

用于无源光网络的平面光波回路光电集成器件

汪 钦^{1,2} 徐红春^{1,2} 胡广文^{1,2}

(¹ 武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074
² 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 简述用于无源光网络(PON)的平面光波回路(PLC)光电集成器件的3个关键技术,包括表面贴光子技术,半导体激光器(LD)、光电二极管探测器(PD)、光纤与波导的无源对准技术,非气密高可靠塑料封装。理论上分析了光纤与波导的耦合情况,通过仿真拟合曲线推断出了光纤与波导的 z 向偏移3 dB容差为70 μm ,角度偏移3 dB容差在 5° 以内。对样品进行了测试,高温下灵敏度为 (-30.7 ± 0.3) dBm,常温下为 (-31.3 ± 0.2) dBm,低温下为 (-31.2 ± 0.2) dBm,常温下光功率为 (2.0 ± 0.5) dBm,眼图清晰无干扰,结果表明PLC光电集成器件具有良好的稳定性能。

关键词 集成光学;光电集成器件;表面贴光子技术;光纤与波导耦合;无源对准

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.112301

Planar Lightwave Circuit Opto-Electronic Integrated Devices for Passive Optical Network

Wang Qin^{1,2} Xu Hongchun^{1,2} Hu Guangwen^{1,2}

(¹ Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China
² State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks,
 Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Three key technologies of planar lightwave circuit (PLC) opto-electronic integrated devices for passive optical network (PON) are introduced briefly, including surface mounted photonics, passive alignment of the laser diode (LD), photo diode (PD), fiber and waveguide, as well as non-hermetic and high reliable plastic packaging. The coupling of optical fiber and waveguide is analyzed in theory, thus through simulation fitting curves it infers that the 3 dB tolerance of z offset of the fiber and waveguide is 70 μm , and the 3 dB tolerance of angle offset is less than 5° . The results of sample test show that the sensitivity is (-30.7 ± 0.3) dBm in high temperature, (-31.3 ± 0.2) dBm in normal temperature, (-31.2 ± 0.2) dBm in low temperature. Optical power in normal temperature is (2.0 ± 0.5) dBm with clear eye diagram. The results show the PLC opto-electronic integrated device has good stable performance.

Key words integrated optics; opto-electronic integrated devices; surface mounted photonics; coupling of fiber and waveguide; passive alignment

OCIS codes 230.3120; 250.3140; 130.3120

1 引言

光纤到 X(FTTX)、自动交换光网络(ASON)以及光集成器件是当前光通信发展的3个重要方向。利用无源光网络(PON)技术实现宽带光纤接入,推动FTTX发展,同时对物理层核心光电器件提出新的需求,采用光集成技术的器件正是现在研究的热点。自1969年美国贝尔实验室的S. E. Miller提出“光集成”的概念^[1]至今,光集成器件的发展有了长足的进步。

光电集成分为光电混合集成与单片集成,目前光电混合集成技术已经有初步的成果^[2]。相比单片集成,混合集成可以实现相同功能但制作工艺更为简单,本文研究的用于PON的平面光波回路(PLC)光电集成器

收稿日期: 2012-06-01; 收到修改稿日期: 2012-07-01; 网络出版日期: 2012-09-10

基金项目: 国家863计划(2011AA010304)资助课题。

作者简介: 汪 钦(1988—),女,硕士研究生,主要从事光电器件方面的研究。E-mail: wangqin@wtd.com.cn

导师简介: 徐红春(1967—),男,硕士,高级工程师,主要从事光电器件方面的研究。E-mail: hchxu@wtd.com.cn

件采用光电混合集成技术,即各部分元器件[如半导体激光器(LD)、光电二极管探测器(PD)、滤光片等]采用各自工艺制作完成,再通过表面贴光子等技术“组合”在半导体衬底或光学晶体衬底的PLC平台上,然后将光纤与波导无源对准并粘接,最后注入密封胶将器件非气密塑料封装完成。

2 光纤与波导耦合的理论分析

光纤与波导的耦合采用V型槽对准,属于机械对准,所以V型槽设计的好坏、光纤的几何结构以及光纤和波导耦合情况,决定了该器件收发功率的大小。

考虑理想情况下,光纤的模场分布是高斯型,光波导的基模模场分布也是高斯型^[3,4],光波导与光纤的耦合效率表达式为

$$\eta = \left[\iint_{x,y \subset \Omega} \sqrt{W(x,y)F(x-t,y)} dx dy \right]^2, \quad (1)$$

式中 $F(x,y)$ 为光纤归一化远场分布, $W(x,y)$ 为波导归一化远场分布, t 为角度偏移量, Ω 为孔径角。

假设光纤模场分布为

$$F(x,y,\sigma_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (2)$$

式中 $\sigma_1 = \frac{\lambda}{2\pi w_1}$ 。

光波导基模模场分布采用高斯近似,可表示为

$$W(x,y,\sigma_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (3)$$

式中 $\sigma_2 = \frac{\lambda}{2\pi w_2}$ 。

将(2)、(3)式代入(1)式求得波导和光纤的耦合效率公式为

$$\eta = \left(\frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2 \exp\left[-\frac{2(\pi w_1 w_2 t)^2}{\lambda^2 (w_1^2 + w_2^2)}\right] \left\{ \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\sqrt{\alpha^2 - y^2}}^{\sqrt{\alpha^2 - y^2}} g\left[x - \frac{w_1^2 t}{w_1^2 + w_2^2}, y, \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2(w_1^2 + w_2^2)}}\right] dx dy \right\}^2, \quad (4)$$

(4)式表明影响耦合效率的3个因素分别是模式失配、光纤倾斜角和孔径角限制。(4)式中 α 为孔径角,假定光波导为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 矩形波导,腰斑半径 $w_2 = 3 \mu\text{m}$,光纤腰斑半径 $w_0 = 4.6 \mu\text{m}$ 。

当光束从光纤到波导,考虑到器件入射光的波长为 1490 nm ,光纤与波导距离很近,假设孔径角 α 为无穷大或 17° ,则(4)式中计算积分式取值为1,表明耦合效率主要受前两个因素影响。

若对准时光纤与波导距离太远,很明显会导致光耦合效率降低。不考虑角度偏移,令光纤与波导的距离为 z ,光束发生菲涅耳衍射,经过距离 z 后在波导端面与波导的模场发生耦合。将 $w_1 = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}$ 代入(4)式,计算得到 z 偏移与耦合效率的关系,如图1所示。

由图1可以看出,光纤与波导的距离越远,耦合效率越低,当 z 由0增大到 $70 \mu\text{m}$ 时,耦合效率从 84% 下降 3 dB , $z = 100 \mu\text{m}$ 时耦合效率只有 25% , $z = 200 \mu\text{m}$ 时耦合效率已不到 10% ,由此推断,光纤和波导的 z 向偏移距离最好控制在 $100 \mu\text{m}$ 以内。

在此基础上,如果光纤在与波导对准时发生角度偏移,对耦合效率有进一步的影响,如图2所示。当倾斜角度为 0 时,光的耦合效率最大,当光纤发生角度倾斜时就有耦合损失,当倾斜 5° 时,耦合效率几乎降低一半,所以要实现光纤和波导的耦合效率最大化,必须精确控制光纤倾斜的角度不能过大。

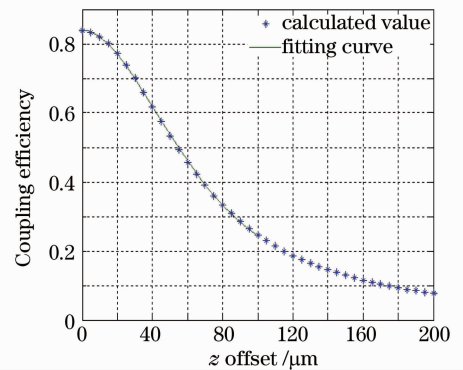


图1 z 偏移量与耦合效率的关系

Fig. 1 Relation of z offset and coupling efficiency

3 关键技术

3.1 表面贴光子技术

光电混合集成的平台需要实现两个功能:1)作为波导与光电器件的光基座,起到散热和光电器件的对准面的功能;2)起器件布线基板的功能,以确保其高速运行^[5]。随着 PLC 技术发展,早期开发石英-硅台面(STS)的 PLC 平台逐步演变,现在出现许多新方式的平台实现光电混合集成^[6,7]。

表面贴光子技术(SMP)技术可以减少组件数目并完全消除节点的气密性封装和简单组装的问题,方便与外部连接,不仅提高器件性能,还减少了设计、操作和材料的成本。SMP 技术通过降低复杂性,实现了光学元件封装中 3 个重要改进:1)高速无源组装,有效耦合多个芯片;2)消除气密封装;3)在芯片级上直接进行测试和老化^[7,9]。

SMP 可简化光路,图 3 是 SMP 的 LD、PD 和滤波片的光路示意图,图中 WDM TFF 指波分复用薄膜滤波片,AR 为抗反射薄膜。SMP 激光器的有源区是刻蚀的端面,不是通常的解理面,同时前端有集成的耦合器,使光波传入 PLC,但光功率不损失。滤波片也是体型结构,通过两侧焊点粘接在 PLC 上,探测器芯片的两电极共面,中间有旋转镜,使光传到芯片有源区。

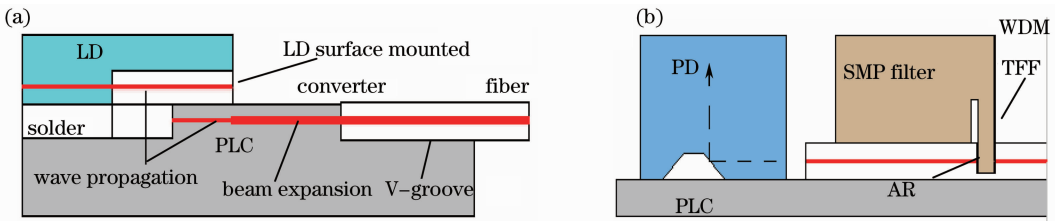


图 3 芯片的光路示意图。(a) LD; (b) PD 和滤波片

Fig. 3 A schematic view of chips light path. (a) LD; (b) PD and filter

表面贴光子元件散热性能好且可靠性高。SMP 激光器直接粘接到硅芯片上,硅芯片作为热沉将产生的热量传递到塑料封装外壳外,同时端面刻蚀获得更小谐振腔,在速度、温度和光功率性能优化上有更大的灵活性。SMP 组件可实现 $\pm 2 \mu\text{m}$ 容差对准,优于传统组件亚微米级的对准容差,在机械冲击振动、老化或温度循环中不影响组件对准。由于芯片埋在介质中不受环境强磁场作用,不易产生电偶腐蚀和性能退化,同时光通路被保护在芯片内也不易受环境影响。SMP 使组件可采用非气密封装,成本降低,可靠性提高,同时引线与外壳的连接点即是所有可能的失效点,不需要气密封装也便于判断和消除失效模式^[10]。

3.2 无源对准技术

无源对准技术是元器件在非工作状态下,通过某些标记对准的方式实现耦合封装。波导与 LD、PD 和光纤的对准均采用无源对准技术,其中光纤与波导的对准通过 V 型槽结构实现,如图 4 所示。

图中 W 为 V 槽表面宽度, $2r$ 为光纤直径($125 \mu\text{m}$), h 为光纤纤芯与硅表面的垂直距离,V 槽斜面角度 $\theta =$

54.74° ,由图中几何关系,得出 $0.5W \sin \theta \pm \cos \theta = r$,简化为 $W = r\sqrt{6} \mp h\sqrt{2}$ [其中减号对应图 4(a),加号对应图 4(b)]。当 r 一定时有 $\left| \frac{dh}{dW} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$,若 V 槽宽度经工艺优化到 $0.5 \mu\text{m}$ 误差,其结构偏差可控制在 $dh = 0.35 \mu\text{m}$ 以内。当 W 一定时, $\left| \frac{dh}{dr} \right| = \sqrt{3}$,单模光纤偏差 1%, dh 偏差 $1.155 \mu\text{m}$ ^[11]。只要 W 、 h 和 r 确定,单

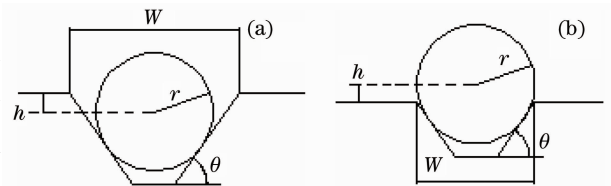


图 4 光纤 V 槽设计

Fig. 4 Fiber V-groove design

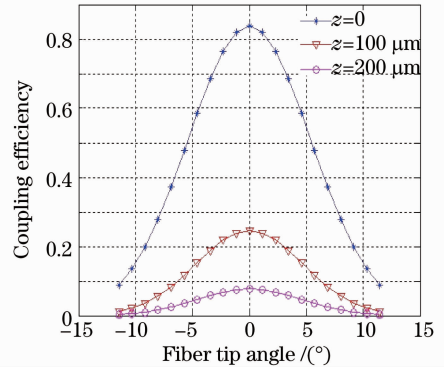


图 2 光纤角度偏移与耦合效率的关系

Fig. 2 Relation of fiber's angle offset and coupling efficiency

模光纤的位置就唯一确定,V槽几何参数的设计可用来控制光纤与波导的横向误差和纵向误差。

PLC波导与光器件的耦合效率由两个因素决定:1)光器件与PLC的模场失配导致的耦合效率下降以及PLC与器件表面 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 的空气间隙;2)因为定位不对准导致的耦合效率损失^[12]。所以,在无源对准中,精确的光半导体器件定位可以减少耦合效率损失。

PD与LD折射率标记对准是在红外光照射下由CCD监视器显示标记后,操作对准。芯片直接采用倒装技术^[13],先在P、N极共面的LD、PD芯片上制凸点再倒装、固化,粘到PLC相应位置,芯片与外部电路用微带线连接,有助于减少寄生电容与电阻,缩小封装体积,并能提高散热能力。芯片的粘接与对准由自动装贴片机来完成,精度高,可实现 $2\ \mu\text{m}$ 容差。

如图5(a)是激光器的对准示意图,LD芯片的四边均有对准标记(marker),PLC上也有对应的标记,根据标记可判断芯片的方向。在CCD监视器下按照标记对准使LD的有源区与波导对准,过程中不需加电测试光功率大小。贴片机自动操作,LD与PLC空隙小于 $2\ \mu\text{m}$,轴向精度可以控制在 $2\ \mu\text{m}$ 以内。

PD的放置有多种设计,如PD芯片边角收光,或PLC上切割 45° 斜角反射面使PD收光^[13],或在PD下方PLC刻出 45° 反射面的小槽^[15],其设计目的是使波导发出的光射入PD光接收区。PD与LD的对准方式类似,如图5(b)所示。PD的对准标记可以判断芯片有源区的位置。PD对准的精度要求没有LD高,轴向精度控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。

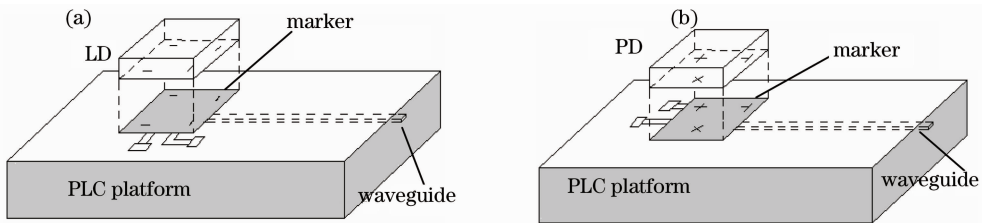


图5 芯片无源对准原理示意图。(a) LD对准;(b) PD对准

Fig. 5 Principle diagram of chips passive alignment. (a) LD alignment; (b) PD alignment

3.3 非气密封装技术

封装技术对于芯片来说非常重要,起着安放、固定、密封、保护芯片和增强导热性能的作用^[16],通过导线将芯片与外壳引脚相连,从而与印制电路板(PCB)和其它电路元件连接。

塑料封装成本低,电感小,抗潮且器件不受机械张力影响,采用热膨胀系数匹配的材料可减少热应力。PD、LD和滤光片周围均采用折射率匹配胶进行封闭和保护,并用导电胶将跨阻放大器(TIA)和PLC芯片粘接到PCB上进行金丝键合,同时波导与光纤采用折射率匹配胶粘接并用压块固定,最后在整个器件中注入密封胶、色素等掺杂物进行封装,封装后的示意图如图6所示。



图6 单纤双向器件的示意图

Fig. 6 A schematic view of diplexer

4 PLC单纤双向器件的测试与分析

一般来说,PON按其系统结构分为光线路终端(OLT)、光分配网络(ODN)和用户侧光网络单元(ONU)。OLT下行连续发射,上行突发接收,ONU与OLT工作方式相反,采用突发发射,连续接收。

该器件通过一系列工序完成,依次为:粘接LD、PD、滤光片等光芯片;粘接PLC芯片及TIA;金丝键合;芯片级测试及老化;光纤粘接与对准;器件密封;器件终测。分别测试和记录样品在高温($85\ ^\circ\text{C}$)、常温($25\ ^\circ\text{C}$)和低温($0\ ^\circ\text{C}$)下的光接收灵敏度,结果如表1所示。(测试条件:误码率 10^{-12} ,消光比 $10\ \text{dB}$; 2^7-1 伪随机码;激光器工作状态; $1.25\ \text{Gb/s}$ 速率)。

该器件要求常温下典型值为 $-30\ \text{dBm}$ (最大值 $-28\ \text{dBm}$),由表1看出,高温下样品灵敏度约为 $(-30.7\pm 0.3)\ \text{dBm}$,常温下约为 $(-31.3\pm 0.2)\ \text{dBm}$,低温下约为 $(-31.2\pm 0.2)\ \text{dBm}$,样品灵敏度均满足要求且无明显变化,说明器件性能良好。横向来看,样品在高温下与常温时的光灵敏度相差约 $0.7\ \text{dB}$,低温下与常温时相

表1 灵敏度测试结果

Table 1 Sensitivity test results

	High temperature (85 °C) /dBm	Normal temperature (25 °C) /dBm	Low temperature (0 °C) /dBm
Sample 1	-30.6	-31.2	-31.4
Sample 2	-30.6	-31.3	-31.2
Sample 3	-31.0	-31.2	-31.0
Sample 4	-30.7	-31.4	-31.3

差约0.2 dB,说明不同温度对器件灵敏度影响不大,器件性能稳定。

在常温(25 °C)、速率1.25 Gb/s条件下,测试样品的发射光功率并记录眼图,如图7所示,眼图清晰且均无干扰波,说明无噪声和码间干扰。从眼图上看,消光比约为14~15 dB,眼图张开度大,便于0,1判决,且眼图斜边的斜率不大,对系统的抖动不敏感。测试光功率结果: $P_1 = 2.04$ dBm, $P_2 = 1.93$ dBm, $P_3 = 2.05$ dBm, $P_4 = 1.98$ dBm。从结果来看,样品的激光器光功率在典型值2.0 dBm上下浮动约0.5 dB,激光器发射功率稳定,没有明显变化。

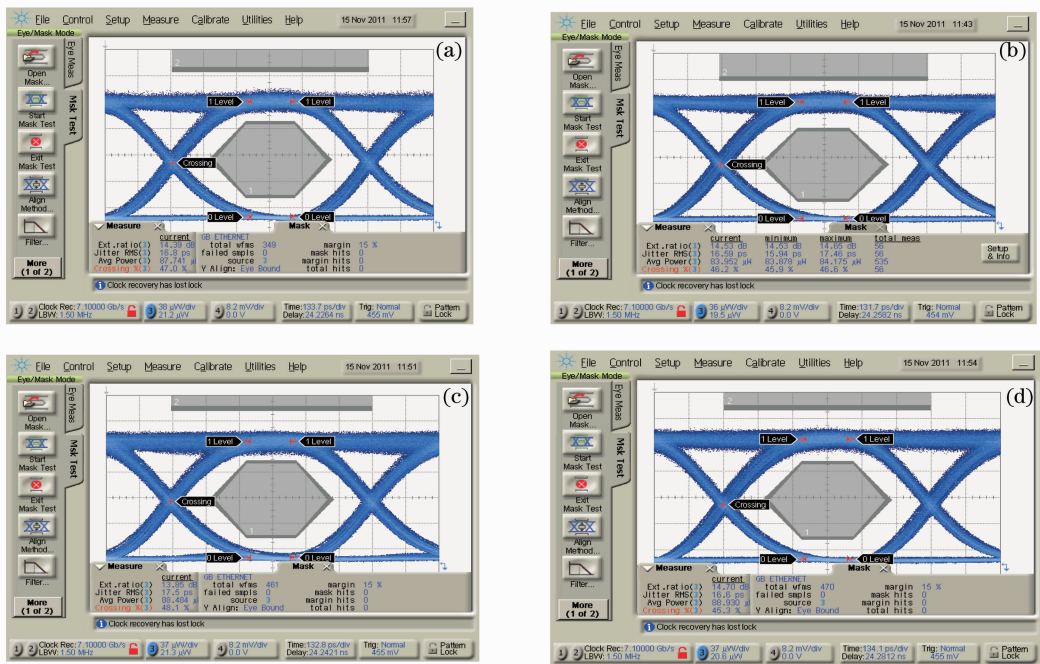


图7 样品测试眼图。(a)样品1;(b)样品2;(c)样品3;(d)样品4

Fig. 7 Eye diagrams of sample tested. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4

从以上测试结果来看,该用于PON的光电混合集成PLC BOSA在高低温下灵敏度及发射光功率变化小,眼图清晰,说明器件性能稳定。

5 结 论

通过采用给出的3个关键技术与相应工艺,可自动完成光电集成器件的制作,样品的测试结果表明,PLC光电集成器件总体性能优良。从传统分立元器件向PLC光电集成器件的过渡,代表了下一代光电器件的发展方向。在光通信器件领域里,基于PLC的光电混合集成技术可望在不久的将来得到广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 S. E. Miller. Integrated optics: an introduction [J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2059~2069
- 2 Hongchun Xu. The technology evolution of optical integration in the optical active devices[J]. *J. Materials Science and Engineering*, 2010, **4**(3): 80~84
- 3 Guo Fuyuan, Li Lianhuang, Wang Minghua. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar

- waveguide TE₀ mode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 235~239
- 郭福源, 李连煌, 王明华. 介质平面光波导 TE₀ 模模场分布的高斯近似[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 235~239
- 4 Yasuo Kokubun. Lightwave Engineering[M]. Wang Yougong Transl. Beijing: Science Press, 2002. 221~227
- 国分泰雄. 光波工程[M]. 王友功译. 北京: 科学出版社, 2002. 221~227
- 5 N. Grote, H. Venghaus. Fibre Optic Communication Devices[M]. Wang Jingshan, Shen Xinjie, Sun Wei Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 411~432
- N. Grote, H. Venghaus. 光纤通信器件[M]. 王景山, 沈欣捷, 孙玮译. 北京: 国防工业出版社, 2003. 411~432
- 6 Jung Woon Lim, Sung Hwan Hwang *et al.*. Low-cost hybrid WDM module integrated on planar lightwave circuit (PLC) with a coated WDM filter using passive alignment technique[C]. Proc. 57th ECTC 2007, 1959~1963
- 7 G. Roelkens, L. Liu *et al.*. Wafer bonding and heterogeneous integration; III-V/silicon photonics[C]. Proc. 14th ECIO 2008: 87~90
- 8 Xponent Introduces a New Way to Build Optical Components[EB/OL]. [2003-03-23] http://www.hoyaxponent.com/news/rel_030323.html
- 9 David W. Vernooy, Albert M. Benzoni, *et al.*. Surface mount photonics as a platform for optoelectronic packaging [J]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2003, (1): 370~371
- 10 Surface-mount photonics simplifies optical assembly [EB/OL]. [2004-06-01] <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-40/issue-6/optoelectronics-manufacturing/surface-mount-photonics-simplifies-optical-assembly.html>
- 11 Zhao Junliang, Xue Zhonghui, Guan Rongfeng *et al.*. Realization of SiOB packaging design and processing of laser transmitter and receiver[J]. *J. Henan University (Natural Science)*, 2006, **36**(6): 29~33
- 赵军良, 薛中会, 关荣锋等. 激光收发器件硅基平台封装设计与工艺实现[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2006, **36**(6): 29~33
- 12 Gohji Nakagawa, Tsuyoshi Yamamoto *et al.*. High power and high sensitivity planar lightwave circuit module incorporating a novel passive alignment method[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1): 66~72
- 13 Li Xiaoxuan, Wang Tingyue, Yu Shenglin *et al.*. A study on flip chip bonding technology [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2008, **24**(5): 28~33
- 李孝轩, 王听岳, 禹胜林等. 倒装焊技术探索[J]. *电子机械工程*, 2008, **24**(5): 28~33
- 14 Yu Kurata, Yusuke Nasu, Munehisa Tamura *et al.*. Heterogeneous integration of high-speed InP PDs on silica-based planar lightwave circuit platform [C]. Proc. 37th Optical Communication (ECOC), 2011. 1~3
- 15 Takara Sugimoto, Takanori Shimizu *et al.*. A small and low cost bidirectional transceiver module with polymer waveguide for G-PON/GE-PON[C]. Proc. 57th ECTC 2007. 707~711
- 16 Yao Qinze. Semiconductor device packaging technology[J]. *ShangQin*, 2010, **21**: 92~93
- 姚勤泽. 半导体器件封装技术[J]. *商情*, 2010, **21**: 92~93