

# 光背板互连技术研究进展

邓传鲁, 王廷云, 庞拂飞, 宋志强, 王建辉, 陈佳敏, 严新捷

上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200093

**摘要** 光背板互连技术是近年来通信领域的研究热点, 以高传输带宽、低损耗、低成本、无电磁干扰等优势具有广阔的应用前景。本文介绍互连光波导的结构模型及光背板的制备方法, 综述近年来光背板相关的传输特性、耦合方式、应用系统研究等关键技术的重要进展, 展望了对光背板互连技术的发展方向。

**关键词** 光背板; 光互连; 粗糙度; 传输特性; 光连接器

随着云计算、大数据、物联网的蓬勃发展, 数据通信带宽呈现爆炸式地增长, 传统电互连技术逐渐无法满足高带宽(如 50 Gbit/s<sup>[1]</sup>)信息互连需求, 人们更加关注超高速数据互连技术——光互连技术<sup>[2-5]</sup>。

相对于电互连技术, 光互连技术在高带宽、色散、能耗、串扰、电磁干扰(EMI)等方面具有无可比拟的优势, 作为未来数据通信的核心技术, 光互连技术将被广泛应用于宽带通信<sup>[3]</sup>、超级计算机<sup>[4]</sup>、大数据中心<sup>[5]</sup>等领域。

从广义上讲, 基于光信号传输信息的技术即可以称为光互连技术, 现已得到大规模的应用, 根据 IBM 统计预测的光

互连技术趋势发展(图 1)<sup>[6]</sup>, 可见现阶段光互连技术已经发展到了子板间和板卡内光互连阶段, 即光背板互连技术。所谓光背板互连技术, 就是在普通 PCB 上制备一层光波导层(图 2(a)), 或者在 PCB 中将光波导作为一个夹层嵌入(图 2(b)), 以此实现光信号的高带宽传输功能。

近年来, 光背板技术受到国内外科研机构和产业界的极大重视, 发展极为迅速。本文对近年来国内外光背板互连技术的发展进行综述, 从光背板的传输特性、耦合连接、演示系统等关键技术角度展开论述, 分析技术的发展脉络, 探讨技术的优缺点, 并对未来技术的发展方向进行展望。

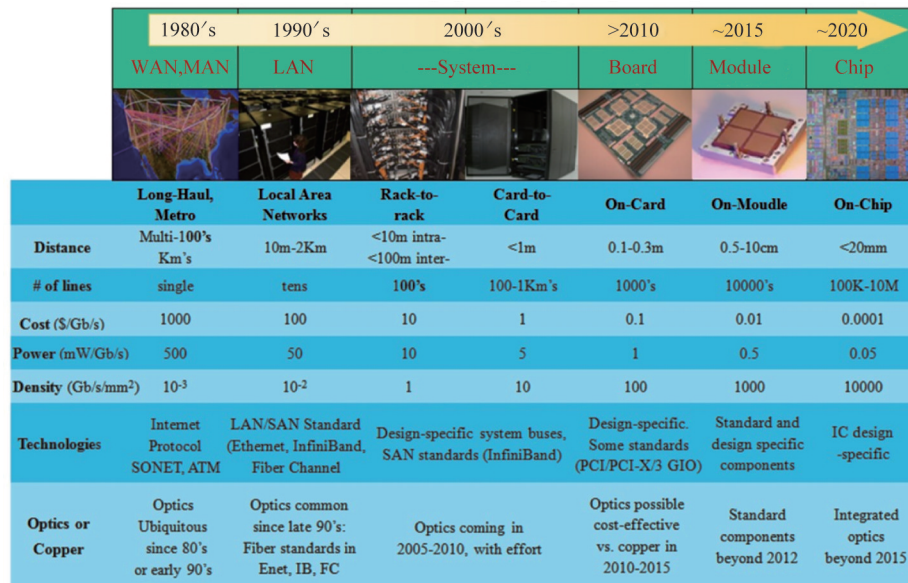


图 1 光互连应用发展趋势

Fig. 1 Application development trend of optical interconnection

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 上海市科技成果转化与产业化项目(16511104300)

作者简介: 邓传鲁, 博士研究生, 研究方向为互连光波导的制备技术, 电子信箱: chuanludeng@163.com; 王廷云(通信作者), 教授, 研究方向为光纤传感及特种光纤, 电子信箱: tywang@shu.edu.cn

引用格式: 邓传鲁, 王廷云, 庞拂飞, 等. 光背板互连技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 90-98; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.010

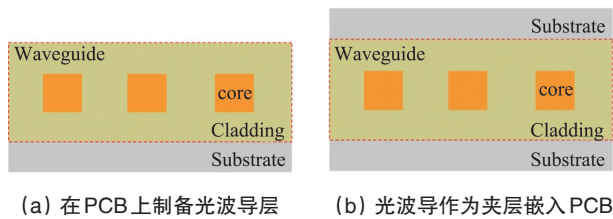


图2 光背板结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of optical printed circuit boards

## 1 矩形光波导结构模型及光背板制备方法

### 1.1 矩形光波导结构模型

光背板通常采用多模矩形光波导结构,分析矩形光波导传输特性一般从模式理论入手。图3为矩形光波导(宽为 $a$ ,高为 $b$ )横截面结构示意图,芯层折射率大于包层折射率( $n_1 > n_2, n_3, n_4, n_5$ ),这种结构可约束光波在芯层内以导波模式(记作 $E_{pq}^x$ 和 $E_{pq}^y$ 混合模式)的形式沿光波导传输, $E_{pq}^x$ 模式其场分量主要沿 $x$ 方向, $E_{pq}^y$ 模式其场分量主要沿 $y$ 方向, $p, q$ 分别表示 $x$ 方向和 $y$ 方向的导模序号,求解模式解的方法通常有马卡梯里法和等效折射率法<sup>[7-9]</sup>。

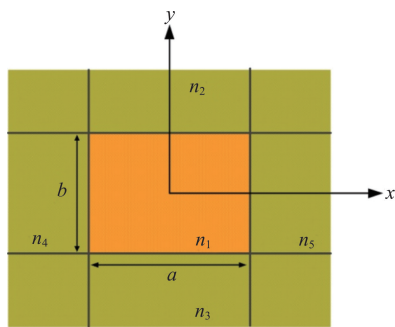


图3 矩形光波导横截面示意

Fig. 3 Schematic diagram of rectangular waveguides structure

### 1.2 光波导材料

目前,光背板制备采用的材料主要包括聚合物材料<sup>[10-12]</sup>和玻璃材料<sup>[13-14]</sup>。聚合物材料的主要优点是加工工艺简单、对衬底选择性低、机械性能好、器件轻巧<sup>[15-16]</sup>,在850 nm波段固有损耗较低,主要缺点是在1310/1550 nm波段其固有损耗非常高<sup>[10]</sup>,因此不能兼容常规的1310/1550 nm波段光器件。玻璃材料的优点是在常用波段1310/1550 nm的固有损耗非常低,可与市场化的光器件兼容,缺点是受外界应力影响较大、易折易脆、很容易损坏,因此,很难制备成大尺寸光波导板。

从工艺兼容性考虑,光互连波导多采用聚合物材料,根据其化学成分主要划分为<sup>[10, 17-21]</sup>:聚甲基丙烯酸酯(PMMA)及其衍生出来的氟化物和氟化物、耐高温的氟代聚酰亚胺、含氟聚芳醚和聚芳硫醚、苯丙环丁烯(BCB)、聚硅烷、聚硅氧烷、

聚碳酸酯等,一些聚合物在850 nm波段固有损耗大多 $\leq 0.05$  dB/cm<sup>[10]</sup>。为了拓展聚合物在1310/1550 nm波段的应用,日本朝日玻璃有限公司发展了一种光敏性的氟化聚合物光波导<sup>[22]</sup>,在1310 nm波段的固有损耗为0.13 dB/cm,在1550 nm波段的固有损耗为0.22 dB/cm,有望在光背板互连领域获得广泛应用。

对于玻璃材料光背板,欧洲PhoxTrot项目团队于2015年报道了一种基于玻璃材料的集成光电背板,并成功开发了一套可插拔连接器<sup>[14]</sup>,这表明玻璃材料光背板在一定的条件下具有制备的可行性,若能克服易折易脆的缺点,将来能够拓宽其应用空间。

### 1.3 光背板制备方法

针对聚合物光波导,制备方法主要有离子刻蚀法<sup>[23]</sup>、热模压印法<sup>[24-25]</sup>、光刻法<sup>[26]</sup>、光漂白法<sup>[27-28]</sup>、刮刀法<sup>[29]</sup>、激光刻蚀法<sup>[23-30]</sup>和3D打印法<sup>[31]</sup>等。

离子刻蚀法采用低温等离子体,在物理溅射轰击和化学反应双重作用下,蚀刻基片获得精细三维结构,一般来说,蚀刻过程要经过活性粒子扩散、化学吸附、反应、生成物解吸和生成物扩散脱离固体表面等几个步骤,其蚀刻工艺比较复杂。热模压印法是利用金属压印模具压入光包层材料中,以此制作波导芯层槽,再将芯层材料注入芯层槽中,最后涂覆包层材料,这种方法虽然工艺流程简单,但制作的光波导插入损耗比较大。光刻法主要是利用芯层材料的光敏特性,经紫外光曝光后,再通过显影流程将未曝光的芯层材料去除,形成相应的波导形貌,该方法对光波导胶涂覆均匀性要求较高。光漂白法也是利用材料的光敏特性,曝光部分和未曝光部分具不同的折射率,因此形成光波导结构。刮刀法是波导制备的一种新的方法,适用于大面积的波导制备,核心步骤主要是用有机玻璃刀片刮涂芯层填充到包层凹槽中,刮刀法制备流程主要有:模具制作、填充芯层材料、用刮刀刮平芯层材料、上下包层制备。刮刀法需要精心制备模具,制备流程比较繁琐。激光刻蚀法主要是利用激光在光波导包层材料中刻蚀芯层凹槽,再填充芯层材料形成光波导。3D打印法主要利用3D打印机依照预设获得波导形貌的图案程序在基板上喷“墨”制备的,但往往由于波导材料的黏度太大导致制备的光波导样品形貌周期性的凹凸起伏,严重影响光传输,但能够大大节约光波导胶,若能够克服此弊端,有可能是未来波导制备的主要方法之一。

光刻法、刮刀法和激光刻蚀法是目前波导制备常用的方法,图4给出了此3种方法制备的简易流程。

## 2 光背板互连技术发展

### 2.1 主要研究机构与研究项目

近年来,光背板互连技术研究主要集中在欧美、日本的光通信、网络设备、计算机等研发企业,如表1所示,一些典型的开发项目<sup>[6, 14]</sup>包括:1) 2009年IBM公司光印刷背板的超级计算机项目,拟实现在子板与背板互连中应用光背板互连技

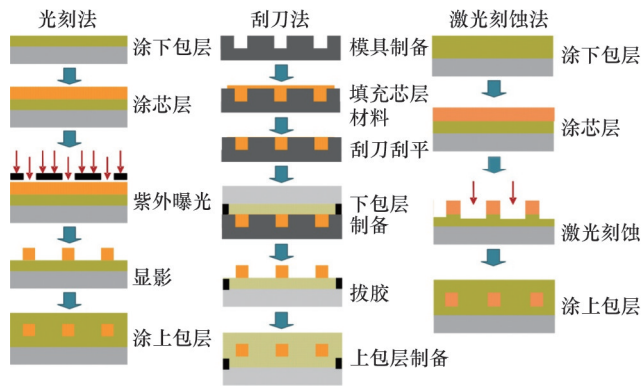


图4 光波导制备流程

Fig. 4 Fabrication process of optical waveguide

表1 主要研究机构与研究项目

Table 1 Major research institutions and research projects

研发项目	参加单位
EOBC-OptoFoil	University of Ulm, Fraunhofer Institute, Daimler-Chrysler, Siemens
Truemode™	Terahertz-UK
PolyGuide	Dupont, HP
OptoBump	NTT, Japan
TOPCat	NIST, 3M, Goodyear
JIEP	Japan
Electrical-Optical Circuit Board	UK
Terabus Program	IBM, Agilent
PhoxTrot	Fraunhofer IZM, 21 partners

术;2) 2007年英国工程和自然科学研究委员会(EPSC)光印刷背板项目, Xyratex、BAE、Renishaw等8家企业与伦敦大学学院、赫瑞·瓦特大学等大学联合开发, 实现了基于光背板互连技术的10 Gbps传输系统;3) 2012年欧盟提出“Phox-Trot”光背板互连技术项目, 联合了Finisar等19家相关企业, 其总体目标是利用先进光互连技术使大数据中心、超算、

宽带通信等领域降低成本、能耗降低50%、数据互连能力提升一倍, 技术点涵盖有源光缆技术、光背板互连技术、芯片内互连技术。

## 2.2 光布线研究

光子集成是光背板互连技术的发展方向之一, 这就要求在光背板上优化设计交叉、分束、弯曲等各类形状的光波导, 从而实现传输、分波、耦合等不同功能。

交叉波导俗称X形波导(图5), 在PCB上优化设计X形波导可以克服电布线交叉短路的问题, 提高在PCB上布线的灵活性。罗风光等研究了单模结构交叉光波导的传输特性, 而光背板大多是基于多模光波导结构, 在传输特性上具有较大的差别<sup>[32]</sup>; Ni等则分析了多模交叉光波导的传输特性<sup>[33]</sup>, 但理论模型较为简单, 仅给出了特定参数下的理论仿真结果, 未涉及到波导模式的影响<sup>[34]</sup>; 夏倩<sup>[35]</sup>等进一步分析了波导模式的具体影响, 研究发现交叉度越小, 对模式传输特性的影响就越大, 当交叉角度( $\theta$ )取为 $5^\circ$ 时,  $E_{1-4,q}^x$  ( $q=1,2,3,4$ )4类模式的传输光功率分别为99.0%、95.8%、91.5%、84.3%。



图5 X形波导

Fig. 5 Diagram of X-shape waveguide

Y形波导是一种常用的波导器件, 根据Y形波导不同的结构设计, 可以用于分束器、合波器、耦合器、调制器等。分束比是Y形波导分束器的重要性能参数, 为减小分支损耗, 设计中可以利用抛物线型或指数型锥形过渡波导代替矩形过渡波导, 所引入的锥形过渡波导, 不仅可以减小过渡波导的长度, 还可进一步减小分支损耗。比利时根特大学David Israel理论设计了3种不同结构的聚合物Y形波导<sup>[36]</sup>, 并分析了他们的传输性能, 理论和实验表明, 图6(b)设计的分束器损耗低于图6(a)和图6(c)。英国剑桥大学Nikolaos Bamiedakis, 首次提出了一种基于聚合物光波导可扩展的多通道光再生总线结构(图6(d))<sup>[37]</sup>, 这种结构克服了光学总线拓扑结构固有的局限性, 带宽为10 Gbit/s的传输实验表明了其插入损耗低于-13 dB, 串扰低于-29 dB, 误码率小于 $10^{-12}$ 。

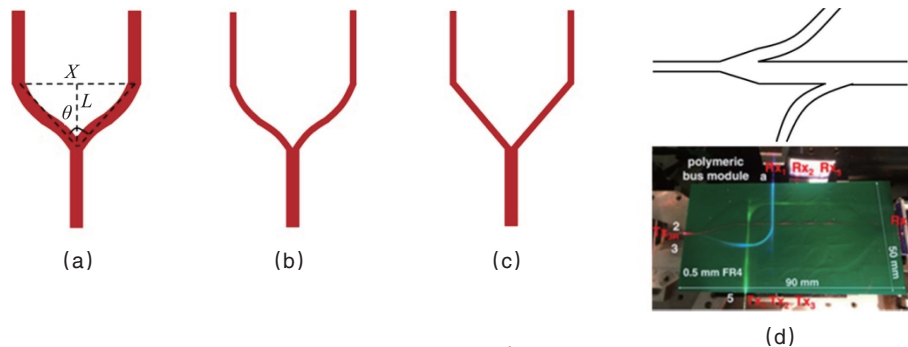


图6 Y形波导

Fig. 6 Diagram of Y-shape waveguide

### 2.3 传输损耗

降低光波导的传输损耗是光背板互连技术应用的关键技术之一,以 IBM 在光背板互连技术的发展为例,为了提升光背板互连性能,IBM 一直不遗余力地优化降低互连光波导的传输损耗<sup>[1,38-40]</sup>,如表 2 所示。

表 2 IBM 光背板传输损耗进展  
Table 2 Development of transmission loss on OPCBs for IBM

年份	尺寸/cm	传输损耗/(dB·cm <sup>-1</sup> )	波长/nm
2006	30	0.16	850
2008	100(螺旋)	<0.05	850
2010	30	0.05	850
2013	40(软波导)	0.046	850

影响光波导传输特性主要因素有:材料固有损耗、波导制备中引入的缺陷、表面粗糙度引起的散射损耗,其中粗糙度造成的散射损耗是一种重要因素。在光波导制备中,表面粗糙度的大小很大程度上决定了光波导的传输损耗,对整个光互连系统性能带来较大影响,除了优化光波导制备工艺来降低表面粗糙度外,还可以采用后处理的方法降低光波导表面粗糙度,如热回流技术(thermal reflow)在降低光波导表面粗糙度方面非常有效。密歇根大学的 Chung-Yen Chao 采用热回流技术降低聚合物微环波导器件的表面粗糙度可达 35~40 nm,其相应的传输损耗则降低了 74 dB/cm,经过回流处理后波导表面变得非常光滑<sup>[41]</sup>。美国麻省理工学院 Juejun Hu 提出了一种动力学模型来定量地解释侧壁粗糙度的演化过程,其粗糙度演化模型的理论计算结果与实验结果符合很好,经过热回流处理后的波导样品如图 7 所示,其光传输损耗可降低 50%<sup>[42]</sup>。

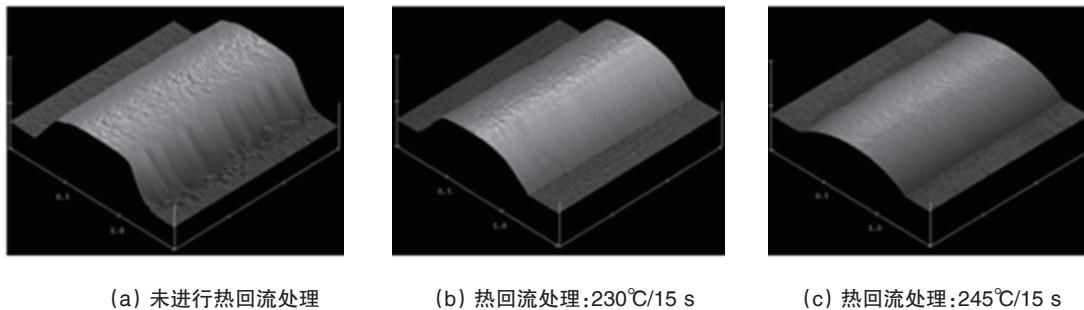


图 7 热回流技术降低粗糙度

Fig. 7 Reducing roughness by thermal reflow

### 2.4 光耦合连接

光器件与光背板上的互连光波导耦合是决定互连性能的重要技术。根据耦合方式不同,可以分为平行耦合和垂直耦合。目前光背板互连系统中,相当大部分的光损耗是由光耦合元件引入的,因此如何实现从光电器件到光波导高效光耦合成为急需解决的问题。

#### 2.4.1 平行耦合

Xyratex 公司<sup>[43]</sup>提出了一种在光收发器和 OPCB 之间置入对偶几何透镜的光耦合结构,光背板中切割的定位方槽能够精确地卡接一个与标准 MT 接口兼容的透镜阵列模块,为了确保透镜阵列精确的安置在插座上,插座开有两个 MT 针槽,其尺寸匹配微透镜阵列的导位孔,如图 8(a)所示。透镜阵列用低收缩率的 UV 胶固定在插座内,图 8(b)显示了封装好的光收发器-对偶几何透镜-OPCB 耦合装置及其光耦合示意。

IBM<sup>[44]</sup>开发了一种用于平行耦合的 12 路 MT 适配器,如图 9 所示,适配器的导位孔插有导针,适配器位置精确调节后,被机械固定在刻有凹槽的波导端面,适配器导针正好匹配商用的标准 MT 跳线定位孔,光纤端面与光波导轴线偏差仅有 4 μm,耦合效果良好。HP 公司<sup>[45]</sup>也开发了一种用于光背板的

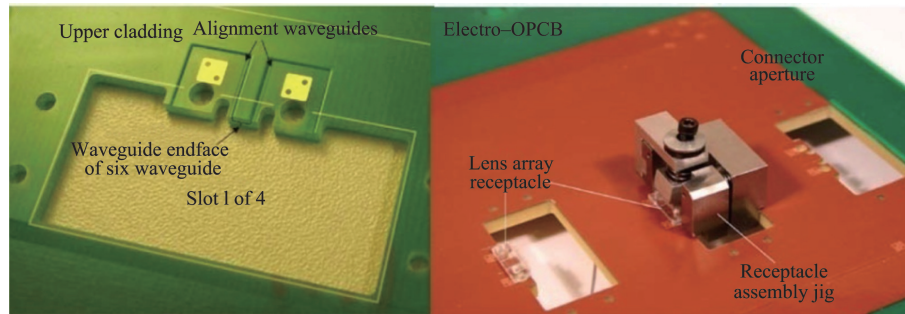
平行耦合连接器,定位和固定靠固化在背板凹槽中的两个导针,如图 10 所示,这也是目前比较常用的一种平行连接的方法。上海大学贾娜娜<sup>[46]</sup>等提出了一种光纤嵌入到光波导凹槽实现平行耦合的方法,如图 11 所示,深入讨论了利用准分子激光器制备波导凹槽的加工工艺,并实验验证了这一平行耦合的可行性,这为平行耦合连接又提供了一种新的方法。

光纤与光波导进行耦合时,由于模场不匹配往往造成较大的耦合损耗,可以通过采用利用透镜会聚光束原理来改善耦合效率。在光纤端面制作透镜是其中一种比较常规的方法<sup>[47]</sup>,采用电弧烧蚀法、化学刻蚀法以及喷印法制作的光纤端面透镜可以在一定程度上改善耦合性能,也可以通过把光纤端面加工成锥形提高耦合效率<sup>[47]</sup>。

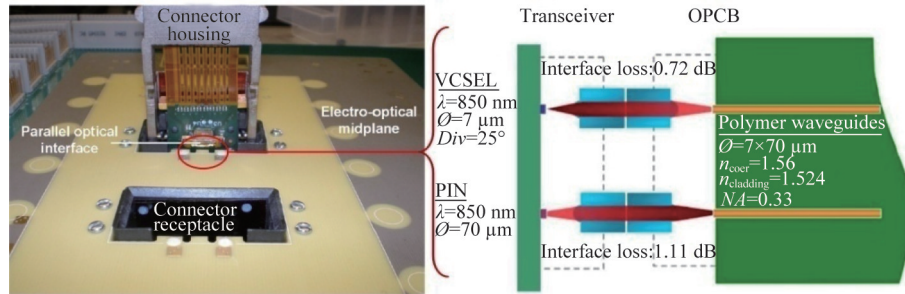
综上,各种耦合方法都有其特点及适用范围,表 3 对平行耦合的每一种耦合方法作了简单的特性对比。

#### 2.4.2 垂直耦合

根据光背板、子板及光器件的布局设计,很多光连接耦合需要采用垂直耦合方式才能够实现,目前垂直耦合的实现主要有倾斜镜面反射法、耦合元件嵌入法、软波导法、弯曲光纤法和波导光栅法等。



(a) 背板清除区域用来提供光纤连接器插座固定卡接, 以便使光纤和波导对准耦合



(b) 光收发器和 OPCB 之间置入对偶几何透镜

图 8 定位方槽实现平行耦合

Fig. 8 Parallel coupling in locating square groove

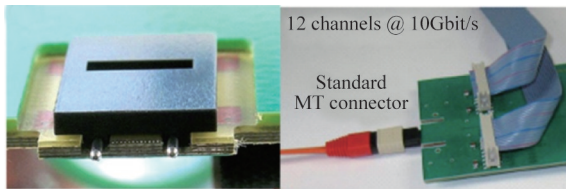


图 9 适配器及其连接耦合装置

Fig. 9 Adapter and its coupling device

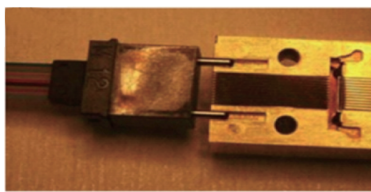
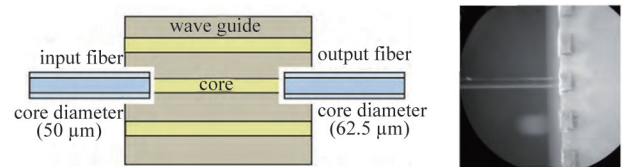


图 10 MT 跳线与光波导耦合连接

Fig. 10 Coupling device between MT and waveguide



(a) 耦合示意

(b) 显微照片

图 11 光纤嵌入到波导凹槽

Fig. 11 Diagram of waveguide embedded with fiber

韩国 MOST 把光纤的一端磨制成 45° 镜面<sup>[48]</sup>, 将该镜面嵌入到波导层里实现光束的垂直转向, 如图 12(a) 所示, 这种方法需要较为精密的加工工艺。美国惠普公司 Paul Rosenberg 制备了长 30 cm、带有 45° 镜面的光学背板<sup>[45]</sup>, 如图 12(b) 所示, 背板经过切割、钻孔等加工工艺, 把微镜封装成可插拔的光纤连接器。比利时根特大学 Steenberge 等在加工好的斜面微镜上封装了机械适配器<sup>[49]</sup>, 方便 MT 连接器连接, 如图 12

表 3 主要耦合方法对比

Table 3 Contrast of main coupling methods

耦合方式	耦合方法	适用范围	耦合位置	特点及优点	缺点
平行耦合	定位方槽耦合	■	●	机械固定, 引入透镜提高耦合效率, 便于集成	对准精度很难精确控制
	适配器耦合	▲	★	机械固定, 兼容市场化光纤产品	对准精度难精确控制
	定位导针耦合	▲	★	固化胶固定, 兼容市场化光纤产品	容易受外界环境影响, 长时间稳定性不好
光纤嵌入波导槽耦合	▲	★	固化胶固定, 成本低	波导槽加工质量要求高, 需要精确对准	

注: ■—光源-光波导耦合; ▲—光纤-光波导耦合; ●—耦合位置在背板内; ★—耦合位置在背板端面。

(c)所示。在光波导上加工斜面微镜的方法也得到很大的发展,主要有金刚石切割法<sup>[50]</sup>、激光刻蚀法<sup>[51-52]</sup>、模具压印法<sup>[53]</sup>等。

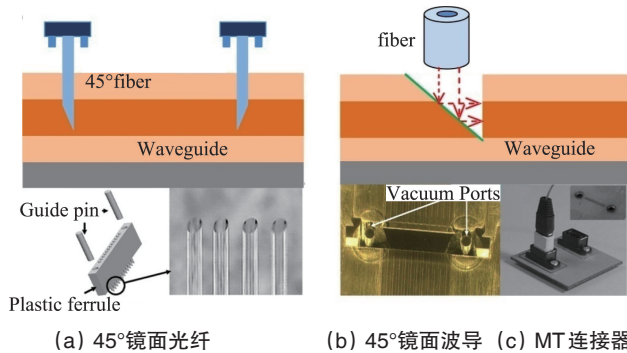


图 12 45°镜面垂直转向

Fig. 12 Diagrams of vertical coupling structure

在光波导中置入带有45°镜面的耦合元件也是一种非常有效的方法,将来极有可能是垂直耦合连接主要方法之一,它脱离光波导而单独制备,有效避免了对光背板二次加工所带来的不利影响。比利时 Jürgen Van Erps 的科研小组首次发展了此技术<sup>[54]</sup>,采用带有45°镜面的耦合元件斜面镜部分嵌入到光波导凹槽中,其余部分外露于光波导表面,如图 13(a)所示,实验测得整个连接损耗为 3 dB。该小组进一步改进此耦合方法,又发展了把耦合元件嵌入光波导中的方式<sup>[55]</sup>,如图 13(b)所示。一般来说,斜平面镜会对光束造成一定的发散,为了克服此因素带来的不利影响,该小组采用深质子写入 (deep proton writing, DPW) 技术加工了带有凹面镜的耦合元

件<sup>[56]</sup>,实验取得了良好效果,如图 13(c)所示;国防科技大学也发展了一种由两个微透镜阵列和一个直反射棱镜组成的耦合元件,如图 13(d)所示。

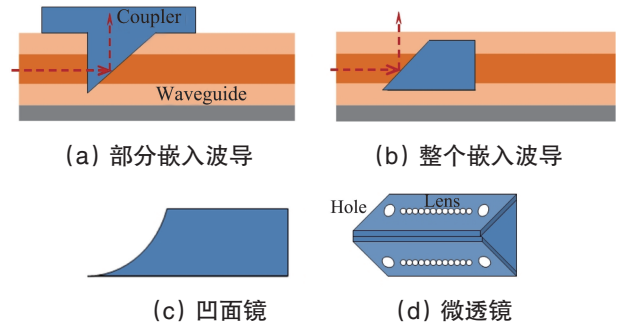


图 13 带有45°镜的离散耦合元件耦合

Fig. 13 Coupling devices with 45° mirror

利用软波导是一种实现垂直耦合的新方法,德国西门子公司<sup>[57]</sup>与 IBM<sup>[2]</sup>在此方面展开了深入研究。由于软波导是从光背板中引申出来的,一定程度上降低了常规方法耦合对准的复杂度,但必须在软波导的尾端集成一个标准的、可插拔的 MPX™ 光纤连接器<sup>[57]</sup>,如图 14(a)所示,用来实现主板与子板之间的连接。此外,IBM 公司制备了一种 4×12 路的软波导连接器<sup>[2]</sup>,如图 14(b)所示,对准精度达 ±5 μm,平均耦合损耗为 2.2 dB。软波导方法能够和传统的耦合连接方式结合,可实现任意角度、任意方向的耦合,但难点是软波导的制备及复杂的集成连接头工艺。

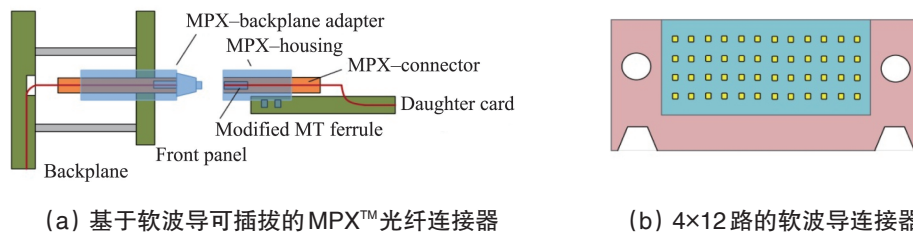


图 14 软波导实现垂直耦合

Fig. 14 Vertical coupling diagrams with soft waveguide

另外,韩国的 Mu Hee Cho 发展了直接采用 90° 弯曲光纤实现垂直耦合的方式<sup>[58]</sup>,将光纤做成 90° 弧形,然后再把它放进固定模块中组成一个耦合元件,如图 15 所示,其缺点是光纤引入的弯曲损耗比较大。

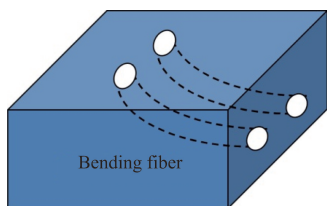


图 15 弯曲光纤

Fig. 15 Bending fiber structure

此外,波导光栅法也有所研究,但此种方法耦合效率较低,经过优化的波导光栅的耦合效率理论值 >90%,但实验测量值仅有 30%<sup>[59]</sup>,因此,此种方法在光背板互连集成应用中有待进一步优化。

综上,各种耦合方法都有其特点及适用范围,表 4 对垂直耦合的每一种耦合方法作了简单的特性对比。

### 2.5 光背板互连系统

开发光背板互连系统对光背板互连技术的实用化起到了重大的促进作用,国内外许多通信设备制造商极为重视此方面的开发和应用。

2012 年,韩国电子与电信研究所展示了基于软波导互连

表4 主要耦合方法对比  
Table 4 Contrast of main coupling methods

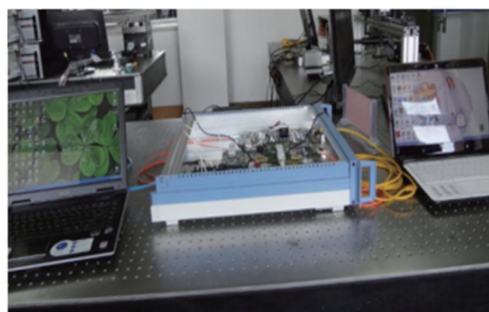
耦合方式	耦合方法	适用范围	耦合位置	特点及优点	缺点
垂直耦合	光纤倾斜镜面耦合	▲	●	机械固定,封装较简单	需要精密的加工工艺
	波导倾斜镜面耦合	▲	●★	机械固定,兼容市场化光纤产品	对波导倾斜镜面精加工,工艺流程复杂
	耦合元件嵌入耦合	▲	●	耦合元件单独制备,避免光背板二次加工	耦合元件微小,需要精密的加工工艺,
	软波导耦合	▲	●★	实现任意角度的耦合,降低耦合对准复杂度	复杂的制备工艺,精密的连接头制备工艺
	弯曲光纤耦合	▲	●	制备工艺简单,可批量生产	弯曲损耗较大
	波导光栅耦合	▲	●★	制备工艺简单,可批量生产	耦合效率非常低,不实用

注:■—光源-光波导耦合;▲—光纤-光波导耦合;●—耦合位置在背板内;★—耦合位置在背板端面。

的远程 SPP 模块技术用于手机相机单元<sup>[60]</sup>,所获得的电子图像传输到 LCD 显示器中显示,其传输速率为 2.5 Gbit/s;同年, Xyratex 公司发布了一款基于光电混合背板互连的存储演示系统,其传输速率为 10.3125 Gbit/s,将应用于数据中心的存储功能<sup>[44]</sup>;此外,惠普公司也在 2012 年发布了一款光背板互连传输系统,获得了良好的传输性能<sup>[45]</sup>;2013 年,上海大学联合美维科技也推出了一套 10 Gbit/s 光互连演示系统<sup>[61]</sup>,互连

光背板长度达 30 cm,所传输的视频信息功能良好,如图 16(a)所示;2014 年,PhoxTrot 发布了一套基于 281×233 mm<sup>2</sup>玻璃材质的光电互连演示平台<sup>[62]</sup>,并发展了一套可插拔连接器,实验测得传输速率分别为 15、20、28、32 Gbit/s 的眼图质量好,如图 16(b)所示。

从以上系统应用发展情况得知,光背板互连技术正逐步走向实用化的道路。



(a) 上海大学与美维科技开发的演示系统



(b) PhoxTrot 开发的光电互连演示系统

图 16 光背板互连应用系统

Fig. 16 Typical demo systems of OPCB interconnect

### 3 结论与展望

近年来,国内外光背板互连技术得到了长足发展,面向宽带、高速互连技术的应用需求,已经在互连光波导设计、光背板制备、接插耦合器件、光互连系统应用等关键技术方面开展了深入研究,光背板互连技术有望在未来宽带通信、超级计算机、大数据中心等领域得到广泛应用。

目前,光背板互连光波导材料主要是基于适合 850 nm 波段传输的聚合物,虽然其制备工艺得到了优化,但是对于低能耗、超长互连距离(>600 mm)应用需求来说,其传输损耗性能仍亟待提升。此外,基于成熟的 1310/1550 nm 波段光器件,可以开发该波段适用的玻璃基互连光波导。

光耦合接插件可以实现光背板与子板及光器件的光耦合,简单、可靠、高耦合效率的光背板连接器是研发的重点,

特别是具有垂直转向功能的光连接器技术的开发是重中之重。虽然目前平行耦合和垂直耦合连接器得到了深入研究,但大多是实验室样品,还未形成标准。因此,下一步研发应集中在结构优化设计和工艺流程标准化方面,以满足不同链路结构的光背板互连应用要求。

未来光背板技术产业化推广,应呈现为光电混合集成背板形态,随着电集成技术、光集成技术的迅速发展,应重点开发集成微光学元件、微电子器件和微机械结构的集成微光机电工艺,研制开发集成高速光互连、储存、光电探测及信号处理等多功能、智能化光电功能背板系统。

#### 参考文献(References)

[1] Ghiasi A. Large data centers interconnect bottlenecks[J]. Optics Ex-

- press, 2015, 23(3): 2085–2090.
- [2] Dangel R, Horst F, Jubin D, et al. Development of versatile polymer waveguide flex technology for use in optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 3915–3926.
- [3] Matsui J, Yamamoto T, Tanaka K, et al. Optical interconnect architecture for servers using high bandwidth optical mid-plane[C]. *Optical Fiber Communication Conference & Exposition, Los Angeles, United States*, March 1–3, 2012.
- [4] Taubenblatt M A. Optical interconnects for high performance computing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 448–458.
- [5] Kachris C, Tomkos I. A survey on optical interconnects for data centers [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(4): 1021–1036.
- [6] Kingford PCB Electronics Co., Ltd. Happy holden: HDI use in optical waveguides[EB/OL]. 2014–07–12[2016–04–18]. <http://www.chinapcb-manufacturing.com/happy-holden-hdi-use-optical-waveguides/>.
- [7] 李杰. 用于光互连的聚合物波导研究[D]. 长沙: 国防科技大学工学院, 2009.  
Li Jie. The study of polymer waveguide based on optical interconnection [D]. Changsha: Department of Engineering, National University of Defense Technology, 2009.
- [8] 凌云. 有机聚合物光波导的研制[D]. 南京: 东南大学物理系, 2005.  
Ling Yun. Study on polymer optical waveguide[D]. Nanjing: Department of Physics, Dongnan University, 2005.
- [9] 张金星. 基于光波导互连的 EOPCB 的研究[D]. 武汉: 华中科技大学光电科学与工程学院, 2011.  
Zhang Jinxing. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [10] Neyer A, Kopetz S, Rabe E, et al. Electrical–optical circuit board using polysiloxane optical waveguide layer[C]. *Proceeding of 55th Electronic Components & Technology Conference, Florida, USA*, May 31–June 3, 2005.
- [11] Schmidtke K, Flens F, Worrall A, et al. 960 Gb/s optical backplane ecosystem using embedded polymer waveguides and demonstration in a 12G SAS storage array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 3970–3975.
- [12] Dangel R, Hofrichter J, Horst F, et al. Polymer waveguides for electro–optical integration in data centers and high–performance computers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4736–4750.
- [13] Jose G, Sorbello G, Taccheo S, et al. Ag<sup>+</sup>–Na<sup>+</sup> ion exchange from dilute melt: Guidelines for planar waveguide fabrication on a commercial phosphate glass[J]. *Optical Materials*, 2003, 23(3–4): 559–567.
- [14] Pitwon R C A, Brusberg L, Schroder H, et al. Pluggable electro–optical circuit board interconnect based on embedded graded–index planar glass waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(4): 741–754.
- [15] Lee E H, Lee S G, O B H, et al. Fabrication of a hybrid electrical–optical printed circuit board (EO–PCB) by lamination of an optical printed circuit board (O–PCB) and an electrical printed circuit board (E–PCB)[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 6126, San Jose, USA*, January 21, 2006.
- [16] Mischke H, Gruetzner G, Shaw M. Plasma etching of polymers like SU–8 and PCB[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 4979, San Jose, USA*, January 25, 2003.
- [17] Krabe D, Scheel W. Optical interconnects by hot embossing for module and PCB technology[C]. *Proceedings 49th Electronic Components and Technology Conference, San Diego, USA*, June 1–4, 1999.
- [18] Iliescu C I, Tay F E H, Miao J M, et al. Wafer level packaging of pressure sensor using SU8 photoresist[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 5649, Sydney, Australia*, March 9, 2005.
- [19] 朱军, 赵小林, 倪智萍. SU–8 光刻胶的应用工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2001(2): 57–60.  
Zhu Jun, Zhao Xiaolin, Ni Zhiping. Study on application technology of SU8–5 Photo Resist[J]. *Micro machining technology*, 2001(2): 57–60.
- [20] Neyer A, Kopetz S, Rable E. Electrical–optical circuit board using polysiloxane optical waveguide layer[C]. *Proceedings 55th Electronic Components and Technology Conference, Orlando USA*, May 31–June 3, 2005.
- [21] Wittmann B, Lehmacher S, Kopecz S, et al. Optical interconnects on and in printed circuit boards[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2001, 55(5): 319–322.
- [22] Takenobu S, Okazoe T. Heat resistant and low–loss fluorinated polymer optical waveguides at 1310/1550 nm for optical interconnects[C]. *European Conference & Exhibition on Optical Communication, Geneva, Switzerland*, September 18–22, 2011.
- [23] 张家亮. 光电印制电路板的发展评述(3)——聚合物波导的成型工艺(1)[J]. *印制电路信息*, 2007(2): 17–20.  
Zhang Jialiang. Review of progress in optical–electronic circuit boards (3): Patterning techniques of polymer optical waveguide layers (part 1) [J]. *Printed Circuit Information*, 2007(2): 17–20.
- [24] Yoon K B, Cho I K, Ahn S H, et al. Optical PCB using waveguide–embedded backplane[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 5523, Denver, USA*, October 14, 2004.
- [25] Holland A S, Mitchell A, Balkunje V S, et al. Fabrication of raised and incerted SU8 ploymer waveguides[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 5644, Beijing, China*, November 08, 2005.
- [26] Thadesar P A, Bakir M S. Novel photo–defined polymer–enhanced through–silicon vias for silicon interposers[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(7): 1130–1137.
- [27] Choi C, Lin L, Liu Y J, et al. Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board–level optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2168–2176.
- [28] Balakrishnan M, Diemeer M B J, Driessen A, et al. Highly stable and low loss electro–optic polymer waveguides for high speed microring modulators using photodefinition[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 6123, San Jose, USA*, January 21, 2006.
- [29] Yu Z H, Luo F G, Di X, et al. Highly reliable optical interconnection network on printed circuit board for distributed computer systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1332–1336.
- [30] Zakariyaha S S, Conway P P, Hutt D A, et al. CO<sub>2</sub> laser micromachining of optical waveguides for interconnection on circuit boards[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1752–1756.
- [31] Selviah D R, Walker A C, Hutt D A, et al. Integrated optical and electronic interconnect PCB manufacturing research[J]. *Circuit World*, 2010, 36(2): 5–19.
- [32] Su R Z, Tang D H, Ding W Q, et al. Efficient transmission of crossing dielectric slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4756–4761.
- [33] Ni W, Wu J, Wu X. Crossing and branching nodes in soft lithography–based optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12872–12881.
- [34] Tsarev A V. Efficient silicon wire waveguide crossing with negligible loss and crosstalk[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 13732–13737.
- [35] 夏倩, 李康, 庞拂飞, 等. 光印刷电路板互连交叉光波导传输特性分析[J]. *半导体光电*, 2013, 34(6): 966–970.  
Xia Qian, Li Kang, Pang Fufei, et al. Transmission characteristics of multimode crossing optical waveguide[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(6): 966–970.
- [36] Israel D, Baets R, Shaw N, et al. Comparison of different polymeric

- multimode star couplers for backplane optical interconnect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(6): 1057-1064.
- [37] Bamiedakis N, Hashim A, Penty R V, et al. A 40 Gb/s optical bus for optical backplane Interconnections[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1526-1537.
- [38] Schares L, Kash J A, Doany F E, et al. Terabus: Terabit/second-class card-level optical interconnect technologies[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(5): 1032-1044.
- [39] Dangel R, Berger C, Beyeler R, et al. Polymer-waveguide-based board-level optical interconnect technology for datacom applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 31(4): 759-767
- [40] Pepeljugin P, Kash J, Doany F, et al. Low power and high density optical interconnects for future supercomputers[J]. *Optical Fiber Communication*, 2010, 45(2): 1-3.
- [41] Chao C Y, Fung W, Guo L J. Polymer microring resonators for biochemical sensing applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(1): 134-142.
- [42] Hu J J, Feng N N, Carlie N, et al. Optical loss reduction in high-index-contrast chalcogenide glass waveguides via thermal reflow[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1469-1478.
- [43] Pitwon R C A, Hopkins K, Milward D, et al. Passive assembly of parallel optical devices onto polymer-based optical printed circuit boards [J]. *Circuit World*, 2010, 36(4): 3-11.
- [44] Dellmann L, Berger C, Beyeler R, et al. 120 Gb/s optical card-to-card interconnect link demonstrator with embedded waveguides[C]. *Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, USA, May 30 - June 2, 2007.
- [45] Rosenberg P, Mathai S, Sorin W V, et al. Low cost, injection molded 120 Gbps optical backplane[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 590-596.
- [46] 贾娜娜, 邓传鲁, 庞拂飞, 等. 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 120-125.  
Jia Nana, Deng Chuanlu, Pang Fufei, et al. Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 120-125.
- [47] 马慧莲, 杨建义, 李瑾, 等. 光波导-单模光纤的直接耦合[J]. *光通信研究*, 2000, (3): 43-46.  
Ma Huilian, Yang Jianyi, Li Jin, et al. Optical waveguide-fiber direct coupling[J]. *Study on optical communications*, 2000(3): 43-46.
- [48] Rho B S, Kang S, Cho H S, et al. PCB-compatible optical interconnection using 45°-ended connection rods and via-holed waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2128-2134.
- [49] Steenberge V G, Geerincx P, Van Put S V, et al. MT-compatible laser-ablated interconnections for optical printed circuit boards[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2083-2090.
- [50] Yoshimura R, Hikita M, Usui M, et al. Polymeric optical waveguide films with 45 mirrors formed with a 90 V-shaped diamond blade[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(15): 1311-1312.
- [51] Kim J S, Kim J J. Fabrication of multimode polymeric waveguides and micromirrors using deep X-ray lithography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(3): 798-800.
- [52] Wang F T, Liu F H, Adibi A. 45 degree polymer micromirror integration for board-level three-dimensional optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10514-10521.
- [53] Lee W J, Hwang S H, Lim J W, et al. Polymeric waveguide film with embedded mirror for multilayer optical circuits[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(1): 12-14.
- [54] Erps V J, Hendrickx N, Debaes C, et al. Discrete out-of-plane coupling components for printed circuit board-level optical interconnections[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(21): 1753-1755.
- [55] Hendrickx N, Erps J V, Bosman E, et al. Embedded micromirror inserts for optical printed circuit boards[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(20): 1727-1729.
- [56] Erps J V, Hendrickx N, Erwin Bosman, et al. Design and fabrication of embedded micro-mirror inserts for out-of-plane coupling in PCB-level optical interconnections[C]. *The International Society for Optical Engineering of SPIE 7716*, Brussels, Belgium, April 12, 2010.
- [57] Bierhoff T, Schrage J, Halter M, et al. All optical pluggable board-backplane interconnection system based on an MPX TM-FlexTail connector solution[C]. *2010 IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series (WTM)*, Palma, Spain, January 11, 2010.
- [58] Cho M H, Hwang S H, Cho H S, et al. High-coupling-efficiency optical interconnection using a 90-bent fiber array connector in optical printed circuit boards[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 690-692.
- [59] Taillaert D, Laere F V, Ayre M, et al. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(8A): 6071-6077.
- [60] Ju J J, Park S, Kim M S, et al. Data transfer for optical interconnectors using long range-SPP transmission lines[C]. *Optical Fiber Communication Conference and exhibition*, Los Angeles, USA, March 4-8, 2012.
- [61] Xia Q, Immonen M, J. Wu J H, et al. Optical backplane demonstrator with 10Gbps video transmission link on printed circuit board using optical waveguides[C]. *International microsystems, packaging, assembly and circuits technology conference*, Taipei, China, October 22-25, 2013.
- [62] Håkansson A, Tekin T, Brusberg L, et al. PhoxTroT - a european initiative toward low cost and low power photonic interconnects for data centres[C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, Budapest, Hungary, July 5-9, 2015.

## Research progress of optical interconnection technology on optical printed circuit boards

DENG Chuanlu, WANG Tingyun, PANG Fufei, SONG Zhiqiang, WANG Jianhui, CHEN Jiamin, YAN Xinjie

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks of Shanghai University, Shanghai 200093, China

**Abstract** Optical interconnect on printed circuit boards (OPCBs) is a research focus in the field of communication due to its unique advantages of high transmission rate, low power consumption, low cost, no electromagnetic interference, etc. In this article, firstly the schematic diagrams of optical waveguide and the preparation process of OPCBs are introduced in brief. Then, the progresses of the transmission characteristics, coupling method, environmental reliability, system application, etc. about OPCBs are discussed in detail. Finally, the outlook of its development direction is prospected.

**Keywords** optical printed circuit boards; roughness; optical interconnect; transmission characteristic; optical connector (编辑 傅雪)