

文章编号 1004-924X(2007)11-1649-07

# 基于中心积分法的 11 维集成光波导芯片封装系统

隋国荣<sup>1</sup>, 陈抱雪<sup>1</sup>, 周建忠<sup>1</sup>, 傅长松<sup>1</sup>, 矶 守<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光学与电子信息学院, 上海 200093;  
2. 日本东京农工大学 应用化学系, 日本 东京 184-8588)

**摘要:**研制了基于中心积分法的集成光波导芯片封装系统,该系统在空间 11 维上实现了光波导器件的位置调节,通过高精度对准和改进后的中心积分法快速准确地实现芯片对准。在单芯光纤-条波导-单芯光纤系统的封装测试实验中,端面耦合损耗的平均值为 0.113 6 dB,单次耦合损耗的最大值 $<0.13$  dB,标准偏差 $<0.02$  dB,单次耦合时间 $<2$  min。在单芯光纤阵列- $1\times 8$  波导分支耦合器-8 芯光纤阵列的封装生产中,各通道插入损耗均 $<10.5$  dB,均匀性指标 $<0.4$  dB,单次耦合时间 $<5$  min。数据证明,该系统已完全达到商业化标准,具有良好效果和实用性。

**关键词:**中心积分法;器件封装;光波导芯片;耦合损耗

中图分类号:TN256 文献标识码:A

## 11D integrated optic waveguide chip packaging system based on center-integration algorithm

SUI Guo-rong<sup>1</sup>, CHEN Bao-xue<sup>1</sup>, ZHOU Jian-zhong<sup>1</sup>, FU Chang-song<sup>1</sup>, ISO Mamoru<sup>2</sup>

(1. *College of Optics and Electron Information Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China;*  
2. *Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan*)

**Abstract:** A 11D integrated optic waveguide chip packaging system based on center-integration algorithm was designed and fabricated for adjusting the 11D positions of a waveguide in the space. The chip alignment can be realized quickly and precisely by the precision alignment and the improved center-integration algorithm. The packaging test among single-core fiber, channel waveguide and single-core fiber shows that the average of end-coupling loss is 0.113 6 dB, the maximum of single coupling loss is less than 0.13 dB, the standard deviation less than 0.02 dB, single coupling time less than 2 min and the whole packaging process time less than 5 min. The packaging produce among single-core fiber array,  $1\times 8$  splitter coupler and 8-core fiber array shows that insert loss of every channel is less than 10.5 dB, the homogeneity index less than 0.4 dB, the single coupling time less than 5 min and the whole packaging process time less than 7 min. It is validated that the system can reach the

收稿日期:2007-04-10;修订日期:2007-07-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60677023);上海市科学技术发展基金资助项目(No. 041111040)

commercial standard by the test data, which means that the system has good effect and practicability.

**Key words:** center-integration algorithm; device packaging; waveguide chip; coupling loss

## 1 引言

“将集成光学电路应用到光纤通信系统中最重要的问题之一就是光学纤维波导的耦合……”<sup>[1]</sup>。这种提法从 1975 年被提出至今已 30 年有余,而光纤通信技术也已经实现了从实验室研究到商业化的转型。随着光通信的发展,集成光器件的封装尤其是集成光波导芯片的封装成为众多行业关注的焦点。无论是骨干网、通信干线上的密集波分复用器(DWDM)还是光纤到户(FTTH)接入网技术中大量使用的光波导功分器(PLC Splitter),其基本结构都是将输入单芯光纤、相应的波导芯片和输出多芯光纤阵列进行高精度的耦合封装,然后进行紫外固化、老化等工序,最终装壳封装成为实际所需的集成光器件产品。仅以一个 8 路光波导功分器为例,其基本构造是单芯输入光纤-1×N 波导分支耦合器(AWG)-N 芯输出光纤阵列。长度为 10 mm 的 1×8 石英波导分支耦合器,其损耗一般在 10 dB 以内,PDL<0.15 dB。光纤阵列多采用石英基 V 形槽内排布光纤的工艺制备。由于 V 形槽的加工误差使一般 250 μm 商用高精度的光纤阵列的芯间距偏差半径<0.1 μm,精度在 0.5 μm 以内,而光波导的输出端直波导阵列的芯间距偏差约为 0.1 μm,与阵列相当。抛开由于制造工艺导致的器件本身损耗,发现输入/输出两端、多通道亚微米对准以及输出功率均匀性的控制至关重要,而以往的手动对准需要有经验的专业技师花费数小时才能完成,而且产品耦合效率不高、均匀性不宜控制,这成为产品规模化生产的巨大瓶颈。为了克服手动问题,国内外的公司和科研院所纷纷进行了深入研究,利用一些昂贵的高精度设备配合相应的算法制成自动对准设备实现自动对准耦合,以提高系统的封装效率,降低损耗。这些仪器和算法存在的问题有:空间可控制调整的自由度少、系统运行时间较长、对于均匀性问题处理效果不稳定、或者系统价格昂贵等,并不利于国内企业进行大规模的封装生产。因此,本文作者在总结现有进口封装仪器和国内一些研究的基础上,根

据输入端是单芯光纤,其沿自身模场中心的转动只影响封装的外观而不涉及耦合效率,设计制造了基于中心积分法的 11 维集成光波导芯片封装系统,在空间 11 维上实现自动调整,并在实际的封装生产中用较短的时间取得了很好的实用效果。

## 2 波导与光纤端面耦合的原理

光通信系统中通常遇到的是单模波导阵列和单模光纤阵列之间的对接,在对接端面,通过本征模之间的功率耦合实现载波传输。波导与光纤之间填满了对工作波长吸收小且折射率匹配的待固化粘结剂,端面反射接近-50 dB 可忽略,单芯端面耦合效率理论上是导模场分布间的重叠积分。如图 1 所示,设条波导的光轴沿 Z 方向,光纤光轴与条波导光轴间有一个角度偏差  $\theta$ ,两光轴心在垂直于 Z 轴方向上有偏差  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,光纤端面和波导端面沿 Z 轴方向的间距为  $\Delta z$ 。

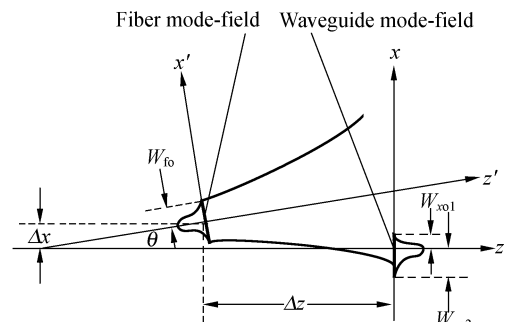


图 1 单模光纤和单模波导端面耦合模型

Fig. 1 End coupling model of single-mode fiber and single-mode waveguide

考虑到光波导制造工艺中一些不可预测的因素会导致波导模场分布的不对称,用  $W_{x0}$  和  $W_{y0}$  分别表示单模波导导模在  $x$  和  $y$  方位上的束腰,光纤模的束腰为  $W_{f0}$ 。单芯端面耦合效率  $\eta$  可表示为:

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

$$\eta_x = \frac{2 \exp \left[ -\frac{k^2 (W_{fo}^2 + W_{xo}^2) \theta^2}{2 \eta_{xo}(\Delta z)} - \frac{2}{\eta_{xo}(\Delta z)} \left( \frac{\Delta x^2}{W_{fo}^2} + \frac{(\Delta z \theta - \Delta x)^2}{W_{xo}^2} \right) \right]}{\sqrt{\eta_{xo}(\Delta z)}}, \quad (2)$$

$$\eta_y = \frac{2 \exp \left[ -\frac{2 \Delta y^2}{\eta_{yo}(\Delta z)} \left( \frac{1}{W_{fo}^2} + \frac{1}{W_{yo}^2} \right) \right]}{\sqrt{\eta_{yo}(\Delta z)}}, \quad (3)$$

式中:

$$\eta_{xo}(\Delta z) = \left( \frac{W_{xo}}{W_{fo}} + \frac{W_{fo}}{W_{xo}} \right)^2 + \left( \frac{2 \Delta z}{k W_{fo} W_{xo}} \right)^2, \quad (4)$$

$$\eta_{yo}(\Delta z) = \left( \frac{W_{yo}}{W_{fo}} + \frac{W_{fo}}{W_{yo}} \right)^2 + \left( \frac{2 \Delta z}{k W_{fo} W_{yo}} \right)^2, \quad (5)$$

其中,  $k$  是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,反映了粘结剂的介电影响。耦合效率  $\eta$  随  $\theta$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta z$  的减小而增大,当  $\theta$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta z$  为 0 时,有最大耦合效率:

$$\eta_{\max} = \frac{4}{\left( \frac{W_{fo}}{W_{xo}} + \frac{W_{xo}}{W_{fo}} \right) \left( \frac{W_{fo}}{W_{yo}} + \frac{W_{yo}}{W_{fo}} \right)}, \quad (6)$$

此时,若波导与光纤的模场分布完全相同,理论式(4)、(5)给出 100% 的端面耦合效率。因此,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。

在原理上,多通道列阵耦合是单芯耦合的推广,由于实际的波导列阵和光纤列阵在芯间距上不完全一致,无法使所有通道同时获得最高的理论耦合效率,因此,必须对两个指标的耦合结果进行权衡评价。一个是所有通道的插入损耗之和是否足够小,另一个是所有通道中插入损耗最大值与最小值之差是否足够小,后者被用来定义均匀性。由于分立器件自身的损耗是确定的,进入耦合对接流程时,影响插入损耗的因素主要是端面耦合损耗,端面耦合损耗用端面耦合效率的分贝值来表示。

列阵对准时能够实时监测所有通道的输出当然最好,但由于波导通道数随器件技术的发展不断增多,同时受封装系统成本的限制,对准系统一般不配备大量的光功率计,实际现状是采用如图 2 所示的双芯对准方法,1×8 波导分支耦合器与光纤列阵对接耦合时,取第 1 和第 8 路通道(亦可以是相隔一定距离的其它两路通道)的输出作为采样信号,其它通道的对接耦合靠分立器件各通道几何位置的精度来保证。对于 0.1 μm 位置精度的光波导列阵和 <0.5 μm 位置精度的光纤列

阵,采用双芯对准方法实用上没有障碍。

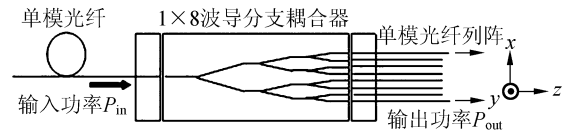


图 2 1×8 波导分支耦合器与光纤列阵的对接耦合  
Fig. 2 Alignment coupling of 1×8 splitter and fiber array

由于多芯列阵的端面有较大的长宽比,端面间隔的微调必须与端面平行度相关联,要求端面间近乎平行,否则由于边端碰撞导致微调不能进行。因此商用波导芯片或光纤列阵的光轴与其端面的垂直度偏差规定在 0.2° 以内,以保障波导光轴与光纤光轴之间的平行度可以通过调整两列阵端面之间的平行度来控制。出射端的端面间平行度和端面间距的调整涉及  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  和  $z$  三维,列阵双芯对接涉及  $x$ 、 $y$  和  $\theta_z$  三维。在入射端,由于单光纤的圆对称性, $\theta_z$  仅影响封装产品的外观。因此双芯自动对准涉及的空间维数为 11,分别是输入光纤芯位置的空间 5 维调整,和光纤列阵的空间 6 维调整。

### 3 中心积分算法及系统实现

现在市场已有相关的波导芯片的封装设备,如日本骏河、Moritex 公司以及美国的 NEW-PORT 公司和韩国一共四家公司,都制造出了可以投入生产实用的波导封装设备。以日本骏河公司为例,其列阵对准设备需要将近 30 万美元,且主要用于光波导功分器的自动封装,设备价格昂贵,维护不易,且均匀性的权重系数只是人为设定。在国内一些科研院所和本研究室也都曾经搭建过一些系统进行自动封装实验。这些产品和系统都各有特点,但主要存在的问题在于,进口设备价格昂贵,维护不易,软件由设备一起订制不可随意更改;而国内的实验系统仍存在可调节维数少,系统精度不高,算法耗时较长且均匀性控制不易等问题,还有待进一步研究和开发。

通过大量的理论研究、算法仿真和系统实验,

本文提出了利用中心积分算法,并结合一个均匀性优化函数实现自动调芯的系统。该系统具有精度高、耗时省且价格便宜容易维护的特点,由于软件全部是自主开发,所以软件的灵活性更大。

### 3.1 中心积分算法

从上面的理论分析可以看出,要实现光波导芯片的耦合封装,空间 11 维的亚微米级位置和角度调整非常重要。而对于空间中的三种位置变换,光纤和波导芯片的耦合效率分布曲线如图 3 所示,从理论上分别是一个对称和非对称的高斯分布场。所以二者在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标上的位置要求尽可能靠近或对准,这样就可以最大程度地减少耦合损耗。

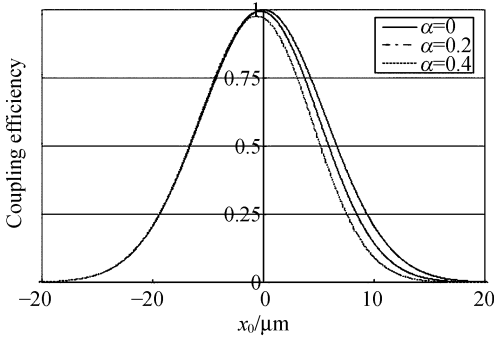


图 3 单模光纤与非对称单模条波导的耦合效率分布曲线。非对称因子  $\alpha$  定义为  $\alpha = 1 - (W_{x01} / W_{x02})$ 。

Fig. 3 Several different end-coupling efficiency curves between single mode fiber and asymmetrical waveguide. Define  $\alpha = 1 - (W_{x01} / W_{x02})$  as asymmetrical factor.

根据图 3 可知,耦合效率的峰值位置  $x_{max}$  可以由  $\partial\eta/\partial x_0 = 0$  算出。但实际封装实验得到的耦合效率曲线并不是光滑的,带有随机扰动和局部毛峰。主要原因是导轨误差和环境变动的的影响具有随机特征。采用常规判据的自动调芯容易陷入局部峰值,为此,提出了中心积分算法方案,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中心来确定峰值位置。设  $x_1$  和  $x_2$  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中心位置  $x_A$  由下式给出:

$$x_A = \frac{\int_{x_{01}}^{x_{02}} x_0 [\eta - \eta(x_{01})] dx_0}{\int_{x_{01}}^{x_{02}} [\eta - \eta(x_{01})] dx_0}, \quad (7)$$

$$\eta(x_{01}) = \eta(x_{02}). \quad (8)$$

图 4 显示了在实际运行中以  $x$  自由度为例的中心积分算法。

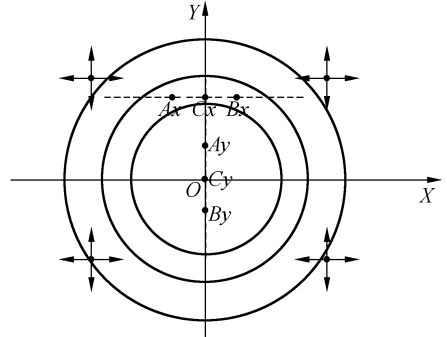


图 4 2 维中心积分算法

Fig. 4 Illustration of 2D center-integration algorithm

中心积分算法的核心是在对称的区域内利用积分的方法求取中心位置(功率最大值位置)。光纤和波导的模场并不相同,虽然相对中心而言,波导的模场分布并不对称,但是越靠近中心,其对称性必然越好。算法实现过程需首先判断方向,确定方向后,在选取相对对称的范围内进行中心积分,即可获得最大功率的位置参数。

在调芯过程中,从  $z$  轴上看,两个光轴之间距离靠近的程度取决于波导芯片的封装标准。因为两个光轴彼此越靠近,耦合效率越高,但是考虑到现有的显微系统无法观察到二者是否发生碰撞,所以并不无限靠近,而是以损耗优于封装标准为界限。对于角度则是用转动步长代替直线位置中的直线运动步长,其方法原理相同。整个自动对准过程无需人工干预。

### 3.2 均匀性优化函数

对于 8 路光波导功分器采用第 1 路和第 8 路两路输出进行测试时,由于前面所述的光波导阵列和光纤阵列存在芯间距偏差,所以通常很难两者同时做到最大,故存在如何控制均匀性的问题。为了很好地控制均匀性,本文通过理论分析建立了一个均匀性优化函数:

$$\delta = \frac{1}{|P_1 - P_2|^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{(P_1 + P_2)^{\frac{1}{8}}}}, \quad (9)$$

式中,  $P_1$  和  $P_2$  分别是两个采样通道的输出光功率, 它们与输入光功率的比值采用分贝表示时定义为插入损耗。将在运动过程中所记录的位置及相应数据代入适应度函数, 计算函数值。分别记录位置数据和函数修正值, 经平动和转动操作, 完成精密微调。上述过程由计算机控制自动完成。

## 4 系统构成及实验

### 4.1 系统构成

自动对准系统的对准部分结构如图 5 所示, 将光波导芯片固定于中间的光波导支架上, 左右两侧的精密 6 维调整架 (Surugaseiki 公司产品) 分别固定输入光纤列阵和输出光纤列阵。精密 6 维调整架的六个轴由步进电机驱动, 驱动控制器通过 GPIB 接口与计算机相连, 用软件编程进行控制。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  $0.05 \mu\text{m}$ 。  $\theta_x$  的精度为  $0.003^\circ$ ,  $\theta_y$  的精度为  $0.0032^\circ$ ,  $\theta_z$  的灵敏度为  $0.0025^\circ$ 。监测系统主要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。系统选用 Agilent 公司的 81654A 通信用光源和 81637A 探测用光功率计, 用 GPIB 接口与计算机连接。指令系统由计算机控制, 根据软件编程控制对准操作, 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。系统软件用 VB 语言编制, 采用 VB 串行通讯控件 (MScComm) 实现与驱动控制器的通讯, 与光功率计的通讯是通过调用厂家提供的库函数编程实现。

### 4.2 单芯光纤-条波导-单芯光纤端面耦合自动对准测试实验

与激光器和光纤的耦合不同, 波导芯片的封装是首先将激光通过光纤耦合进波导芯片, 然后再将波导芯片的出射光再次耦合进入光纤。整个过程中只用一个光源和一套功率计, 系统首先通过显微系统进行手动初调, 当很容易地使输出端获得十几个 nW 时 (左端激光器输入功率为 1 mW 左右), 用鼠标点击“自动对准”按键进行自动对准。

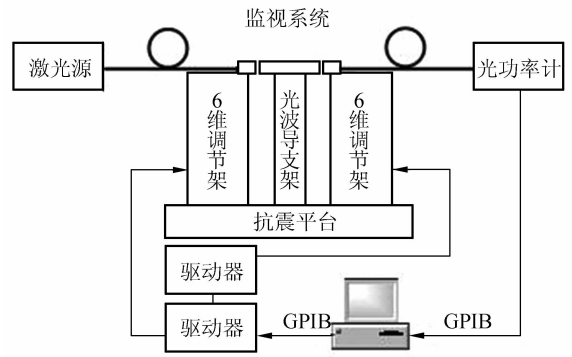


图 5 自动对准系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of automatic alignment system

在实际芯片封装时, 首先选择单芯光纤-条波导-单芯光纤进行自动对准、考察端面耦合损耗的实验, 可排除波导自身损耗带来的问题, 便于更客观地反映对准系统在硬软件两方面的性能。由于是单芯耦合, 均匀性指标被脱敏。光波导选用日本 NHK 公司石英基掩埋型单模条波导, 波导芯截面设计尺寸为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ , 相对折射率差为 0.3%, 两端面平面研磨。光纤为日本住友电工公司的平面研磨单模光纤。清洁干燥的光纤端面和波导端面间置有微量的折射率匹配液 (Moritex 公司产品), 有效抑制端面反射。初调在直交的  $x, y$  二维显微监视下进行, 采用鼠标操作,  $0.1 \mu\text{m}$  步进驱动, 将光纤和光波导的芯对准偏差控制在  $\pm 50 \mu\text{m}$  范围内, 波导端面和光纤端面的间距控制在  $4 \mu\text{m}$  之内。此时启动自动对准, 两端对准并行进行, 结束后记录输出功率, 完成一次对准费时  $\leq 2 \text{ min}$ 。完毕后, 输出端单模光纤改为多模光纤, 重复上述对准过程。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。自动对准实验次数为 7 次, 结果列于表 1。1 542.4 nm 波长上的耦合损耗平均值为 0.113 6 dB, 单次耦合损耗的最大值  $< 0.13 \text{ dB}$ , 标准偏差  $< 0.02 \text{ dB}$ 。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。

表 1 光纤-波导-光纤系统的端面耦合对准实验结果

Tab. 1 End coupling alignment experiment results of fiber-waveguide-fiber system

实测次数	端面耦合损耗 (dB)
1	0.108 8
2	0.080 4
3	0.125 7
4	0.125 6
5	0.127 2
6	0.129 7
7	0.097 9
端面平均耦合损耗	0.113 6
标准偏差 $\sigma_{n-1}$	0.018 7

#### 4.3 单芯光纤列阵-1×8 波导分支耦合器-8 芯光纤列阵封装

完成对准测试实验后,进行器件封装。选用日本 NHK 公司的石英基 1×8 分支耦合器,输入端的单芯光纤列阵和输出端的 8 芯光纤列阵,以及霓达光电器件公司产品。波导端面和光纤列阵端面经平面研磨,端面间置有待固化紫外粘结剂,波导和光纤列阵的芯间距公称值是 250  $\mu\text{m}$ 。在显微监视下完成初调后,启动双芯自动封装程序,

表 2 光纤列阵-1×8 波导分支耦合器-光纤列阵系统的自动对准结果

Tab. 2 Alignment results of fiber array-1×8 splitter-fiber array system

次 数	插入损耗(dB)					
	芯 1	芯 2	芯 3	芯 4	芯 5	芯 6
1	9.997 3	9.987 5	10.128 1	9.935 3	10.394 7	10.358 1
2	10.001 3	10.000 1	10.221 5	9.942 5	10.451 1	10.353 6
3	9.854 7	9.933 7	10.044 1	9.889 2	10.287 9	10.274 1
4	10.001 5	10.106 7	10.188 1	10.081 2	10.337 6	10.367 3
5	10.069 4	9.982 9	10.173 8	9.969 7	10.443 3	10.385 1
6	9.981 5	9.978 2	10.149 1	10.114 9	10.313 3	10.267 6
7	9.934 43	9.982 1	10.014 9	10.018 9	10.197 3	10.135 3
次 数	插入损耗(dB)					
	芯 7	芯 8	平均值	max-min		
1	10.119 1	10.304 1	10.153 03	0.306 8		
2	10.188 5	10.333 8	10.186 55	0.332 5		
3	10.057 1	10.244 5	10.073 16	0.389 8		
4	10.193 8	10.264 3	10.192 56	0.262 8		
5	10.136 2	10.453 1	10.201 69	0.383 7		
6	10.077 4	10.264	10.143 25	0.282 5		
7	9.986 1	10.118 7	10.048 47	0.184 27		

工作波长是 1 542.4 nm,采样信道是第 1 和第 8 通道。重复测试 7 次,单次时间均 $<5$  min。表 2 归纳了实测数据,各通道插入损耗均 $<10.5$  dB,均匀性指标 $<0.4$  dB。表明系统可以在短时间内实现低损耗列阵封装,重复性好,结果符合实用要求。

器件对准并达到商用指标后,采用光纤光缆引导紫外光对两端粘结剂同时进行固化照射,辐照时间为 40 s。卸下样品放入常压恒温箱,80°烘烤 4 h 牢化处理。然后装入空心金属盒后两端口胶封装,最后用塑封套壳完成产品。系统和产品照片如图 6 所示。

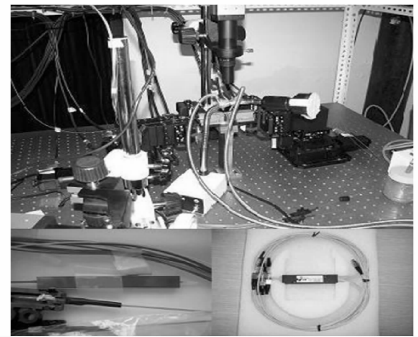


图 6 封装产品图

Fig. 6 Photo of product packaging

## 5 结 论

在波导端面耦合、波导列阵与光纤列阵对接耦合的理论分析基础上,实现了基于中心积分法的集成光波导芯片封装系统。该系统在空间 11 维上实现了光波导器件的位置调节,通过高效的算法和均匀性优化函数,快速并准确地实现了芯片的对准封装。在单芯光纤-条波导-单芯光纤系统的封装测试实验中,端面耦合损耗的平均值为 0.113 6 dB,单次耦合损耗的最大值 $<0.13$  dB,标准偏差 $<0.02$  dB。单次耦合时间 $<2$  min。在单芯光纤列阵-1×8 波导分支耦合器-8 芯光纤列阵的封装生产中,各通道插入损耗均 $<10.5$  dB,均匀性指标 $<0.4$  dB,单次耦合时间 $<5$  min。封装产品数据证明系统已完全达到商业化标准,显示了该系统具有良好的效果和实用性。

## 参考文献:

- [1] GUTTMANN J, KRUMPHOLZ O, PFEIFFER E. Optical fiber-stripline coupler[J]. *Appl. Opt.*, 1975, 14:1225-1227.
- [2] 孙麟治, 李鸣鸣, 程维明. 精密定位技术研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增):69-75.  
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):69-75. (in Chinese)
- [3] 淳静, 吴宇列, 戴一帆, 等. 模式搜索法在光纤有源自动对准中的应用[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):236-241.  
CHUN J, WU Y L, DAI Y F, *et al.*. Application of pattern search method to fiber-optic active alignment automation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):236-241. (in Chinese)
- [4] HARDY S. China weighs FTTH options[J]. *Lightwave*, 2005, 22(10):8-8.
- [5] AJI B, DHANAVANTRI C, PACHAURI J P, *et al.*. Silica-on-silicon based 1×N optical splitter: Design, fabrication and characterization[J]. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2005, 12(1):12-16.
- [6] GAMET J. Field matching Y-branch for low loss power splitter[J]. *Optics Communications*, 2005, 248(4/6):423-430.
- [7] MURPHY K, EDMOND J. Fiber-waveguide self alignment coupler; USA, US4639074[P].
- [8] GERMANN R, HORAK H, DAVID V. Self-aligned optical waveguide to optical fiber connection system; USA, US6819841[P].
- [9] 龙彩华, 陈抱雪, 沙慧军, 等. 光纤—波导自动对准系统的研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(4):442-447.  
LONG C H, CHEN B X, SHA H J, *et al.*. Study on fiber-waveguide automatic alignment system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4):442-447. (in Chinese)

**作者简介:**隋国荣(1974—),男,陕西宝鸡人,上海理工大学光学与电子信息学院工学博士,主要研究方向为集成光器件及封装技术、光电检测。E-mail: suigr@163.com

**导师简介:**陈抱雪(1955—),男,浙江上虞人,工学博士,上海理工大学光学与电子信息学院教授/博导,主要研究方向为光电子技术、集成光学。E-mail: bxchen@online.sh.cn