorithms—Theory, Application and Software Realization. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 1~86
- 14 张文修, 梁怡. 遗传算法数学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. 10~84  
Zhang W X, Yee Leung. Mathematical Foundation of Genetic Algorithms. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000. 10~84

## Research of Fiber-waveguide Automatic Alignment Aystem

Sha Huijun<sup>1</sup>, Chen Baoxue<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>1</sup>, Yuan Yifang<sup>1</sup>, Iso Mamoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

<sup>2</sup> Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 184-8588

Received date: 2004-09-30

**Abstract** Three auto-aligning methods are designed, which are called the half value method, the barycenter one and the one based on genetic algorithm (GA), respectively. The auto-aligning system model is completed. Taking single mode fiber as standard waveguide, the experiment and the results show the average end-coupling losses are less than 0.1 dB, and the standard deviations are less than 0.012 dB at the wavelength 1310 nm and 1550 nm, respectively. This process only needs 2 minutes. When it comes to the experiment of fiber-SiO<sub>2</sub> waveguide, the results suggest the average end-coupling losses are not more than 0.15 dB, and the standard deviations are less than 0.025 dB at the wavelength 1310 nm and 1550 nm, respectively. The whole process is accomplished within 8 minutes. It shows that the methods and system have good performances.

**Keywords** Optical waveguide; Auto-aligning; Fiber; End-coupling; Coupling-loss; Genetic algorithm



**Sha Huijun** was born in Yangzhou, Jiangsu Province, 1979. Now he is working for his master's degree in College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest is in the fields of automatic alignment system and testing system used in optical communication.